

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Министерство промышленности и торговли Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное учреждение  
Научно-исследовательский институт  
Центр экологической промышленной политики

На правах рукописи

**Захаров Александр Иванович**

**Научные основы формообразования керамических изделий**

05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

17.00.06 – Техническая эстетика и дизайн

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант –  
д.т.н., проф. Т. В. Гусева

**Москва – 2019**

## Содержание

Введение.....	5
1 Роль формы в дизайне керамического изделия .....	13
1.1 Дизайн как единство формы, композиции и декора предмета: история и современность формообразования керамических изделий .....	13
1.2 Дизайн промышленного производства керамических изделий: совершенствование технологии керамики в области формообразования .....	47
Выводы по разделу 1.....	95
2 Методология проектирования формы керамического изделия: критерии сложности формы.....	97
2.1 Сложность формы изделия как мера технологичности .....	97
2.2 Критерии сложности формы керамических изделий: энергетические воздействия на форму и материал. Дефекты керамических изделий, как реакция на энергетические воздействия на материал и форму при формовании, сушке, обжиге.....	122
2.3 Критерии сложности формы керамических изделий: симметрия. Сложность формы и потребительские свойства. Симметрия изделий.....	170
Выводы по разделу 2.....	210
3 Экспериментальная часть.....	211
3.1 Объекты и инструмент исследования .....	211
3.1.1 Исходные материалы.....	211
3.1.2 Методики, используемые в работе.....	217
3.1.2.1 Методики исследования минерального, фазового и зернового состава.....	217
3.1.2.1.1 Петрографический анализ.....	217
3.1.2.1.2 Рентгенофазовый анализ .....	218

3.1.2.1.3	Электронная микроскопия .....	219
3.1.2.1.4	Лазерная гранулометрия .....	219
3.1.2.1.5	Определение удельной поверхности (метод БЭТ) .....	219
3.1.2.2	Методики исследования технологических, в том числе термических, свойств используемых масс .....	220
3.1.2.2.1	Определение усадки, термического коэффициента линейного расширения и непрерывной усадки.....	220
3.1.2.2.2	Определение числа пластичности и оптимальной формовочной влажности.....	220
3.1.2.2.3	Определение реологического поведения шликера с помощью ротационного вискозиметра «Реотест».....	221
3.1.2.3.4	Разжижение шликера электролитом .....	221
3.1.2.2.5	Определение скорости набора массы .....	221
3.1.2.2.6	Определение коэффициента чувствительности к сушке .....	221
3.1.2.2.7	Дифференциально-термический и термогравиметрический анализы.....	222
3.1.2.2.8	Методика определения керамических свойств (водопоглощения, открытой пористости, кажущейся плотности) образцов .....	222
3.1.2.2.9	Методика определения механической прочности образцов .....	222
3.1.2.2.10	Определение однородности поверхности методом капиллярного всасывания .....	222
3.1.2.2.11	Установка для испытания образцов на высокотемпературную деформацию .....	225
3.2	Эффективность способов формования полуфабрикатов различных форм с позиции однородности материала .....	227
3.2.1	Исследование однородности образцов методом петрографии .....	227

3.2.2	Исследование однородности образцов методом меток и капиллярного всасывания .....	233
3.3	Влияние характеристик формы полуфабриката на его поведение при сушке .....	277
3.4	Влияние характеристик формы полуфабриката на его поведение в обжиге.....	303
3.4.1	Исследование открытой пористости участков обожженного изделия..	303
3.4.2	Проблемы исследований деформации керамики.....	308
3.4.3	Прогнозирование деформации керамического изделия при обжиге ....	319
3.5	Примеры, иллюстрирующие основные положения работы .....	338
3.5.1	Использование фактора формы в оптимизации формы изделия .....	338
3.5.2	Использование принципа Кюри в проектировании обжига изделий ....	345
3.5.3	Увеличение числа функций керамических деталей в проектируемом изделии .....	348
3.5.4	Изготовление керамических изделий сложной формы способом ламинирования .....	352
3.5.5	Сокращение технологических стадий изготовления и уменьшение массы керамического изделия .....	355
	Выводы по разделу 3.....	364
	Заключение .....	366
	Общие выводы по работе .....	370
	Благодарности.....	373
	Литература .....	374
	Приложения .....	410
П. 1	Документы, подтверждающие использование результатов диссертационной работы .....	410

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Керамические изделия изготавливаются и применяются человеком тысячи лет, устойчивость к термическим, химическим и биологическим воздействиям определяет их широкое использование в строительстве, быту, технике. Форма керамических изделий определяется как функциональными требованиями, так и технологическими возможностями и свойствами материала. Существенной сложностью использования керамики в качестве конструкционного материала различного применения является ее хрупкость. Формообразование керамических изделий, выпускаемых массовыми тиражами, требует системного подхода с позиции их функциональной эффективности и технологичности для чего необходимо применение понятийного аппарата как химической технологии, так и дизайна.

В технологии, материаловедении и промышленном дизайне в области керамики в начале XXI века наблюдаются следующие устойчивые тенденции:

- расширение областей использования изделий из керамики и композитов на ее основе в качестве замены дорогостоящих металлов;
- разработка ресурсо- и энергосберегающих технологий, в том числе за счет оптимизации форм изделий и придания им новых функций;
- разработка новых более экономичных способов производства (формования и обработки), связанных с компьютерным проектированием изделий и аддитивными технологиями.

Задачу создания оптимальной формы для конкретных условий технологии и эксплуатации необходимо решать, на основе закономерностей и технологии, и дизайна, т. к. с позиции дизайна изделия можно охватить все стадии его жизненного цикла, что позволит составить полное представление об оптимальности формы.

Работа посвящена исследованию закономерностей формообразования керамических изделий промышленного дизайна, выпускаемых массовыми тиражами, включая стадии их проектирования, производства и эксплуатации.

**Степень проработанности темы.** Формы создаваемых человеком объектов, взаимодействия формы и декора изделий, формы и функции, раскрытие в форме изделия преимуществ материала рассматривали с позиции искусства, философии и дизайна. Известна теория «архетипов», уже существующих и предшествующих любой форме (К. Юнг, О. Шпленгер, Л. Б. Фрейверт), прототипов творений природы на основе различных элементов (В. Б. Мириманов, М. С. Кухта). При рассмотрении формы природных и искусственных объектов большое внимание уделяли симметрии, как формообразующему началу, изменение которой в процессе синтеза вещества подчиняется принципу суперпозиции (В. И. Вернадский, И. И. Шафрановский, В. С. Урусов, Л. А. Шейнич).

Функциональность формы керамического изделия, занимающую особое место в промышленном дизайне, в свою очередь связывали с технологичностью изделия, минимизацией затрат его производства, в основном определяющейся затратами на формование. Для изделий конкретного вида технологи сформулировали понятие групп сложности, отраженные в стандартах и рабочей документации отдельных производств.

Значительная часть научных исследований в области повышения технологичности и ресурсосбережения посвящена совершенствованию способов формования для разных групп изделий (Р. Я. Попильский, Ю. Е. Пивинский, А. Г. Добровольский, П. О. Грибовский, М. И. Тимохова, О. Л. Хасанов и др.). В большинстве работ, посвященных способам формования керамических изделий, рассмотрены аспекты оптимизации параметров формования с учетом геометрии изделий, причем применение того или иного способа ограничено сложностью формы изделия и его габаритами. Значительное внимание уделено модификации и развитию способов формования.

Влияние параметров керамических изделий, особенно больших габаритов (огнеупорные, санитарно-технические изделия), на их сушку и обжиг рассматривали, исходя из общих закономерностей теплофизики (А. И. Августинник, В. Н. Зимин, А. А. Шумилин). Отдельные исследования были сфокусированы

на вопросах высокотемпературной деформации изделий (Э. Келер, Н. В. Соломин, В. С. Бакунов, Е. С. Лукин, У. Ш. Шаяхметов).

В работах, рассматривающих все стадии производства керамики, посвященных эволюции керамических материалов на различных стадиях технологии, описаны их структурные преобразования в процессе уплотнения (структурно-энергетический параметр В. А. Лотова), в том числе диссипативное поведение структуры в результате неравновесных процессов (А. В. Беляков). В этих работах форма полуфабриката и изделия не была рассмотрена как существенный параметр.

Другая группа исследований посвящена проблемам конструкции и дизайна изделий из керамики как технического (А. П. Гаршин, С. М. Баринов, В. Я. Шевченко и др.), так хозяйственно-бытового и художественного назначения (Г. Е. Лукич). Рассматривая проектирование керамических изделий в научных работах особое внимание уделяли оптимизации форм, воспринимающих различные нагрузки во время эксплуатации (топологическая оптимизация), такая оптимизация получила новый импульс к развитию с появлением аддитивных технологий.

Рассмотренные подходы объединяет то, что исследователи сосредоточили внимание в основном на производстве и технологичности формы изделия, между тем в последние 30 лет развитие как технологии, так и промышленного дизайна тесно связано с активным развитием цифровых способов проектирования и производства изделий, что диктует необходимость разработки общих научных подходов к формообразованию керамических изделий, объединяющих проектирование, технологию производства и эксплуатацию.

**Цель работы** – разработка принципов теории и методологии формообразования и конструирования керамических изделий промышленного дизайна художественного и технического назначения на основе используемых в технологии и дизайне критериев технологичности, ресурсосбережения и повышения их функциональной эффективности.

**Задачи работы.** Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

- анализ тенденций формообразования изделий промышленного дизайна на примерах керамических изделий различного назначения;
- разработка научных подходов к оценке технологичности и дизайна керамических изделий с позиции их формообразования и критериев сложности формы;
- анализ используемых способов формования керамических изделий промышленного дизайна и определение перспективы их развития;
- определение технологических дефектов керамических полуфабрикатов и изделий на разных стадиях производства, влияющих на дизайн изделия;
- анализ форм исторических и современных керамических изделий промышленного дизайна (бытовых, огнеупорных и строительных) и установление связи их симметрии со способом производства;
- разработка классификации дизайна керамических изделий, исходя из их функциональности и особенностей формообразования;
- определение влияния способов формования и термообработки керамических изделий промышленного дизайна на однородность материала в изделии;
- определение влияния параметров формы полуфабриката изделий промышленного дизайна на его трещинообразование при сушке;
- моделирование деформационного поведения керамических изделий промышленного дизайна при их обжиге.

**Научная новизна работы** определяется тем, что:

- установлено, что общими критериями оценки сложности формы керамических изделий промышленного дизайна являются определяющий размер изделия или его фактор формы (отношение объема материала к площади поверхности изделия) и симметрия, характеризующая равномерность распределения объема материала по конфигурации изделия;
- показано, что применение принципа П. Кюри (принципа суперпозиции симметрии полей формовочных усилий, температур и влажностей при термо-

обработке, термомеханических усилий при эксплуатации) позволяет оптимизировать дизайн изделий и технологию (выбор способов формования, сушки, обжига);

- разработана классификация дизайна керамических изделий по функциональности и особенностям формообразования, связанных с симметрией изделий, на 3 категории: облицовки – высокосимметричные модульные изделия, имеющие плоскостную, осевую (поворотную) и центральную симметрию, оболочки – емкости, имеющие плоскостную, осевую и (редко) – центральную симметрию, и конструкции, имеющие плоскостную, реже – осевую и центральную симметрию, а также ассиметричные;

- предложено классифицировать дефекты керамических изделий на дефекты структуры, приводящие к нарушению микроструктуры материала или покрытия, и дефекты дизайна приводящие к искажению формы изделия, нарушению сплошности его поверхности, являющиеся результатом значительного внешнего воздействия при производстве или эксплуатации;

- показано, что образование дефектов дизайна изделий на разных стадиях жизненного цикла (производстве и эксплуатации) является результатом несоответствия величины и направления (симметрии) прикладываемых внешних усилий;

- разработана методика определения локальной открытой пористости капиллярным всасыванием для определения неоднородности поверхности керамического полуфабрикатов и изделий промышленного дизайна.

**Теоретическая значимость работы** заключается в выработке общих критериев оценки сложности керамических изделий для их дизайна и технологии, и установлении соответствия между формой, габаритами и конструкцией изделия, а также способами его изготовления и эксплуатации.

**Практическая значимость работы** заключается в разработанных рекомендациях к проектированию, изготовлению и эксплуатации керамических изделий промышленного дизайна, согласно общим критериям – фактору формы и симметрии изделий. Результаты работы использованы при разработке инфор-

мационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 4-2015 «Производство керамических изделий», а также национальных стандартов по наилучшим доступным технологиям, о чем свидетельствует документ, представленный ФГАУ НИИ «Центр экологической промышленной политики» («Бюро наилучших доступных технологий»). Разработанные подходы применены для проектирования и изготовления пористых керамических матриц, о чем имеется акт успешных испытаний. Результаты работы использованы также при выполнении ряда российских и международных проектов и при подготовке учебных пособий (что подтверждено документально), в том числе: **А. И. Захаров**. «Конструирование керамических изделий» (2002), «Энергетическая и экологическая эффективность производства керамических изделий» / **А. И. Захаров** и др. [под ред. **А. И. Захарова**] (2012), Д. В. Андреев, **А. И. Захаров**. «Разработка изделий из силикатных материалов» (2016).

Результаты работы используются в учебном процессе обучения бакалавров по направлениям 29.03.04 «Технология художественной обработки материалов» и 18.06.01 «Химическая технология», профиль «Химическая технология неметаллических и силикатных материалов», а также нашли применение при проведении курсов повышения квалификации в рамках международных проектов в 2009-2019 гг.

**Методология работы** заключается в выработке единых критериев сложности дизайна керамических изделий для основных стадий их жизненного цикла на основе фактора формы и симметрии, рассматриваемых с использованием принципа суперпозиции П. Кюри.

**Методы исследования.** В работе применяли современные методы физико-химического анализа состава, структуры и свойств материалов и изделий, включая петрографию, сканирующую электронную микроскопию, лазерную гранулометрию, дифференциально-термический и термогравиметрический анализы, а также специально разработанные методы определения структурных характеристик и высокотемпературного поведения материала. Моделирование

поведения материалов в условиях термомеханических напряжений проводили с помощью современного программного обеспечения.

**На защиту выносятся:**

- методология оценки сложности формы керамических изделий промышленного дизайна с учетом фактора формы, габаритов и симметрии;
- эффективность применения принципа П. Кюри к дизайну керамического изделия, включая основные стадии жизненного цикла производства и эксплуатации;
- классификация дизайна керамических изделий промышленного дизайна по функциональности и особенностям формообразования, связанным с симметрией изделий;
- классификация дефектов, проявляющихся на стадиях производства и эксплуатации, на дефекты дизайна (формы) и дефекты структуры.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач работы, сборе и анализе информации, планировании экспериментов, в разработке методов исследования, непосредственном участии в проведении экспериментов, в обобщении результатов работы и формулировке выводов. Авторская доля в публикациях по теме работы превышает 70 %.

**Достоверность результатов работы** подтверждается использованием методов физико-химического анализа состава, структуры и свойств материалов и изделий, статистической обработкой результатов экспериментов, применением компьютерных средств моделирования поведения и обработки данных экспериментов.

**Апробация работы и реализация результатов работы.** Основные положения работы обсуждены на всероссийских и международных конференциях: «Успехи в химии и химической технологии» многократно в 1999-2018 гг. РХТУ им. Д. И. Менделеева (г. Москва), конф. руководителей, ведущих специалистов и художников промышленных предприятий России, 2002 (г. Москва), Научно-практ. конф. «Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее», 2003 (г. Москва), XVIII междунар. конф. «Конструк-

ции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», 2007 (г. Обнинск), Межвуз. научно-практ. студ. конф. «Молодая наука», 2009 (г. Москва), на Всерос. научно-практ. конф. по специальности «Технология художественной обработки материалов» – XII, 2009 (г. Ростов-на-Дону), XIII, 2010 (г. Москва), XV, 2012 (г. Ижевск), XVIII, 2015 (г. Кострома), XX, 2017 (г. Ростов-на-Дону), III междунар. научно-практ. конф. «Наука. Образование. Культура» 2011 (пос. Гжель), V междунар. конф. «Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования», 2012 (г. Ижевск), University of Ruse “Angel Kanchev”: Proceedings: Chemical Technologies – Ruse: 2013, IX Всерос. научной конф. «Керамика и композиционные материалы», 2016 (г. Сыктывкар), 16<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016 (Albena, Bulgaria), научно-производственном семинаре ЦКП «Научоемкие технологии в машиностроении» МПУ, 2018 (г. Москва).

## **1 Роль формы в дизайне керамического изделия**

### **1.1 Дизайн как единство формы, композиции и декора предмета: история и современность формообразования керамических изделий**

Наиболее часто цитируемое определение дизайна определяет его как «вид деятельности по проектированию предметного мира» [1]. Более развернутое определение приведено в [2] «Дизайн – специфическая сфера деятельности по разработке (проектированию) предметно пространственной среды (в целом и отдельных ее компонентов), а также жизненных ситуаций с целью придания результатам проектирования высоких потребительских свойств, эстетических качеств, оптимизации и гармонизации их взаимодействия с человеком и обществом». В [3] дано 11 различных определений дизайна – от философского до технического. В учебнике [4] так же представлено более 10 трактовок определения «дизайн», и далее в книге он трактуется только как проектная практика, определяемая через объект, цель, методы и адресат. Таким образом, понятие дизайна не столько комплексно, сколько многопланово, т. к. охватывает многие области творчества человека, связанные с проектированием предметной среды и нематериальных предметов – звука, света.

Объектом настоящего исследования является форма керамических изделий, которые представляют собой результат предметного, а конкретнее, промышленного (индустриального) дизайна.

Согласно Международному совету сообществ индустриального дизайна (ICSID) авторами [3, С. 8] он определяется как «творческая деятельность, цель которой определение формальных качеств предметов, производимых промышленностью». Международный совет сообществ индустриального дизайна выбрал своим девизом «Дизайн для лучшего мира» [5], определяя дизайн как инструмент для преобразований всего мироустройства.

Определяя промышленный дизайн, как «художественное и объемно-функциональное конструирование объектов для массового фабричного производства» [6], весьма часто забывают об экономических условиях его развития.

Так в том же исследовании [6, С. 10] приводится пример одного из первых проявлений промышленного дизайна: «В 1906-1907 годах Петер Беренс разработал фирменный стиль для Allgemeine Elektrizitats Gesellschaft, задав дизайнерские требования к проектированию целой системы производимых товаров и услуг, рабочих мест и взаимодействия с потребителем. Причем эти требования были тотальными, охватывали всю производственную деятельность АЕГ в целом. Стало очевидно, что обычное промышленное проектирование не способно решить целый класс производственных и маркетинговых задач.

Таким образом, промышленный дизайн не только и не столько «художественное и объемно-функциональное конструирование», а проектная деятельность по созданию продукта массового производства в условиях свободной конкуренции продуктов. Такое определение промышленного дизайна будет использоваться в дальнейшем при рассмотрении влияния дизайна и технологии на форму керамических изделий.

Дизайнер, создающий продукт, не только решает задачи собственно его проектирования, но и закладывает в свой проект потенциал успешного продвижения продукта по «жизненному циклу»: логистики, продажи, эксплуатации и т. д. В связи с этим становится ясно, почему в СССР при наличии массового производства и высокой креативности проектировщиков, не было условий для успешного развития промышленного дизайна. Планирование выпуска всей гаммы продуктов (включая товары народного потребления, выпускаемые легкой промышленностью) помогало экономить народные средства, одновременно препятствуя не только развитию, но и существованию конкуренции товаров и свободного рынка дизайнерских услуг.

Россия конца XIX – начала XX вв. давала немало удачных первых примеров дизайнерской деятельности промышленников, в том числе в области производства керамических изделий. Так, успешная организация производства и продаж керамики предприятий Товарищества М. С. Кузнецова позволила освоить рынки и Востока (в том числе родину фарфора – Китай), и Запада [7]. История советского дизайна насчитывает также немало примеров удачных решений

и конкретных и масштабных задач художественного конструирования. Советская дизайнерская школа, выросшая из Высших художественно-технических мастерских (ВХУТЕМАС) и затем оформленная в Всесоюзном институте технической эстетики (ВНИИТЭ), была признана во всем мире [7, С. 202, 8]. ВНИИТЭ не только разработал теоретические основы промышленного проектирования, но и создал замечательные примеры промышленного дизайна, по достоинству оцененные представителями ведущих школ мирового промышленного дизайна. Одними из последних разработок института были работы по созданию нового направления «эргодизайна» [9]. Однако, как справедливо отмечено в работе [10] фактически, весь теоретический и методологический аппарат ВНИИТЭ был направлен на разработку подходов к проектированию, но централизованная система принятия решений не давала возможностей для реализации проектов на производстве. Виртуальность проектов того времени отмечается и в [4, С. 37]. В [9, С. 19] признается, что работа дизайнера в России до сих пор кардинально отличается от работы западных дизайнеров, для которых художественная составляющая дизайна оказывается на третьем месте после коммерческой и конструкторской. Таким образом, анализ современного дизайна изделий включает в себя не только рассмотрение направлений развития (трендов) методик и стилей, но и более глобальных, в том числе социально-экономических, задач.

В [6, С. 13-16] приведены основные 3 этапа развития промышленного дизайна, охватывающие весь XX в., которые можно кратко охарактеризовать следующим образом:

- 1900-1930-е годы – «форма следует функции»;
- 1940-1970-е годы – «форма следует не за функцией, а за удовольствием»;
- 1980-2000-е годы – переход от «эстетики вещей» к «эстетике чувств» потребителя и даже «этике вещей».

Между тем 60-70 года аналогичные ВНИИТЭ походы к проектированию в общем и формообразованию изделий в частности показывали институты тех-

нической эстетики, существовавшие в социалистических странах Восточной Европы. Так, в [11] в перечислении факторов, определяющих процесс дизайнерского проектирования, функциональность находится на первом месте, учет данных о круге потребителей (социальные факторы) – на седьмом, т. е. на лицо было отставание от общемировых тенденций.

Известно, что само понятие «потребитель» носило в те времена негативный оттенок, а в условиях дефицита и отсутствии реальной конкуренции товаров массового потребления при всем большом творческом и техническом потенциале специалистов не было мотивации основывать проектирование изделий, в том числе их формообразование, на широких исследованиях предпочтений потребителей.

Там, где «классические» социалистические принципы хозяйствования, в частности, излишняя конкретизация в планировании ассортимента выпускаемой продукции подвергались ревизии (или развитию?), там появлялись видимые успехи в промышленном дизайне. Если в 1970-80 года, это была Социалистическая Федеративная Республика Югославия, товары которой пользовались несомненным успехом на рынках стран содружества (стран Содружества Экономической Взаимопомощи), то сегодня это, безусловно, Китайская Народная Республика, наращивающая усилия в области промышленного дизайна.

Логично, что творческий потенциал дизайна, казалось бы, направленный лишь на решения проблем потребителя, в конце концов преобразует само общество. Решая задачу придания продукту (товару) нового привлекательного качества, дизайнер неминуемо начинает все больше заниматься не товаром, а собственно его потребителем, анализируя рынок потребностей и товаров (развитый сейчас, так называемый, “research design” [12]), сначала угадывая, а затем и формируя его потребности. Формирование потребностей, в свою очередь, приводит к исследованию, переосмыслению и формированию ценностей всего общества. Естественным образом дизайнер, создавая предметный мир и являясь своеобразным «переводчиком» языка вещей, участвует в создании нового качества человеческого общества.

Значительная часть выделенного выше аналитического этапа, который предваряет техническое задание или следует непосредственно за ним, занимает маркетинговое исследование рынка изделий, выполняющих подобные функции, в сочетании с анализом художественных аналогов, в результате которого складывается представление о форме изделия. Важная часть – создание «портрета потребителя». Этот этап занимает значительное время, так как от него зависит правильность концепции всего проекта.

В проектировании одна из ведущих ролей отводится психологии потребителя [13]. Автор книги одним из своих лозунгов провозгласил «технологии меняются быстро, люди – медленно» [13, С. 24].

Резко возросшие возможности технологии должны облегчить решение задачи создания более человеческой предметной среды, в которой ведущая роль будет принадлежать композиционным материалам в виде гибридных антропоморфных технических систем бионического типа [14]. Дизайн, построенный на законах психологии человека, в сочетании с новейшими научными направлениями – нано- и биотехнологиями, является закономерным результатом технологической конвергенции.

В проектировании изделий существует системный подход [15] к определению внешнего вида изделия через анализ его функций и подфункций, определение средств решения функций и основной структуры изделия. По сути дела, это перебор вариантов взаиморасположения элементов структуры изделия и выбор наиболее оптимального из них, на основе чего появляется эскиз общего вида изделия, превращающийся потом в технический чертеж для выполнения в материале. Центральное место в данном походе занимает понятие о функциональных поверхностях, которые определяют конструкцию и внешнюю форму изделия. В 60-70-х годах 20-ого века новый виток научно-технической революции, приведший к появлению новых эффективных конструкционных материалов, прежде всего, пластика, вдохнул новое дыхание в конструктивизм с подчинением формы функции.

Подобный системный подход использовали на другом этапе – в 80-ые годы при конструировании мебели, используя огибающие и структурные формы, а также формы, усиливающие выразительность [16]. Автор этого исследования утверждал, что в проектировании побеждает индивидуальный подход к заказчику, а экономика производства, главенствовавшая на протяжении двух веков со времени промышленной революции, отходит на второй план. В формообразовании все больше начинает проявляться индивидуализм, функциональность проектируемых изделий уступает место фантазиям и формы дифференцируются. Дифференциация форм не противоречит существующей тенденции к построению так называемого модульного производства, доказывающего свою эффективность и в сфере проектирования [6, С. 14-15]. Подход, весьма характерный для мебельного производства, сегодня с успехом внедряется в современных наукоемких технологиях на уровнях: как групп предприятий, так и целых отраслей промышленности.

Своеобразная борьба индивидуальности и стандартизации наблюдалась и наблюдается в мебели и архитектуре, однако для большинства деталей, которые являются элементами конструкции, внешняя форма определяется, прежде всего, их функциями.

Требования к внешнему виду изделия и его форме формулируются на основании разного рода анализов: эстетических (выбор формы, соответствующей определенному стилю), эргономических (удобства обращения с изделием при его эксплуатации, хранении, транспортировке), технологических (выбор типовых конструкций).

В триаде «функциональные свойства – технологические свойства – эстетические свойства» роль формы изделия особенно важна в функциональных и технологических свойствах изделия. Выбирая керамический материал, мы выбираем цвет, фактуру и технологические особенности производства, в частности, уровень себестоимости и возможности декорирования. Выбирая форму – во многом определяем функциональные свойства, а также способ формования и подготовки массы.

Оценка эстетических свойств материала и изделия во многом субъективны: в различные времена предпочтительные вкусы общества, зависящие от многих социально-политических факторов, формировали преобладающую стилистику с активными или, наоборот стабильными формами материальных объектов и своей цветовой гаммой. В эпоху расцвета промышленной революции вопросы художественного вкуса потребителей продукции массового производства были в центре внимания таких искусствоведов как Г. Земпер, Д. Рескин, У. Моррис, которые, с одной стороны, были обеспокоены явным конфликтом между коммерческими интересами промышленности и эстетическими вкусами общества, с другой – предлагали пути решения этого конфликта во многом послужившие отправной точкой развития школ промышленного дизайна [3, С. 36-43].

Необходимо помнить, что развитые формы промышленного дизайна характерны лишь для передовых стран современной цивилизации, которая далека от решения более насущных проблем более бедных стран. Так, в докладе ООН «Цели развития тысячелетия» за 2013 г. цель «Обеспечение экологической устойчивости» (главная задача для современного экологического дизайна) стоит лишь на 7 месте, уступая первенство целям ликвидации нищеты и голода, сокращению детской смертности и т. д. [17]. Однако, с успешным решением первоочередных задач, задачи технологического развития постепенно выходят на первые места. Так, в своем выступлении на мастер-классе студии Pentagon Design (Финляндия) [18] 17 апреля 2013 г. в рамках деловой программы выставки «Мосбилд-2013» утверждалось, что за время, прошедшее с 1961 г., большинство стран мира приблизилось по своему уровню развития к странам, для которых определены общие задачи в области дизайна, в том числе, связанные с безопасностью, экологией и повышением среднего возраста. Безопасность жизни непосредственно связана и с угрозами, возникающими из-за накопления неуполученных отходов, поэтому дизайнер обязан рассматривать материалы и конструкции из них с точки зрения успешной переработки после вывода из эксплуатации.

Развитие промышленного дизайна сопряжено с развитием науки и технологий, расширение технологических возможностей приводит к расширению потребностей и, соответственно, функций вещей (предметов), появлению новых, ранее не востребуемых или неосознанных. Согласно иерархии или «пирамиде» потребностей, предложенной А. Маслоу [19], появление новых потребностей человека происходит по мере удовлетворения потребностей, стоящих на более низком уровне «пирамиды». Удовлетворение потребностей физиологического уровня и уровня безопасности открывает дорогу к потребностям любви, привязанности и возникает устойчивая мотивация к интенсификации обмена информацией.

Информационные технологии, развитие которых произошло в последние 50 лет и носило взрывной характер, резко изменили нашу жизнь, породив новые потребности и рынки невиданных до той поры изделий и услуг. Гораздо более старые примеры влияния функций на форму вещей и изменение потребностей общества в эпоху освоения электрической энергии в Великобритании ярко описаны в [20]. Форма ставших для нас привычными электрических бытовых приборов, появившихся из-за избытка мощности первых электростанций, стремительно менялась в соответствии со своеобразным «воспитанием» потребителя – от чисто функциональной или имитирующей привычные вещи (например, дровяную печь) до новой, ни с чем несравнимой, истинно «дизайнерской».

Форма предметов чутко реагировала на смену приоритетов общества. К концу третьего периода развития промышленного дизайна появилось многочисленные разработки полифункциональных материалов и изделий. Так, даже традиционная керамическая плитка, разнообразие которой обычно придает декор, постоянно расширяет диапазон своих свойств, приобретая специальные антибактерицидные свойства [21], сочетаясь с кремниевыми энергопроизводящими покрытиями [22]. При этом меняются требования к формату и форме плиток. Кладка из керамического кирпича помимо конструкционных и теплоизоляционных свойств может выступать в роли тепловых экранов [23].

Очевидно, что в создании нового качества жизни современного человеческого общества дизайнер активно сотрудничает с учеными, технологами, экономистами и представителями других профессий. На современном этапе развития промышленного дизайна старый принцип «дизайн для производства» (design for manufacturing – DFM) меняется на новый – «производство для дизайна» (manufacturing for design – MFD) цит. по [6, С. 25], что влечет за собой изменения в формах такого сотрудничества.

Взаимное влияние технологии и дизайна на примере керамических изделий будет рассмотрено ниже.

Чаще всего, говоря о дизайне изделия, понимают его внешний вид, гармонизирующий форму и декор изделия и обеспечивающий высокую степень функциональности. От изделия, по-прежнему, ждут сочетания «пользы с красотой», хотя мода (трактуемая Вольтером, как прихоть [24]), образ жизни и принадлежность к определенной группе людей (так называемые символические потребительские свойства товара [25]) допускают значительные отступления от этого принципа.

Под формой предмета (изделия) понимают его внешний вид или взаимное расположение контуров предмета. С философской точки зрения форма – частное проявление сути и как одна сущность может проявляться в различных формах, так один и тот же материал может принимать в изделиях различные формы. Однако, само изделие уже являет собой индивидуальное сочетание многих качеств, что изменяет или уточняет суть. Так, один из важнейших критериев оценки изделия человеком с позиций как философа, так и потребителя – соответствие формы изделия ее сути – функциональным (назначению) и эстетическим качествам (ожиданиям).

Форма изделия наряду с цветом и фактурой определяет его восприятие человеком, ставит изделие в один ряд с имеющимися в памяти образцами или, наоборот, будоражит воображение, вызывая интерес, непонимание или активное неприятие. В ассоциативном ряду форм большое место занимают гармоничные формы изделий, напоминающие природные образцы. Подобные формы

могут быть копиями природных объектов или их творческим переосмыслением, например, построенным на принципах реализованного природой «золотого сечения» [26]. Восприятие изделий таких форм не вызывает отторжения и весьма часто они становятся классическими образцами. То же относится к текстуре и цвету – их сочетания в искусственных предметах, имеющие природные аналоги, поддерживают положительные и привычные нам образы.

Искусствоведы для облегчения понимания принципов формообразования в искусстве разных эпох и народов нередко рассматривают преобладание той или иной геометрической формы (куб для Древнего Египта, цилиндр для Древней Месопотамии, «набухающая форма – для Древней Индии), как некую данность, по их мнению, не являющуюся научным определением [27].

Однако, более широко необходимость или желательность той или иной формы произведения, создающейся в процессе творчества (так называемой «художественной формы»), можно рассматривать на основе теории «архетипов», уже существующих и предшествующих любой форме.

Так, в архитектурных формах различных стилей и эпох явно прослеживается обращение к архетипичным композиционным символам (крест, квадрат, спираль и т. д.), которые можно толковать по А. Лосеву, как структурные типы, порождающие принципы формообразования [28]. При этом симметрию формы, положенной в основу архитектурного объекта, можно рассматривать, как структурный признак архетипа. К. Юнг и О. Шпенглер рассматривали архетипы, как формальные схемы – символы, заложенные в бессознательном и проявляемые сознательном опыте – произведениях культуры. Подробнее симметрия материальных форм на основе природных и искусственных объектов рассмотрена в разделе 2.

Исследования архетипов, объединяющих культурные феномены и архитектуру, приведены в трудах Л. Б. Фрейверт [29, 30].

В работе [11, С. 128-129] сформулированы основные требования к форме изделия, из них в числе первых четырех – различные виды упорядоченности (вписываемость в пространстве, визуальная, тактильная, акустическая), что на

деле приближает разрабатываемую форму изделия к потребителю. Технология как средство формообразования занимает последнее – 8-е место.

Непривычные очертания предметов (так же как текстура и цвет) заставляют искать объяснение новизне, которая может быть оправдана как приданием им новых, до того неизвестных, функций, так и просто модой.

Используя текстуру и цвет, можно оказывать сильное влияние на восприятие формы, не меняя ее по сути. Влияние текстуры и цвета на форму активно используют дизайнеры с художественными или чисто техническими целями [8, С. 132-144, 31].

В современной индустрии форма становится знаковой доминантой, определяющей уровень и качество изделия. Формообразование в дизайне определяется как организация формы объекта в соответствии с его функцией, материалом и способом изготовления, воплощающей замысел дизайнера. Проблема формообразования в дизайне понимается как проблема проявления в морфологии объектов совокупности объективных формообразующих факторов (культурно-исторических, технологических, эстетических, эксплуатационных и т. д.) [32]. В последнее время все чаще проявляется стремление к использованию в формообразовании инновационных материалов и технологий, дающих преимущества перед аналогами. Увеличение количества функций одного изделия (полифункциональность), использование цифровых технологий при его проектировании (расчет и оптимизация параметров материала и модели, типологическая оптимизация), производстве (аддитивные технологии) и эксплуатации (расчет поведения и использование приборов контроля) позволяет существенно снизить издержки и поднять качество изделий на новый уровень.

Керамические материалы, как наиболее естественные из всех искусственных (первые искусственные, получаемые в основном из природного сырья), по праву занимают значительное место в предметной среде человека. Наиболее древнее обнаруженное керамическое изделие «Вестоничская Венера» было изготовлено более 25 тыс. лет назад [33]. Широкое распространение керамики во все времена существования человечества объясняется тем, что кларки (относи-

тельное содержание) кислорода, кремния и алюминия в земной коре значительно превышают кларки других химических элементов и поэтому алюмосиликаты, как основа химического состава традиционной керамики, остаются основным доступным нам сырьем.

Твердость, прочность керамики, ее термическая, химическая и биологическая стойкость определяют место керамических изделий в «круговороте предметной среды» вокруг человека (рис. 1.1). «Вращение» предметов вокруг человека подчинено определенным закономерностям. Архитектурные стили в последние 1000 лет менялись в среднем раз в 25-100 лет [34] интерьер обновлялся в 10-25 лет, предметы же обихода покупались и выходили из обращения быстрее. Бурный рост общества потребления в последние 100 лет значительно ускорил этот «круговорот», скорость которого характеризуется длительностью жизненного цикла предметов – от их замысла, до выхода из обращения.



Рисунок 1.1 – «Круговорот предметной среды» вокруг человека

Современные технологии производства строительных материалов и строительства создали возможности быстрого возведения зданий, архитектура которых часто является лишь демонстрацией таких возможностей. Вероятно, в том числе и в связи с этим эпоха «чистых» стилей ушла безвозвратно, уступив место эклектизму и цитированию. Ремонты в интерьерах зданий проходят не

реже 10-15 лет, мода на различные аксессуары меняется через год. Возникают целые отрасли экономики, обслуживающие неостребованные ранее потребности человека, самый яркий пример тому – информационные технологии.

Сейчас предметы, быстро выходящие из оборота по причине смены стилей или утраты функций, изготавливаются из дешевых материалов, прежде всего пластмасс. В последнее время, в связи с изменением отношения человека к окружающей среде и развитием экодизайна, для таких маложивущих или одноразовых материалов используют композиции природных полимеров бумагу продукты переработки, (древесины).

Керамике остается «почетное» место материала, обеспечивающего надежность долговременных строительных конструкций, высокотемпературных агрегатов, химически- и абразиво- стойких изделий. Керамические изоляторы обеспечивают устойчивость работы электрических трансформаторов, линий электропередач и электронных приборов всех видов. Все более возрастает роль проводящей и сверхпроводящей керамики. Высокая степень декоративности в сочетании с термической и химической стойкостью определила пока незаменимое место керамики в посуде и сантехнике. Керамика используется во всех «сферах» предметного мира человека, но более всего – в архитектуре и интерьере.

Результаты исследований, посвященные развитию материаловедения, показывают, что керамические материалы всегда занимали значительное место в предметной среде человека. Так, в работе [35] приводятся данные об изменении доли керамики (включая стекло и цемент) в общем объеме используемых материалов: с 50 % от всех используемых материалов 10 000 лет назад, до 10 % к 1960 г. (в основном за счет возрастания доли металлов) и планируемый рост до 25 % к 2050 г. (рис. 1.2). В той же работе приводится анализ использования в последние 200 лет основных конструкционных материалов: пик потребления дерева пришелся на 1886 г., металла – на 1970. Ожидается, что пик потребления пластик пройдет в 2050 г., далее прогнозируется рост использования керамики, стекла и новых композиционных материалов на основе керамики.

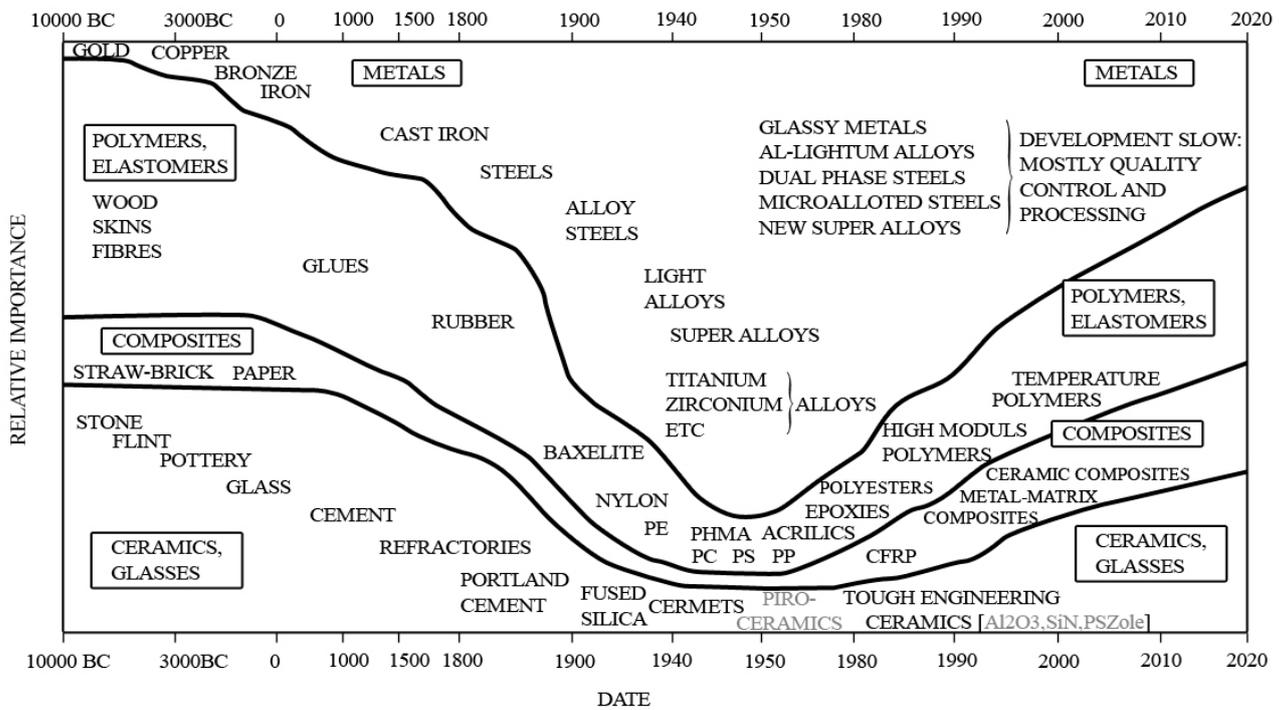


Рисунок 1.2 – Изменение соотношения (относительная важность) между различными материалами, используемыми человеком и прогнозные значения соотношения [35, С. 3-4]

По сути дела, речь идет о возрождении «каменного века» с использованием в качестве основных материалов минерального сырья, в избытке представленного на нашей планете, «века», который длился более 1 млн. лет [36]. В отличие от прежних времен, когда керамику применяли, прежде всего, как химически и термически стойкий материал для посуды и как долговечный конструкционный материал для строительства, использование керамических материалов в современном мире проходит в русле развития новых технологий. В этой связи интерес представляет прогноз разработок новых материалов, приведенный в работе [6, С. 61]. На смену прогрессивных в 1960-х годах ситаллов, стеклопластиков, акрила, жаропрочных сплавов в 1980-е пришли армированные и высокомолекулярные полимеры, полиэстер, металлокерамика, эпоксидные смолы. Сейчас (в 2000-2010-х) их сменили композиты, цифровые материалы для быстрого прототипирования, порошковые материалы и органические полупроводники. В недалеком будущем (в 2020-х гг.) станут массово использоваться моделируемые умные материалы. Под умными материалами сейчас понимают по-

лифункциональные изделия, реагирующие на внешние изменение и сигналы потребителя изменением своих свойств. В основном это сочетание композиционных материалов с особыми свойствами (например, материалы, обладающие «эффектом памяти», интеллектуальные материалы и покрытия и т. д. [37]) с управляющими информационными чипами.

Цивилизация, построенная за последние 2 тысячи лет, широко использовала керамические материалы в архитектуре, быту, технике. Их формы менялись в соответствии с развитием техники и технологий.

Объектом настоящего исследования являются продукты промышленного дизайна – керамические изделия массового производства – утилитарные объекты дизайна, внешний вид которых диктуется функциональным назначением. Для исследования формообразования керамических изделий можно использовать термин «предметно-функциональная структура», под которым понимается объект материального мира, призванный удовлетворить потребности человека.

Исторический анализ изменения форм показывает, что вначале предметы возникали в качестве простейших конструкций в ответ на появление утилитарных потребностей человека, затем, по мере развития и усложнения, преобразовались в формы, имеющие эстетическую ценность.

Рассматривая своеобразные «срезы» предметной среды с точки зрения преимущественно распространенных форм различных объектов, можно руководствоваться единым критерием их оценки. Известно, что, если исследовать форму предмета с точки зрения дизайна, то такими критериями будет сочетание функциональных и эстетических свойств. В [2, С. 324] справедливо указано: «При создании станков, приборов, машин и оборудования производственного назначения преобладают функционально-технические требования. Для бытовых вещей, оборудования жилых и общественных интерьеров первоочередными (при несомненной функциональности и удобстве в эксплуатации) нередко становятся требования эстетического совершенства, художественно-образной выразительности». Так как функции рассматриваемых объектов (керамических изделий различного, в том числе технического назначения) весьма различны,

единая оценка их функциональности затруднительна. В качестве критерия можно было бы предложить универсальный критерий эстетичности, однако, как писал Ф. Вольтер: «Прекрасное, которое поражает лишь наши внешние чувства, воображение и то, что именуется умом, подчас относительно» [24, С. 216]. Он же далее дает универсальный ключ к пониманию прекрасного: «Наилучший вкус в любом виде искусства проявляется в возможно более верном подражании природе, исполненном силы и грации» [24, С. 270]. Таким образом, формы рассматриваемых в работе объектов – керамических изделий, в зависимости от своих функций (бытового, строительного или технического назначения) в той или иной степени должны соответствовать принятым в данное время эстетическим представлениям. Даже изделия строительного и технического назначения являются деталями более крупных архитектурных или технических объектов (зданий, установок, приборов), которые, в свою очередь, можно рассматривать как объекты архитектурного или промышленного дизайна, с присущей им эстетикой.

Морфология объектов материальной культуры наследует признаки природного формообразования, на что указывают исследования В. Б. Мириманова [38]. Организация формы в предметной среде выражает себя посредством элементов, прототип которых можно увидеть в кристаллических (неорганических) и пластичных (органических) творениях природы.

Природные формы можно разделить на формы объектов неорганической природы (минералы) и формы объектов органического мира (флора и фауна). Первым присущи относительно простые симметричные, граненые, кристаллические формы, различаемые так называемыми типами симметрий и сингониями, вторым – пластичные, мягкие формы. Анализируя фигуративные наскальные изображения, В. Б. Мириманов делает вывод, что они позволяют получить хотя и скудные, но объективные показатели, из которых складывается морфология стиля [38, С. 15]. Он выделяет два типа геометризации изображений: прямолинейный и криволинейный. Таким образом, на основании этих исследований, в

предметной среде также можно выделить два основных морфологических основания, определяющих форму предметно-функциональных структур:

- кристалломорфизм, для которого характерны жесткость, излом, «рубленость»;
- биоморфизм, который характеризуется мягкостью, изгибами, пластичностью.

Внешние формы объектов как природного, так и искусственного происхождения продиктованы строением материала, из которого они состоят, и их функцией. Преобладание пластичности в форме объектов живой природы связано с их клеточным строением. Каждая из живых клеток – емкость, имеющая для минимизации энергозатрат минимальную внешнюю поверхность. Для приобретения прочности живым организмам требуется более упорядоченное строение твердого вещества, которое создает жесткий скелет (каркас) или оболочку. Функцию каркаса для растений обеспечивают волокна полисахаридов целлюлозы, для насекомых – хитин. Эти вещества создают жесткие структуры, придающие твердым тканям и покровам кристалломорфный вид. Живые организмы используют также неорганические вещества, обладающие более прочными, обычно ионно-ковалентными, связями и приобретающие кристалломорфную форму. Значительная часть насекомых защищает мягкие ткани хитиновыми панцирями, зачастую имеющие кажущийся искусственным механистичный внешний облик. Растения защищают плоды жесткими оболочками, содержащими повышенное содержание атомов элементов, присущих неорганическим соединениям. Так, в оболочке растений наиболее древнего происхождения, например, риса, повышено содержание кремния [39].

Связи минералов земной коры с живым веществом (растениями, микроорганизмами, насекомыми, животными) посвятил свои фундаментальные работы В. И. Вернадский [40]. Безусловно, существует сложная связь между кристалломорфизмом минералов и органоморфными формами живой материи. С этой точки зрения глинистые минералы, из которых производилась и производится значительная часть керамических изделий, представляют собой особый

случай: с одной стороны, это кристаллические структуры с ионно-ковалентным характером химической связи, с другой это (силикаты и, очевидно, алюмосиликаты) «самые сложные неорганические структуры» [41], которые образуют практически полимерные «бесконечные» молекулярные цепочки. В образовании глинистых пород (по В. И. Вернадскому – «биокосного вещества») непосредственное участие принимали вода и микроорганизмы. Высокодисперсные минеральные частицы таких пород имеют высокое сродство к воде, образуют с ней пластичные пасты, позволяющие легко формовать и закреплять обжигом изделия пластичных органоморфных форм.

История развития формообразования предметной среды – история развития двух внешне противоположных стилей, присутствующих в природе в виде форм живой и неживой материи. И для той, и для иной формы материи присуще использование формообразующих приемов своей противоположности. Так, в мире минералов и геологических пород часто встречаются биоморфные округлые формы отдельных образований (например, скрытокристаллические минералы, типа агата), в живом мире – кристалломорфные панцири и части тел насекомых и т. д.). В первом случае в неорганические соединения образуют аморфную или псевдоаморфную структуру, во втором органические полимеры приобретают упорядоченное, направленное строение. Недаром К. Юнг придавал особое значение основным архетипам, как прообразам упорядоченной ценности, из которых центральное место занимал круг с вписанным в него квадратом [28, С. 128]. В этом архетипе как бы объединяются две наиболее простые формы, присущие живой и неживой материи.

Речь идет о своеобразной внутренней борьбе стабильности (устойчивости) с изменчивостью форм, «борьбе» порядка (симметрии) с беспорядком (асимметрией). Симметрия наиболее четко проявляется в мире минералов [42], для живых организмов характерны особые ее виды – диссимметрия (в частности так называемая хиральная симметрия) [43]. Понижение симметрии (диссимметризация) в процессах, сопровождающаяся увеличением энтропии, рассматривается как основной процесс, протекающий в нашей природе [44].

Искусственные объекты, произведенные руками человека, принимают форму, определяющуюся как замыслом, так и возможностями материала, формообразование которого, в свою очередь, зависит от его химической структуры. Рассмотрим формы керамических изделий, представляющих «ближний» и «дальний» круг (рис. 1.1) предметной среды.

Из изделий «ближнего предметного круга» можно выделить посуду, предназначенную для хранения, приготовления и употребления пищи. Прежде всего, это сосуды – оболочковые формы. Сосуды издревле изготавливали из плодов растений, дерева, позже – из керамики, металла, стекла.

В основе полых посуды (ваз, горшков, кувшинов и др.) лежит форма шара – формы с максимально возможным объемом. Эта наиболее энергосберегающая форма с минимальной площадью поверхности, характерна для органической материи. Форма шара многократно повторяется в живых организмах – от одноклеточных бактерий, до крупных растений и животных.

Наиболее естественны в форме древней посуды подражание растениям и некоторым животным (рис. 1.3), в том числе зооморфный стиль. То же можно было видеть на примере традиционных китайских ваз (рис. 1.4).



Рисунок 1.3 – Посуда, форма которой воспроизводит:  
а – форму растения (тыкву), б – форму животного (птицы).

Греция, IV и I в. до н. э. Музей г. Афины

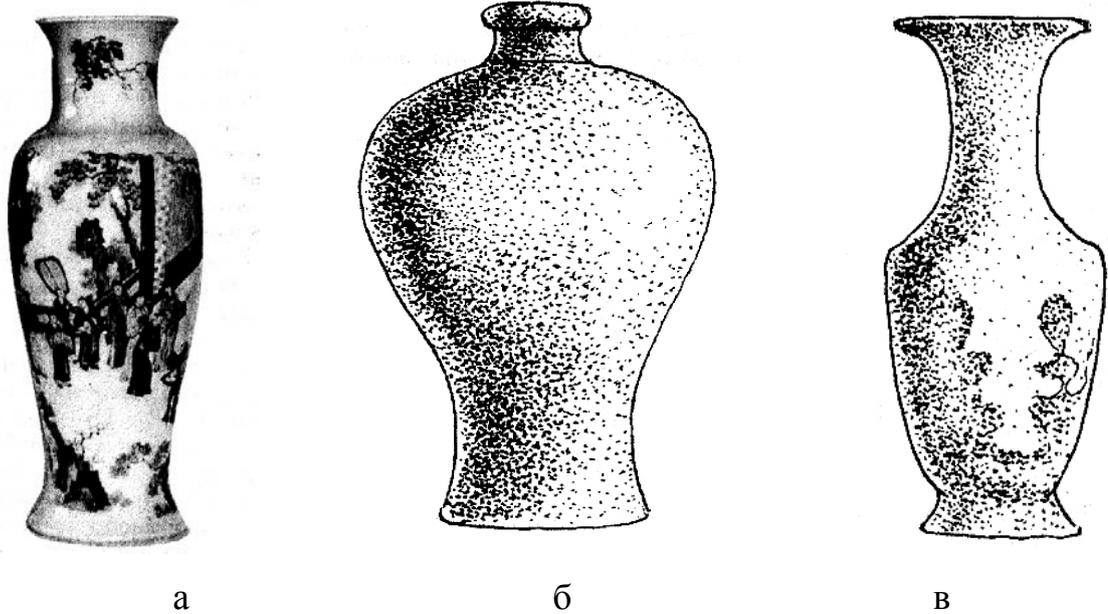


Рисунок 1.4 – Китайские вазы: а – «рыбий хвост», б – сливовая ваза, в – «хвост феникса». Рисунки из книги [45]

Керамическая посуда в доисторическое время, в цивилизациях Древних Египта, Греции и Рима была неизменным атрибутом как домов горожан, так и жителя сельской местности. Керамические вазы, под которыми в современности понимают сосуды для украшения интерьера и поэтому отводят им весьма ограниченную роль, в Древних Греции и Риме были распространенной полой посудой, которую использовали для хранения, приготовления и употребления пищи, а также в многочисленных религиозных ритуалах.

Разнообразие форм и декора греческих и римских ваз VII в. до н. э. – III в. н. э. до сих пор служит источником вдохновения и подражания для дизайнеров и декораторов, разрабатывающих посуду, светильники, фонтаны и т. п.. Искусствоведы, различая школы гончаров и вазописцев, сходятся во мнениях, что значительная часть изготавливаемых ваз сочетала в себе высокие функциональные свойства, отвечая своей, иногда весьма узкой специализации, с требуемой стилистикой. По форме ваз можно было судить об их назначении – греческие узкогорлые алабастры и амфоры служили для хранения продуктов и ароматов, широкогорлые кратеры – для смешивания вина и воды, устойчивые двуручные гидрии – для транспортировки продуктов и т. д. Керамическая посу-

да из фаянса, фарфора и каменной керамики украшала столы Европы, Китая и Японии на протяжении долгих веков, не уступая металлу даже в самых роскошных домах [46, 47].

Обширный ассортимент керамической посуды, столь распространенной во времена Древней Греции и Рима, исчез из обихода с упадком Римской империи и частично возродился в качестве ваз, украшавших интерьеры во времена господства барокко и особенно ампира в Европе XVII-XIX вв., когда начало раскопок Помпей (1748 г.) и поход Наполеона в Египет (1798-1801 гг.) пробудили острый интерес к искусству древних народов.

В периоды преобладания классических стилей (конец XVIII первая треть XIX вв.) преимущественными формами сосудов были яйцевидные формы, подобные античным вазам, с развитием промышленности были востребованы сосуды на основе простых геометрических форм [48].

И в современном нам мире керамическая посуда непременно присутствует на кухне и обеденном столе.

Наиболее древнее керамическое изделие строительного назначения («дальнего предметного круга») – кирпич издревле имеет кристалломорфную форму. Это связано с назначением кирпича, как модульного строительного изделия, – из которого способом последовательного наращивания строят стены зданий, так же как из минерального вещества «строится» монокристалл. В некоторых культурах можно было проследить относительно четкий переход к кирпичному строительству, приводящему к изменению плана здания. Например, переход в этрусской архитектуре VIII в. до н. э. от округлых, органоморфной формы, в плане сооружений из обмазанных глиной плетеных стен к прямоугольным в плане зданиям из кирпича сырца [49]. Четкие грани кирпича дают возможность создать плотную прочную кладку, тогда как ее строительство из камней всегда было сопряжено со значительными затратами времени на их обтесывание и не приводило к такому качеству. Строительство стен из кирпича сырца значительно ускоряло строительство, но только керамический кирпич позволил создавать такие же прочные здания, как из камня (рис. 1.5).



а



б

Рисунок 1.5 – Примеры сохранившихся стен древних сооружений:

а – каменная кладка Кносского дворца, Греция, о. Крит, 18 в. до н. э.;

б – кладка из камней и керамических кирпичей римской эпохи.

Хорватия, I в. н. э.

Для кирпичей разных эпох были характерна одна и та же форма – пластины или параллелепипеда, менялись только их габариты.

За время своего существования кирпичное производство прошло путь от выпуска массивного полнотелого кирпича, напоминающего каменные блоки, до максимально облегченных пустотелых поризованных блоков, стенки которых содержат большое количество мелких закрытых пор [50].

Размеры кирпичей (камней) в различных странах и сейчас отличаются друг от друга, несмотря на явную стандартизацию, свойственную эпохе глобализма, для которой место размещения производства является лишь фактором экономики. На протяжении нескольких тысяч лет размеры и пропорции кирпичей также значительно менялись (табл. 1.1) [51-56].

На рис. 1.6 показаны форматы древних и современных кирпичей, пропорции которых буквально повторяют друг друга. Очевидно, в течение тысячелетий строители выработали наиболее удобные для ручной кладки форматы.

Таблица 1.1 – Размеры и пропорций кирпичей за последние 3000 лет

Кирпич	Дата производства	Примерные размеры, мм			Соотношение сторон
		Длина (постель)	Ширина (ложок)	Высота (тычок)	
Египетский	2 тыс. до н. э.	280	150	70	4:2:1
		360	180	115	3,1:1,6:1
		380	140	110	3,5:1,3:1
		280-320	150-160	70-150	2,7:1,4:1
		350	210	60-70	5,4:3,2:1
Ассирийский	VII в. до н. э.	300	120	10	30:12:1
Китайский	I в. до н. э. - I в. н. э.	400	200	100	4:2:1
		250	120	60	4:2:1
Римский	с I в. до н. э.	400	280 (400)	40	10:7 (10):1
		450	300	10	45:30 (45):1
		440	450	140	3:2:1
		470	290	50	9,4:6,4:1
		590	320	60	9,8:9,8:1
		550	550	40	9,8:5,3:1
					13,8:13,8:1
Среднеазиатский	IX в.	250	250	40	6,3:6,3:1
Византийский (плинфа)	X-XIII вв.	400	300	30	13,3:10:1
		340	270	40	8,5:6,8:1
		355	355	51	7:7:1
Романский	IX-XIV вв.	235	38	7	33,6:5,4:1
Готический	XIII-XVI вв.	280	150	90	3,1:1,7:1
		300	140	100	3:1,4:1
Русский	XI в. XII в. XIII в. X в. XI в. XI в. XII в. XIII в.	380	310	50	7,6:6,2:1
		360	260	40	9:6,5:1
		290	210	25	11,6:8,4:1
		300	290	30	10:9,7:1
		325	250	33	9,8:7,6:1
		310	260	38	8,2:6,8:1
		320	250	45	7,1:5,6:1
		330	260	53	6,2:4,9:1
Российский	XV в.   XVII в.  XVIII в. XIX в.	289	111	67	4,3:1,7:1
		300	200	60	5:3,3:1
		260-280	155-170	55	4,9:2,9:1
		280	120	65	4,3:1,8:1
		290	150	50	5,8:3:1
		300-280	145-140	80-75	3,8:1,9:1
		280	140	70	4:2:1
267	133	66	4:2:1		
Российский (СССР) казенный	До 1928 г.	270	13	65	4,2:2:1
СССР, одинарный	После 1928 г.	250	120	65	3,8:1,8:1
Российский, 1 НФ «Евро» 0,7 НФ Камень 14,9 НФ	По настоящее время	250	120	65	3,8:1,8:1
		250	85	65	3,8:1,3:1
		260	510	219	1,2:2,3:1

Факторы, их определяющие и влияющие на их изменение, можно перечислить:

- архитектура строящегося здания (назначение, толщина стен, этажность и т. д.);
- климат места строительства;
- удобство кладки (масса, габариты, форма);
- особенности сырья и способ производства (формование, сушка, обжиг).

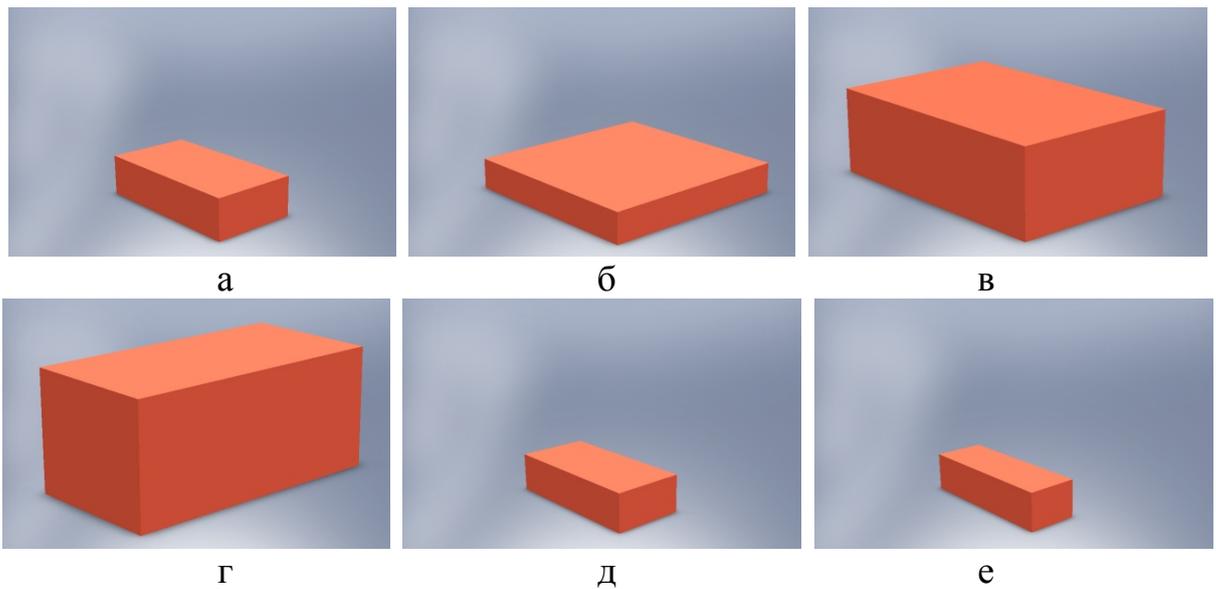


Рисунок 1.6 – Условные изображения форматов кирпичей разных эпох.

а, б, в – кирпичи древности (Египет, Рим);

г, д, е – современные кирпичи (Российская Федерация)

В отличие от посуды, размеры которой зависели от эргономических показателей (размеров пальцев, кистей), этнических и исторических особенностей и мало изменились, размеры кирпичей в последние 30 лет претерпели существенные изменения. Произошедшие изменения связаны с изменениями в технологии строительства, разработкой новых материалов и строительных норм. Увеличение габаритов кирпичей до керамических камней, многократно (до 14,9 НФ) превосходящих размеры рядового кирпича, и изменение их пропорций связано с ужесточением требований к теплоизоляции (энергоэффективности) зданий и разработкой высокопористой керамики. Увеличение размеров

строительных блоков позволяет сократить время постройки стен и в ближайшей перспективе перейти к роботизированной сборке.

Другая тенденция изменения формы и размеров строительных кирпичей также связана с ресурсосбережением – это использование кирпича в качестве не конструкционного, а облицовочного материала. Полнотелый облицовочный кирпич, который должен иметь выраженные эстетические свойства (цвет и фактуру) и производство которого, как правило, требует повышенных температур обжига и использования дорогостоящих пигментов, по своей форме все больше приближается к утолщенной облицовочной плитке.

Подобные изменения произошли с керамической плиткой. В отличие от кирпича облицовочная плитка всегда выполняла декоративную роль. Наиболее древние керамические плитки насчитывают возраст более 4,5 тыс. лет [57]. В древние времена (VIII-IV вв. до н. э. Ассирия, затем Персия) для декора использовали глазурованные с одной стороны кирпичи, создавая из них впечатляющие цветные панно, воспроизведенные рисунки которых вошли во все учебники по истории древнего мира [58]. Позже (с IX в.) стали применять плоские декорированные изразцы, производством которых прославились Персия, Турция, страны Магриба, арабская Испания, Португалия и страны Средней Азии. Керамическая облицовка незаменима для жаркого климата, защищая прохладу помещения жарким днем и сохраняя тепло для прохладной ночи. Размеры и форма плиток изменялись в широких пределах. Это могли быть отдельные фигурные одноцветные плитки, выпиленные для сборки майоликовой мозаики [58, С. 90-106], полихромные плитки в виде восьмиконечных звезд или крестообразные [59], но чаще всего – плитки прямоугольной формы, облицовка которыми не представляла особой сложности. В Китае XI в. при династии Сун стали применять плотнопеченные фарфоровые плитки, послужившие прообразом современного керамогранита [60].

Европейские керамические плитки, в отличие от своих восточных собратьев, служили в основном украшением печей (печные и кафельные изразцы), полов и реже – использовались для облицовки стен. Особенно прослави-

лись немецкие метлахские плитки из каменной керамики, служившие прочным покрытием полов, и печные кафельные плитки дельфтского фаянса. Печные изразцы, в отличие от плиток для облицовки стен и пола, имели на тыльной стороне «румпу» – бортик с отверстиями для крепления к печному кирпичу.

Размеры плиток обычно не превышали 300 мм, толщина – 50 мм. С совершенствованием технологии и переходом к автоматизированным способам производства во второй половине XX в., толщина плиток уменьшилась до 5 мм. В 2007 г. в Италии – ведущей стране-производителе керамической плитки всего 5 % объема всего производства плиток составляли плитки форматом 600x600 и 900x900 мм. На новом витке развития технологии начали наращивать выпуск плиток с размерами более 1 м (до формата 1600x4800) и толщиной от 3 мм [61].

Керамическая плитка, в различные эпохи находящая применение в основном в интерьерах зданий и облицовке печей, в последние 50 лет благодаря успехом технологии вышла на ведущее место как облицовочный материал не только для интерьера, но для фасадов зданий [62].

Современная архитектура повсеместно использует широкие функциональные и декоративные возможности плитки, технологии, в свою очередь, наделяют поверхность плитки все новыми и новыми функциями, расширяя области применения (см. с. 17).

Как и кирпич, керамическая плитка за века не изменила свою форму, а существенное изменение ее размеров связано с расширившимися требованиями архитектуры (дизайна), возможностями строительства и технологии. Иллюстрацией перехода к новому этапу развития промышленного дизайна, олицетворяющему индивидуальный подход к потребителю («производство для дизайна») может служить создание в рамках производства плитки роботизированных логистических центров, в которых реализуется финальная отделка полуфабрикатов под конкретный заказ. В сочетании с гибкими производственными линиями такая система позволяет выбирать форматы, толщину и декор керамических плит без изготовления и складирования готовых изделий в ожидании продаж [63].

Итак, формы полых посуды и строительных модульных изделий (кирпича и плитки), как изделий, относящихся к утилитарным, в которых форма по-прежнему «следует функции», практически не менялись в течение многих веков, но изменения господствующего стиля отражались на декоре предметов, как на наиболее активной композиционной части. И кирпичи, и плитки использовали в строительстве зданий во времена барокко, с преобладанием кривых линий, и во времена историзма, с его прямыми и ясными линиями, но черты стиля выражались в архитектуре зданий или в декоре помещений, а не в форме конструктивных и облицовочных элементов.

Архетипы, как типовые архитектурные решения на основе симметрии, роднят сооружения разных эпох [28, С. 126]. С другой стороны, в той же монографии [28, С. 134-139] рассматривается и критикуется теория А. Тинг о структурных универсалиях архитектурной композиции. Согласно этой теории в истории архитектуры выделяются 11 циклов с преобладанием в архитектурных сооружениях того или иного вида симметрии (зеркальной, вращения, винтовой, спиральной). Простые формы симметрии (зеркальная) соответствуют историческим периодам спокойствия и равновесия, тогда как сложные виды (спиральная) характеризуют периоды наивысшего напряжения духа. В целом, несмотря на повторяемость, преобладающие архетипы формируются с развитием социального и исторического самосознания индивида и показывают тенденцию к усложнению. Н. Смолина, критикуя теорию А. Тинг за определенный субъективизм, подчеркивает ее значимость в понимании природы архетипов, как культурного явления, соединяющего в себе традиции технологии строительства с вкусовыми предпочтениями [28, С. 139].

Периодизация архитектурных стилей дает возможность обобщения изменений форм предметного дизайна, в частности, в керамике. В различные периоды истории в керамических изделиях можно наблюдать преобладание «жесткого» (кристалломорфного) либо «мягкого» (органоморфного) типа организации формы керамических изделий (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Основные стилистические особенности различных периодов европейского предметного дизайна

Периоды времени	Название стиля	Архитектура	Предметы быта	Преобладающая тектоника
Геометрическая эпоха 1100-700 гг до н.э.	Греческая античность	Практически не сохранилась	Керамические изделия с геометрическим декором	Кристалломорфная
Архаическая эпоха 700-500 гг до н.э.	Греческая античность	Приземистость основательность сооружений. Дорический, далее ионический ордера Позже архитектура приобретает стройность и изящность	Вазы совершенных форм с живописным декором. Плащ из грубой ткани (пеплос).	Кристалломорфная с переходом к биоморфной
Классическая эпоха 500-330 гг. до н.э.	Греческая античность	Коринфский ордер. Закономерность, пропорциональность, симметричность, целесообразность. Смешение стилей. Появление круглых сооружений (фолосов).	Переход от грубой ткани к тонкой (хитоны), сочетание разных тканей. Геометрические фигурные декоры одежды и керамики.	Сочетание кристалломорфной и биоморфной
Эллинистическая эпоха 330-30 гг. до н.э.	Греческая античность	Совершенствование традиций классической эпохи.	Смешение восточных стилей с эллинистическими традициями	Сочетание кристалломорфной и биоморфной
30-476 гг. н.э.	Римская античность	Преодоление этрусского наследия. Модификация греческих ордеров. Практичность, представительность. Ориентация с внешнего на внутреннее пространство. Предпочтение коринфскому и композитному ордеру. Круглые сооружения.	«Греческое рококо» в одежде – сочетание торжественности с легкостью и грациозностью. Функциональные сосуды, украшаемые рельефом.	Быстрый переход от кристалломорфной к биоморфной
300-900 гг. н.э.	Раннехристианский и Византия	Купольная архитектура, использующая полусферу и полуцилиндр	Платья, лишённые изящества с геометрическими узорами. Золото в одежде и мозаики.	Более кристалломорфная, чем биоморфная

Периоды времени	Название стиля	Архитектура	Предметы быта	Преобладающая тектоника
900-1200	Романский стиль	Массивная архитектура простых геометрических форм	Простая «блочная» функциональная одежда с прямыми ссылками на античность.	Преобладание кристалломорфной.
1200-1450	Готика	Стрельчатые своды, ажурные конструкции, стремление вверх. Резной декор, скульптура на фасадах.	Изящность в одежде и легкие ткани. Символизм и мистика в декорах и деталях.	Преобладание биоморфной.
1450-1600	Ренессанс (включая маньеризм)	Обращение к античности. Симметрия, пропорциональность отдельных частей	Сочетание общих правил гармоний с индивидуальностью. Испанская строгая мода.	Сочетание кристалломорфной с биоморфной
1600-1750	Барокко (включая рококо)	Представительность, насыщенность символикой, симметрия, театральность, обилие деталей. Переход к асимметрии.	Использование ценных материалов и их имитаций. Живописность, сложность французской моды. изящность и разнообразие форм.	Борьба кристалломорфной с биоморфной с преобладанием последней
1730-1830	Классицизм (включая историзм)	Обращение к классическому периоду античности, Рациональность, симметрия.	Упрощение костюма. Стиль ампир в мебели и посуде с обращением к античным аналогам.	Преобладание кристалломорфной.
1870-1950	Модерн (включая модернизм)	Обращение к природе, отсутствие прямых линий.	Переработки восточных мотивов в посуде и костюме. Обращение к растительным формам и необычным текстурам.	Преобладание биоморфной.
С 1950	Постмодернизм	Типизация, обращение к возможностям технологии, эксперименты с формой и материалами.	Борьба функциональности с декоративностью и необычностью форм.	Преобладание кристалломорфной.

Искусствоведами принято делить этапы развития наиболее близкого нам европейского искусства на временные периоды преобладания тех или иных стилей, проявлявшихся в особенностях формообразования изготавливаемых предметов. Необходимо, однако, учитывать, что понятие стиля и его временные рамки довольно условны, внутри каждого из стилей различают различные периоды.

В таблице 1.2 приведены основные стилистические особенности, присущие предметному дизайну того или иного периода в развитии европейской цивилизации. За основу взята хронология архитектурных стилей [34, С. 1], имея в виду общепринятое мнение, что архитектура является стилеобразующим искусством. Учитывали известные характеристики форм архитектурных деталей, определяющих стиль [64].

Закономерность обобщения основных принципов формообразования и декора подтверждается прямыми заимствованиями архитектурных форм (деталей, конструкций) ремесленниками и дизайнерами мебели и даже одежды [16, С. 15, 65, 66.].

Дух эпохи, витающий в общественно-политической атмосфере стран Европы, находил предметное выражение в преобладающей манере и технике строительства общественных и культовых зданий, крепостей и замков; в приемах, используемых материалах и индивидуальном почерке ремесленников и дизайнеров мебели, предметов быта, одежды и украшений. До возникновения промышленного производства практически отсутствовала специализация труда. Многие столетия, особенно в эпоху средневековья и возрождения, выдающиеся скульпторы и художники проявляли себя как ювелиры, оружейники, архитекторы и декораторы. Именно они отвечали на веяние времени, прославляя империи и императоров, свободу мысли или торжество религии. Каждой эпохи в той или иной степени отвечали свои принципы формообразования: «кристалломорфный» стиль опирался на строгую симметрию простых форм, больше выражая статическое и основательное торжество единства, «биоморфный» стиль – многообразие и индивидуализм развивающегося мира. «Классические» строгие

и статические стили (античный, византийский, романский, классицизм) сменялись динамичными (готикой, ренессансом, модерном). Становление империй (римской, британской, наполеоновский, американской) требовало воплощения торжества имперского духа, с обращением к античным идеалам. В эпохи бурных изменений в обществе происходил пересмотр художественных идеалов, происходила сложная борьба старого с новым, в которой сильнее всего проявлялся динамичный биоморфный стиль.

Близкая нам эпоха, в которой происходило становление современного художественного стиля – эта эпоха модерна. В конце XIX и первой половине XX веков архитекторы и дизайнеры не были скованы идеологическими путами, – государства и церковь не могли и не хотели контролировать их творчество. С другой стороны, появились новые материалы, в частности железобетон, затем, пластики, которые раздвинули границы возможностей технологии. В эту эпоху зародились художественные течения, которые развиваются и сейчас. В архитектуре, автомобильном и другом предметном дизайне мы снова наблюдаем борьбу кристалломорфной тектоники с биоморфной.

Первая выражена в «хай-теке» – сугубо мужском технологическом стиле с видимым пренебрежением к старому эстетизму, с опорой на агрессивные блестящие поверхности стекла и металла и простые геометрические объемы. Вторая – бионические разновидности архитектуры и дизайна с упором на использование экологических материалов.

В [4, С. 27-29] цитируется исследование А. Н. Лаврентьева, который пришел к выводу, что в XX в. наблюдалась смена тенденции формообразования в дизайне в следующей последовательности: геометрическая, органическая, метафорическая, технонаучная. Черты всех перечисленных тенденций сохранились и в начале XXI века. Это – упрощение проектирования через создание библиотек стандартных решений (геометрическая тенденция), биоморфизм и экодизайн (органическая), приближение дизайн-проектирования к потребителю (метафорическая), создание полифункциональных «умных» материалов и изделий на основе информационных технологий (технонаучная).

Рассмотрим особенности современной архитектуры на примере применения двух традиционных архитектурных модульных элементов, выполняемых из керамики: кирпича и плитки. И один и второй элемент обладают типично кристалломорфной формы в виде параллелепипеда и прямоугольной или квадратной пластины. Из кирпича тысячами столетиями стояли здания и сооружения в подавляющем большинстве воспроизводящие его кристалломорфную форму. Облицовочный кирпич, независимо от типа и особенностей кладки, сообщал поверхности фасада рисунок структурной упорядоченности, став, в конце концов, признаком старины, востребованной сейчас в как в офисных зданиях, ссылающихся на промышленную архитектуру XIX столетия, так и в «лофт-архитектуре» современных пентхаузов [67, 68].

Другой пример является керамическая плитка, востребованная как в динамичных изменяемых фасадах зданий классических форм, так и все больше используемая в набирающей популярность современной биоморфной городской архитектуре [60-75]. На рисунках 1.7-1.10 представлены примеры современной испанской архитектуры, использующие кристалломорфные формы керамической плитки в кристалломорфных и биоморфных по форме объектах.



Рисунок 1.7 – Офисное здание с использованием биоклиматического фасада из подвижных керамических плиток. Валенсия [72]

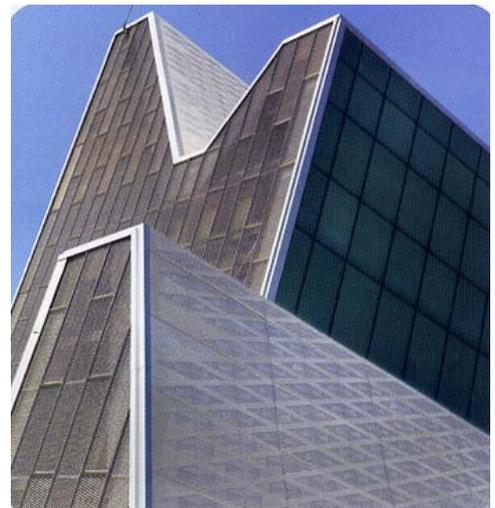


Рисунок 1.8 – Дворец конгрессов в Арагоне с покрытием из треугольных керамических плиток [73]



Рисунок 1.9 – Здание телефонной компании с биоклиматическим фасадом из керамических плиток.

Толедо [74]



Рисунок 1.10 – Набережная Поньенте, облицованная керамической плиткой.

Бенидорм [75]

Керамическая облицовка в виде плиток традиционной формы или экструдированных элементов все чаще образует композиционно «подвижные» поверхности [76-77], придавая динамику устойчивым кристалломорфным элементам.

### **Выводы по разделу 1.1:**

1. Промышленный дизайн следует определять как проектную деятельность по созданию продукта массового производства в условиях свободной конкуренции продуктов. Объектом проектирования современного продукт массового производства должен быть весь жизненный цикл продукта.

2. Современный этап развития дизайна характеризуется переходом от цифровых технологий быстрого прототипирования к этапу дизайна умных материалов и основан на стратегии устойчивого развития цивилизации с акцентом на решение экологических проблем.

3. Предметный мир человека можно представить как своеобразные сферы, скорость замены вещей в ближней сфере (предметы обихода) значительно превосходит скорость замены вещей из дальней сферы (архитектура).

4. Керамика как материал всегда занимала одно из важных мест во всех сферах предметного мира человека, благодаря своей термической, химической и биологической устойчивости.

5. В формах искусственных изделий можно видеть проявление внутренней борьбы стабильности (устойчивости) с изменчивостью форм (симметрии и асимметрии), выражающееся в органоморфизме и кристалломорфизме изделий разных исторических эпох.

6. На примере строительных керамических изделий (кирпич, плитка) и бытовых изделий (посуда) показано, что для этих утилитарных изделий форма определяется в основном функцией, а ее значительные изменения связаны с развитием ресурсосберегающих технологий, экономией материала, а в случае облицовочных материалов – увеличением габаритов.

**Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Эволюция форм и способов формования керамических изделий [Текст] // Дизайн. Материалы. Технология. 2010. № 4 (15). С. 92-96.

2. **Захаров А. И.** Форма керамических изделий: влияние технологии [Текст] // Дизайн. Теория и практика. (электронный журнал). 2011. Вып. 7. С. 59-72.

3. **Захаров А. И.** Особенности формообразования предметно-функциональных структур в дизайне [Текст] / **Захаров А. И.**, Кухта М. С. // Известия Томского политехнического университета. 2012. № 6 (321). С. 204-209.

4. **Захаров А. И.** Форма керамических изделий: философия, дизайн, технология [Текст] / **Захаров А. И.**, Кухта М. С. Томск: STT, 2015. 224 с. (сер. Дизайн и общество).

5. **Захаров А. И.** Формообразование изделия в эволюции взаимосвязи технологии и формы в промышленном дизайне [Текст] / **Захаров А. И.**, Коняшкина А. Ю., Безменов А. И. // GAUDEAMUS IGITUR. 2016. Т. № 1. С. 5-9.

## **1.2 Дизайн промышленного производства керамических изделий: совершенствование технологии керамики в области формообразования**

Промышленный дизайн является неизменным атрибутом промышленного производства, предшествуя постановке на производство изделия, задуманного, экономически обоснованного, спроектированного и сконструированного в рамках дизайн-проекта. В зависимости от сложности (комплексности) изделия упомянутые стадии разработки изделия могут быть выполнены одним или группой специалистов в условиях производства или выполняться специализированными компаниями.

«В ближайшие 10-20 лет в мире на рынке промышленного дизайна дизайн сплетается не только с конструированием, но и с инжинирингом, т. е. не заканчиваясь подбором формы производимой вещи, охватывает расчеты конструктивных и функциональных характеристик последней, а также управления ее жизненным циклом» [6, С. 61].

Жизненному циклу изделия уделяется большое внимание при преподавании дисциплины «промышленный дизайн» [3, С. 162-163, 8, С. 179].

Жизненный цикл продукции (товара) – термин, широко употребляющийся в современном маркетинге и системах качества [78], информационных технологиях [79], экологии [80] находится в центре внимания и экономистов, и дизайнеров. «Никто не покупает вещь. Все покупают удовлетворение и полезность, которые можно из нее извлечь. Следовательно, истинные экономические затраты должны включать все, что потратил потребитель, чтобы извлечь из покупки полную ценность, – в процессе техобслуживания, ремонта и т. д.» [81].

В понятие жизненный цикл (ЖЦ) продукции еще недавно было принято включать следующие стадии [82]: исследование и обоснование разработки, разработка, производство, эксплуатация (применение, хранение) и ремонт продукции.

С увеличением экологических угроз общество обеспокоилось дальнейшей судьбой созданного продукта – возможностью утилизации вещей, вышедших из употребления и понятие ЖЦ стало включать в себя утилизацию продукта [83]:

- обоснование разработки;
- разработка технического задания (ТЗ);
- проведение опытно-конструкторских работ (ОКР);
- производство и испытание;
- модернизация;
- использование (эксплуатация);
- ликвидация (с избавлением от отходов путем их утилизации и/или удаления).

При экологической оценке ЖЦ, прежде всего, учитывается влияние всех процессов, входящих в цикл – от добычи сырья для изготовления продукта до уничтожения, захоронения или утилизации [84].

С позиции дизайна ЖЦ предмета (вещи, продукта) включает в себя довольно длинную цепочку [15, С. 10-11], за каждое звено которой обычно отвечают отдельные специалисты, но дизайнер должен при проектировании в подробностях представлять поведение товара на всех стадиях жизненного цикла и оперативно реагировать на отклики со стороны маркетологов (формулировка задачи, сбыт), технологов (производство), продавцов (сбыт), потребителей (эксплуатация), экологов (захоронение или утилизация) (рис. 1.11-1.12).

Формулируя потребительские свойства товара, определяют круг материалов, из которого он может быть изготовлен, определяют форму, текстуру, цвет и декор. На стадиях проектирования и конструирования (ОКР) уточняются конструкционные особенности изделия. При постановке изделия на производство в его форму и конструкцию, могут быть внесены изменения, связанные с соображениями экономии или появлением брака. Этапы хранения, транспортировки и продажи товара могут выявить недостатки, также требующие внесения изменений в его форму.

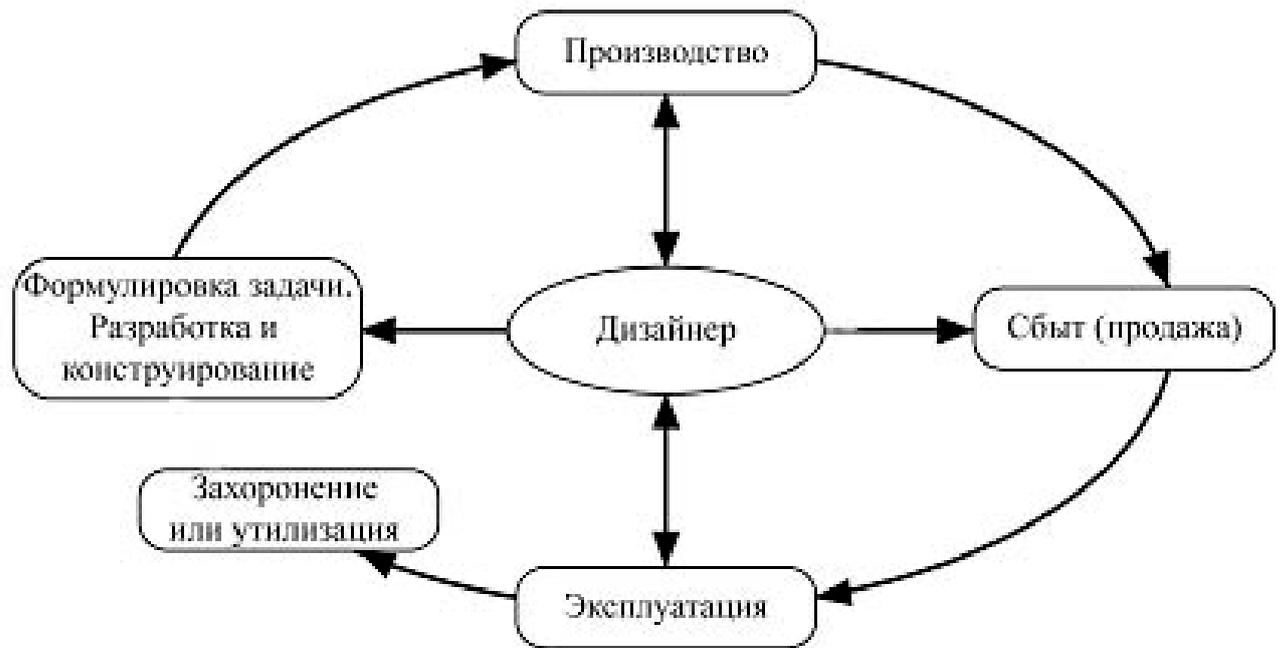


Рисунок 1.11 – Основные этапы жизненного цикла изделия и логическая связь с ними дизайнера

Недостатки, выявленные потребителем при эксплуатации изделия, служат причинами рекламаций и усиления контроля на стадии производства, а может быть и переработки дизайна изделия. Дизайнер, непосредственно отвечающий за этап проектирования в ЖЦ изделия (табл.1.3), на деле тесно связан со всеми без исключения этапами. Так использование трудно утилизируемого материала, как правило, удорожает продукт.

Таблица 1.3 – Жизненный цикл изделия, формальные зоны ответственности

Звено цикла	Кто отвечает за звено	Чем начинается звено	Чем заканчивается звено
Формулировка потребностей	Бизнесмен, маркетолог	Идеей	Техническим заданием
Проектирование	Дизайнер	Форэскизом	Проектом
Конструирование	Конструктор	Проектным заданием	Чертежом
Производство	Технолог	Производственной программой	Изделием
Торговля	Продавец	Рекламой	Покупкой
Эксплуатация	Потребитель	Установкой	Изделием, вышедшим из употребления, мусором
Утилизация	Эколог	Вывозом на свалку или утилизацией	Захоронением или использованием в качестве сырья для создания нового продукта

Сформулируем общие требования к проектируемому изделию, исходя из понятия ЖЦ. Изделие должно:

- иметь перспективу на рынке, как продукт инновации или товар, превосходящий аналоги (этап маркетинга – формулировки задачи и сбыта);
- быть технологичным (этап производства);
- иметь высокие потребительские свойства – физико-химические, функциональные, эстетические (этапы сбыта и эксплуатации);
- быть экологичным (этапы производства, эксплуатации, утилизации).

Экологичность изделия – его свойства, оказывающие воздействие на окружающую среду при производстве, эксплуатации, утилизации. В отличие от термина «технологичность», термин экологичность применяют нечасто. При проектировании изделия (зона ответственности дизайнера) необходимо учитывать все перечисленные требования, включая выбор материала, конструкции, декора, технологии производства для уменьшения негативного влияния на окружающую среду на всех стадиях ЖЦ. Недаром развитие экологических аспектов проектирования привело к возникновению нового явления – экодизайна, вписывающегося в общую концепцию устойчивого развития [85, 86].

В современном мире изделия заканчивают свой путь все реже по причине физической негодности, все больше по причине морального износа – это объясняется и новой модой, и стремлением к обновлению, и новым уровнем комфорта, которые навязываются рекламой. Жизненный цикл вещей искусственно сокращается, их необходимо все время обновлять, что требует закон возрастания потребления.

Начало промышленного производства принципиально нового изделия (прежде всего, по своим функциям) знаменует собой выход продукта инновационного дизайна на рынок и начало разработок аналогового дизайна [4, С. 67], задача которого – конкуренция с успешным продуктом.

Затраты на создание нового продукта принято относить к инновационным, доля которых высока для наукоемких отраслей промышленности. Однако, как было сказано выше, доля продуктов, в которых используются принципи-

ально новые материалы и технологии постоянно растут, наблюдается рост инновационных затрат. Вместе с этим процессом происходит процесс вывода из обращения (и производства) морально устаревших продуктов. Поэтому необходимо, как было отмечено в работе [87], ограничить временным фактором производственные затраты на инновационные продукты от того момента, когда продукция перестает быть инновационной и становится обычным массовым продуктом. Автор этой статьи использует понятие жизненного цикла товара, предложенное в 1960-е годы американским ученым Р. Верноном, согласно которому товар переживает четыре стадии – внедрения, роста, зрелости и упадка. Можно считать, что затраты на дизайнерские разработки относятся к периоду внедрения (инновационный дизайн) и роста (аналоговый дизайн), в период насыщения рынка товаром доля затрат на дизайнерские разработки падает и для удержания потребителя (покупателя) требуется выпуск товара нового качества.

Керамические изделия занимают значительное место в быту и строительстве, характеризуются большим спектром областей применения, их производство постоянно увеличивается. Хотя значительная часть выпускаемой керамики относится к традиционным материалам и является объектом аналогового дизайна, дизайнерские разработки, позволяющие успешно конкурировать на рынке, касаются не только внешнего вида, т. е. декора изделий. Цвет, текстура, покрытия, наконец, рисунок играют важную (часто ведущую) роль в дизайне строительных материалов, посуды, бытовых и иных керамических изделий. Так, возрастает доля окрашенных, текстурированных и глазурованных строительных изделий. Наряду с этим дизайн формы керамических изделий оказывает большее влияние на весь жизненный цикл изделия.

Для производства керамики характерны большие затраты энергии, связанные с сушкой и, особенно, с высокотемпературным обжигом изделий. При производстве фарфора энергетические затраты обуславливают 10-18 % общей стоимости изделий. В целом в зависимости от вида выпускаемой продукции доля энергозатрат в общей ее себестоимости колеблется от 17 до 30 % и может достигать 40 %. При производстве кирпича доля энергетических затрат колеб-

лется между 17 и 25 %, в пределе достигая 30 %. Вне зависимости от вида изделий, энергозатраты в основном (70-90 %) определяются затратами энергии на сушку и обжиг [88]. Для уменьшения производственных затрат весьма важно добиваться максимальной эффективности расхода энергии и сырья. Современные предприятия по производству керамических материалов, особенно строительных материалов, для которых затраты на сырье и обжиг весьма значительны вынуждены уделять этой проблеме все большее значение.

Производства изделий из керамики для различного применения отличаются значительными энергетическими затратами [89], отличающимися между собой (рис. 1.12).

#### Удельное энергопотребление, ГДж,т

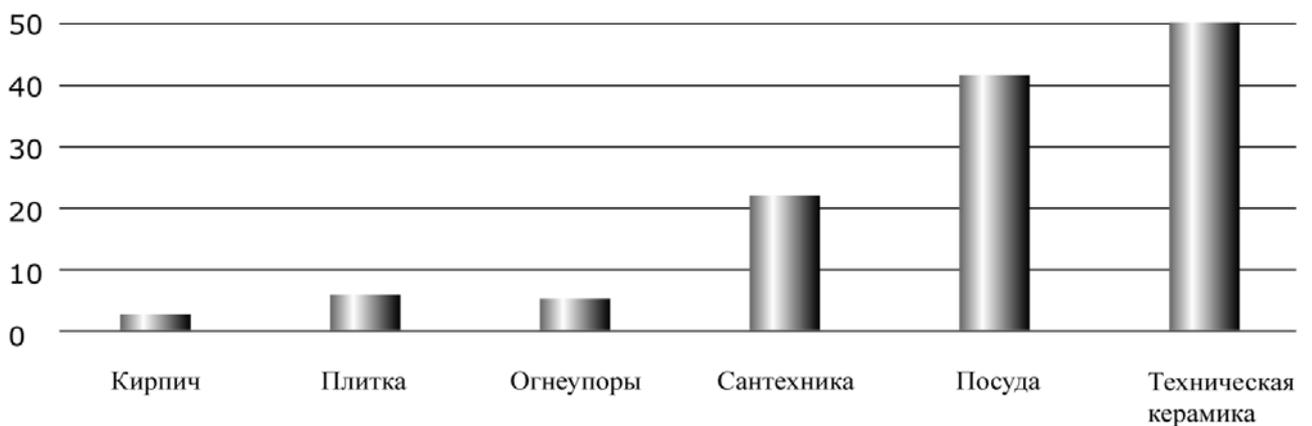


Рисунок 1.12 – Удельное энергопотребление на тонну продукта для различных производств керамических материалов

Рассмотрим перспективы снижения энергоемкости в различных подотраслях производства керамических изделий.

Строительные керамические материалы представлены модульными конструкционными (рядовой кирпич) или облицовочными (лицевой кирпич, плитка, черепица) материалами. Их характеризует массовое производство, большие удельные затраты сырья, относительно простые формы изделий. Дизайнерские и технологические разработки изделий типа рядового кирпича во многом определяют постоянное ужесточение строительных норм в области теплоизоляции зданий, поэтому разработки связаны, прежде всего, ведут по пути уменьшения

массы и увеличения пустотности изделий при сохранении удовлетворительных физико-химических характеристик (прочности, морозостойкости и т. д.). Включение порообразующих добавок в состав массы для производства кирпича приводит к уменьшению затрат основного сырья (глины), экономии топлива при обжиге (за счет сгорания добавок), снижению массы изделий и к повышению теплоизоляционных свойств кладки.

Для таких изделий оправданным является увеличение их габаритов, что приводит к снижению затрат как при производстве изделий, так и при строительстве зданий из них. Профиль модульных изделий изменяют с целью исключения образования так называемых «мостиков холода» – направлений в кирпичной кладке с повышенной теплопроводностью, – а также для экономии склеивающих строительных растворов (пазогребенчатые строительные камни или блоки).

Для лицевого кирпича по-прежнему сильны традиции имитации старинных кирпичей ручной работы за счет рустикации (нанесения рельефа) граней, использования клинкерных кирпичей и тонких облицовочных кирпичей плотного строения. При разработке таких материалов энергосбережение достигается модификацией состава сырья (для стандартных лицевых и клинкерных кирпичей) и уменьшением толщины изделий (для кирпичной облицовки).

Для облицовочных материалов, прежде всего для керамической плитки, разработки ведутся в направлении уменьшения толщины изделий и увеличения их габаритов и количества используемых форматов.

Необходимо отметить, что существенный эффект энергосбережения для строительных изделий, получаемый за счет увеличения их габаритов, достигается в первую очередь в области их производства. Очевидная экономия энергии при строительстве и эксплуатации зданий проявляется только в результате тесного сотрудничества производителей новых изделий с архитекторами и строителями, т. к. применение изделий с существенно большими габаритами влечет за собой изменения в технологии строительства (проектировании зданий, обучении рабочих и т. д.).

В технологии керамических плиток резкое сокращение энергопотребления произошло в конце 70-х годов благодаря переходу на скоростной режим обжига. Продолжительность обжига сократилась в десятки раз. Для современного производства керамических плиток значительные удельные затраты (рис. 1.12), также зависят от способов и средств декорирования поэтому экономия энергии связана с внедрением в производства новых технологий нанесения декора. В последние 20 лет осуществлялся активный переход от шелкографической печати к печати на установках типа «ротоколор» и, наконец, к цифровой печати. Снизилась затраты красящих материалов, сократилось количество дополнительных стадий, значительно возросла производительность производства. Соответственно менялся дизайн керамических плиток: увеличение габаритов и повышение качества печати позволили изготавливать крупные многоцветные панно. Особенный интерес представляет расширение декоративных эффектов, позволяющих более правдоподобно имитировать другие материалы (камень, дерево, металл).

В дизайне огнеупорных материалов наблюдаются тенденции, подобные отмеченным в строительной отрасли. Большинство из огнеупорных изделий представляют собой фасонные блоки и детали высокотемпературных установок для выплавки металла (домны, конверторы, электроплавильные печи), печей для производства цемента, стекла, керамики и некоторых химических продуктов. Увеличение габаритов модульных изделий приводит к экономии в их производстве, в строительстве и эксплуатации установок. В конструкциях установок между собой конкурируют кладки, выполненные из огнеупорного кирпича, безобжиговых блоков и массивных деталей, отлитых из огнеупорных бетонов.

Доля безобжиговых изделий в общем производстве огнеупорных изделий постоянно растет. В проектировании печей и плавильных установок все чаще придерживаются так называемого дифференцированного подхода, основанного на изучении распределения температур при службе установок и исследовании поверхности кладки с местами наиболее уязвимыми для коррозии расплавов металла, стекла и газов. Преимуществами обладают конструкторские решения,

обеспечивающие равномерный прогрев и износ огнеупорной кладки, соответственно, увеличение срока компании (продолжительности службы между ремонтами). Для таких дорогостоящих установок важно обеспечить хорошую ремонтпригодность, включая возможность «горячего ремонта», проходящего без остановки агрегата. Проектирование или, как сейчас уже принято говорить, дизайн огнеупоров – это комплексное решение состава и формы каждого изделия – детали футеровки или узла, исходя из перечисленных выше расчетов и натуральных определений [90].

Санитарно-технические керамические изделия представляют собой относительно толстостенные оболочковые формы, керамическая посуда – тонкостенные оболочки. Многие виды посуды и практически все керамические санитарно-технические изделия изготавливаются из разных видов фарфора. В технологии и того, и другого продукта используются значительные объемы воды (для подготовки масс и формования способом шликерного литья), глазурирование изделий и подобные температуры обжига (1200-1250 °С). Несмотря на общие черты двух технологий, удельные затраты энергии на производство посуды в 2 раза превышают затраты на производство санитарно-технических керамических изделий. Причины такого различия заключаются в том, что посудные изделия обладают малой массой и габаритами, а также большим разнообразием форм, в результате чего плотность садки печей для обжига фарфоровой посуды (характеристика использования объема печи) в несколько раз меньше чем плотность садки печей для обжига санитарно-технических изделий и в десятки раз меньше, чем плотность садки при обжиге огнеупоров. Достаточно затратным является декорирование посуды из-за применения большого количества дорогостоящих средств декорирования, малой автоматизации участков декорирования (до сих пор распространена ручная роспись) и необходимости повторных обжигов для закрепления нанесенных декоров.

Для керамической посуды наиболее перспективными областями энергосбережения являются: проектирование, производство и продажа. Использование при проектировании компьютерных средств (CAD- и САМ-программ) по-

зволяет не только экономить время на разработке дизайна за счет создания трехмерных форм, разработке и использования различных видов декора, но и визуализировать создаваемые модели посуды для заказчика без выполнения натуральных образцов. Переход от этапов «дизайн для технологии» и «технология для дизайна» к этапу «дизайн для потребителя» откроет перспективы изготовления посуды для индивидуальных потребителей. Технологии быстрого прототипирования в свою очередь уже сегодня на этапе производства сокращают цикл изготовления моделей и форм, минуя стадии изготовления черновых форм и капов.

Санитарно-технические керамические изделия предназначены для обеспечения системы водоснабжения и канализации. Их разработка непосредственно связана с решением проблем экономии воды и ее эффективного использования. В области производства санитарно-технических изделий существенная экономия затрат может быть достигнута способом внедрения автоматизированных способов производства – использования прогрессивных методов литья под давлением в пластиковые формы, применения роботов при оправке, транспортировке и декорировании, скоростного обжига. Однако, затраты на внедрение перечисленных технологических новшеств успешно окупаются лишь при успешном дизайне изделий. Так, одна пластиковая форма для литья под давлением позволят воспроизвести десятки тысяч одинаковых изделий без замены, но ее стоимость в тысячу раз превосходит стоимость гипсовой формы для традиционного литья, способной воспроизвести всего 60-100 изделий. Следовательно, стоимость пластиковой формы может быть компенсирована после продажи тысяч изделий, полученных с помощью этой формы. Поэтому на предприятиях предпочитают использовать наряду с современными высокопроизводительными установками формования, стенды с традиционными гипсовыми формами, что придает предприятию определенную гибкость при смене ассортимента.

Для санитарно-технических керамических изделий и для некоторых видов посуды в производство активно внедряются способы формования изделий с

одновременным склеиванием частей изделий (ободов и язычков для санитарно-технических изделий [91] и приставных частей для посуды [92]).

Изделия технической керамики отличаются большим разнообразием материалов и форм, так как область их применения чрезвычайно широка. Этот вид керамики производится обычно из дорогого искусственного сырья, технология отличается высокочувствительными способами формования, обжига и послеобжиговой обработки (шлифовка, полировка, металлизация и т. д.). Изделия технической керамики – детали приборов, установок, выполняемые на заказ. Они не являются ремонтпригодными. В процессе эксплуатации изделия технической керамики подвергаются интенсивным нагрузкам разного рода. Энергосберегающий эффект для дизайна таких деталей может быть достигнут в различных областях: при проектировании – за счет оптимизации состава и форм изделия, исходя из расчета поведения изделия в условиях эксплуатации (CAE-программы), при производстве – за счет применения энергосберегающих технологий (использование специально подготовленного сырья, новых методов формования и термообработки).

На рисунке 1.13 представлены перспективные области энергосбережения для стадий жизненного цикла керамических изделий различного назначения.

**Существенные, несущественные и наиболее перспективные для разработок в области энергосбережения стадии жизненного цикла керамических изделий**

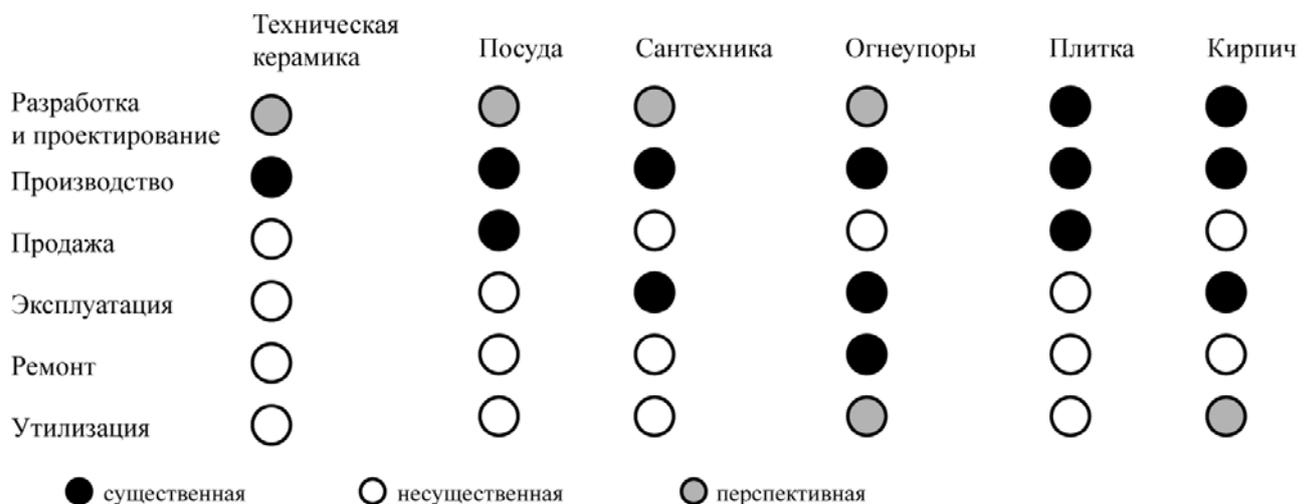


Рисунок 1.13 – Перспективные для разработок в области энергосбережения стадии жизненного цикла керамических изделий

Наибольший эффект в области энергосбережения может быть достигнут именно при проектировании большинства керамических изделий. Стадия производства всех без исключения керамических изделий служит в данный момент основным резервом снижения затрат энергии. Решение проблемы утилизации таких изделий, как кирпич и огнеупоры – перспективная область разработок.

Одна из основных задач промышленного производства изделий – повышение их технологичности, высокий уровень которой может обеспечить необходимое качество при минимальных затратах. В понятие технологичности включают все меры, которые минимизируют затраты при проектировании, производстве, ремонте и эксплуатации изделий (приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ) [93].

Речь, в первую очередь, идет о снижении трудоемкости, которое может быть достигнута 2 способами:

- Проектированием новых технологий и поискам оптимальных технологических решений существующих технологий, что должно привести к экономии ресурсов без снижения качества выпускаемой продукции.

- Проектированием изделий и материалов, которые в полной мере соответствуют современному представлению о функциональности в условиях эксплуатации и обеспечивают приемлемый уровень материало- и ресурсоемкости.

Первый способ снижения трудозатрат при производстве изделий подразумевает совершенствование оборудования и внедрение рациональных производственных схем; оптимизацию технологического процесса, систем контроля и учета. Организационная часть внедрения рационального управления хорошо отражена в стандартах систем менеджмента разных поколений. Собственно, технологические решения должны опираться на передовой опыт предприятий отрасли и новые научные разработки.

Второй способ снижения трудоемкости изделий и материалов заключается в ориентации на проектирование изделий, функциональные и технологиче-

ские характеристики которых обеспечивают экономию ресурсов по сравнению с выпускаемыми в данный момент аналогами. Улучшение таких характеристик может быть связано как с обеспечением большего срока службы, более высоких технических характеристик, позволяющих сократить массу изделий или их количество для достижения нужного эффекта, так и с оптимизацией формы изделий, позволяющей сэкономить энергию при их производстве.

Для решения задачи энергосбережения стадия проектирования изделий, выбора их ассортимента и способа производства является наиболее важной, так именно она закладывает будущие затраты производства на значительный срок.

В применяемой практике развития так называемых «наилучших доступных технологий», выводящей предприятия с большими энергетическими затратами и значительными эмиссиями на современный уровень, отдельное внимание уделено производству керамики [94].

В числе направлений энергосбережения в производстве керамических изделий отмечают следующие:

- 1) внедрение новых энергоэффективных технологических способов и проектных решений;
- 2) модификация полуфабриката и изделий;
- 3) снижение водопотребления;
- 4) использование современного оборудования, прежде всего печей и сушил, и его совершенствование;
- 5) максимальное использование остаточного тепла.

Из приведенного перечня надо особо выделить пункт «модификация полуфабриката и изделий».

Форма изделия и рецептура материала оказывают решающее влияние на технологию, во многом определяя общее энергопотребление производства [88, С. 144-145]. Среди технологических разработок, посвященных снижению энергозатрат, можно выделить следующие направления:

- увеличение функциональности изделия;
- облегчение изделия;

- приближение формы полуфабриката к форме изделия;
- введение пластификаторов, гидрофобных отощителей, плавней.

Увеличение функциональности изделий подразумевает качественно новое улучшение их потребительских свойств за счет оптимизации формы и повышения свойств материала. Оптимизация формы изделий означает реальную экономию материала и энергии, затрачиваемой на его обработку, за счет снижения декоративности изделий и удаления второстепенных деталей, не оказывающих существенного влияния на эксплуатационные свойства. Если говорить о хозяйственно-бытовой керамике, примером такого подхода может служить так называемый скандинавский дизайн, одна из главных черт которого – высокая функциональность. Посуда, вазы и др. изделия, десятилетиями продающиеся торговым домом ИКЕА, отличаются простотой формы и минимальным декором, что безусловно удешевляет их производство. Политика фирмы – доступный каждому «демократичный дизайн» – правильное сочетание формы, функциональности, качества, экологичности и низкой цены [95].

Другим примером увеличения функциональности изделий за счет повышения физико-химических и, соответственно, потребительских свойств служит появление и успешное развитие в секторе облицовочных керамических материалов такого материала, как керамогранит. Более дорогостоящие сырьевые материалы (огнеупорные глины, каолины, полевые шпаты), высокая температура обжига, использование большего количества пигментов, казалось бы, удорожают производство и, тем не менее, высокие потребительские свойства керамогранита позволяют использовать его взамен всех видов керамических плиток, обеспечивая большую долговечность покрытия. Ресурсосбережение в данном случае смещено в область эксплуатации, а в производстве керамогранита используют такие приемы модификации изделия, как увеличение размера выпускаемых плит, использование дешевых пигментов из отходов металлургии и нанесение декора на поверхностный слой изделия (двухслойный керамогранит).

Увеличение размеров керамических покрытий означает не только экономию в строительстве, но и сокращение отходов производства и, как правило, облегчение изделий. Прогрессивные способы формования керамических плит позволяют изготавливать изделия с габаритными размерами, превышающими 1 м.

Эффект от облегчения изделия можно проиллюстрировать на примере тонкостенного (толщина плиты 4 мм) облицовочного керамогранита. На рисунке 1.14 представлена рекламная упаковка такого материал испанской фирмы *Industrias Alcorenses Confederadas S. A.* [96]. Значительное уменьшение толщины керамической плиты по мнению производителя позволило не только существенно сократить расходы основного сырья и энергии, но и затраты на транспортировку, упаковку, складирование продукции, а также сократило загрязненность окружающей среды. На презентации материала, проведенной фирмой для дизайнеров и архитекторов, показывали преимущества его эксплуатации, появившиеся за счет уменьшения веса.



\* Эти процентные соотношения могут варьировать в зависимости от производимых моделей и используемого сырья.

Рисунок 1.14 – Рекламная этикетка керамогранита фирмы *Industrias Alcorenses Confederadas S. A.* [96]

Для массивных строительных и огнеупорных керамических изделий направление экономии ресурсов – выпуск изделий пониженной плотности. Поскольку значительная часть таких изделий служит в качестве теплоизоляции, выигрыш оказывается двойным – как в увеличении эксплуатационных свойств, так и в снижении затрат сырьевых материалов и энергии для выпуска изделий. Пример строительного кирпича и блоков ясно показывает такую тенденцию. От производства полнотелого кирпича большинство стран за несколько последних десятилетий перешли к выпуску пустотелого перфорированного (эффективного). В настоящее время все большее распространение получает выпуск поризованных строительных блоков, в которых, наряду с большим количеством пустот, сам керамический материал отличается повышенной закрытой пористостью. Для образования высокой закрытой пористости применяют введение выгорающих добавок, в качестве которых используют древесные опилки, отходы производства пластмасс и т. п.

Введение порообразователей снижает теплопроводность керамических блоков за счет создания микропористой структуры. Это ведет к уменьшению термической массы блоков и, кроме того, потребления энергии в обжиге за счет теплового эффекта реакции горения. Снижению массы также способствует изменение формы изделий – уменьшение толщины плитки, блоков и труб, мультиперфорация кирпича. Там, где это осуществимо технически, внедрение данных приемов позволяет уменьшить потребление энергии и выбросов загрязняющих веществ.

Существенным резервом экономии является применение тех способов формования и модификации составов массы, которые сокращают или делают избыточной дополнительную, в том числе послеобжиговую обработку полуфабриката и изделия. Речь может идти о соблюдении точности размеров, которая повышается либо уменьшением их погрешности в формовании, либо сокращением усадки (уменьшения размеров полуфабриката в результате удаления связки и протекания процесса спекания) в сушке и обжиге. Сокращение времени на оправку (механическую обработку полуфабриката после формова-

ния) и уменьшение отходов материала при этой операции достигается применением способа изостатического формования (точность размеров полуфабриката – 1 %), инъекционного литья (1,5 %), а также применением роботов для вырезания отверстий, зачистки швов и др.

Уменьшения усадки при сушке и обжиге можно достичь, корректируя состав массы в сторону увеличения инертных отошающих компонентов или образующих в процессе обжига фаз с меньшей плотностью (расширяющихся).

Послеобжиговая обработка изделий (шлифовка, полировка и др.) сопряжена со значительными затратами. Из-за высокой твердости фаз, составляющих керамический материал, применяются алмазные инструменты, порошки сверхтвердых материалов, ультразвуковая обработка или резка водой при высоком давлении. Сокращение этих затрат возможно не только увеличением точности размеров полуфабриката, но и уменьшением шероховатости поверхности изделия. Так при коррекции состава технической керамики только за счет уменьшения размеров зерен удастся значительно повысить класс обработки поверхности.

Снижение затрат материалов и энергии достигается введением в состав массы различных добавок, которые можно разделить на несколько категорий. Во-первых, это модифицирующие связки, позволяющие снизить усилия формования и процент формовочного брака. Сюда входят не только пластификаторы, но и добавки, способствующие снижению влажности массы. Далее используются отошители и добавки с высокой долей гидрофобности, позволяющие ускорить сушку и избежать образования дефектов. Наконец, это плавни и спекающие добавки, снижающие температуру обжига материала и сокращающие время обжига. Введением высокоэффективных спекающих добавок (щелочных и щелочноземельных), а также стеклообразователей, хотя введение таких добавок возможно не для всех видов керамических изделий, удастся снизить температуру обжига на 50 К и более.

В составе сырья для строительной керамики широко используют отходы производства, снижающие общие затраты за счет невысокой цены, однако их

применение должно играть определенную положительную роль на какой-либо стадии или, по крайней мере, не приводить к снижению свойств готовых изделий.

Оптимизация формы и состава заготовок дает возможность снизить продолжительность сушки и обжига и перейти на использование печей скоростного обжига (роликовых, туннельных с выкатным подом). Модификация состава упрощает сушку и обжиг облицовочной и напольной плитки, керамических труб, что позволяет снизить энергопотребление. Ведутся исследования по внедрению скоростного обжига в производство более толстостенных керамических изделий.

Отдельного упоминания заслуживает использование в технологии многих керамических изделий добавок шамота – относительно инертного наполнителя из обожженной глины. Благодаря использованию шамота удастся значительно снизить усадку, что сокращает процент брака и увеличивает точность размеров, однако для производства шамота требуется наличие отдельной технологической линии, включая печной агрегат. Широко практикуется использование в качестве шамота переработанных (измельченных и просеянных) отходов обожженной продукции. При всей кажущейся рациональности такого приема следует понимать, что включение в состав массы доли (иногда весьма значительной) бракованной продукции никак не стимулирует ни ее сокращение, ни сокращение затрат энергии.

На рис. 1.15 представлена принципиальная схема разработки керамического изделия. На схеме можно увидеть, что стадия формования определяет значительную часть технологической цепочки (подготовку массы, сушку, использование формующей оснастки) изделия.

Кратко рассмотрим эволюцию способов формования керамики – от самого древнего – пластического (ручной лепки и механизированного формования на гончарном круге) до формования без форм – способом печати.

Самыми распространенными изделиями древней керамики были терракотовые сосуды различных форм, использовавшиеся для хранения и пригото-

ния пищи, а также для погребения умерших. Для лепки сосудов применяли различные приемы – скручивание жгутов, раскатку пластов, набивку массы. В результате куски глины приобретали уплотненную ориентированную структуру, затем их соединяли друг с другом и замазывали места соединения. Таким образом, выравнивали усадку в различных местах стенок сосуда, избегая трещин при сушке. Так, древние японские погребальные скульптуры – ханива изготавливали из кусков различной формы, вырезанных из раскатанных пластов, лепные сосуды дзэмон упрочняли утолщениями, служившими ребрами жесткости, противостоящими усадочным напряжениям [97].

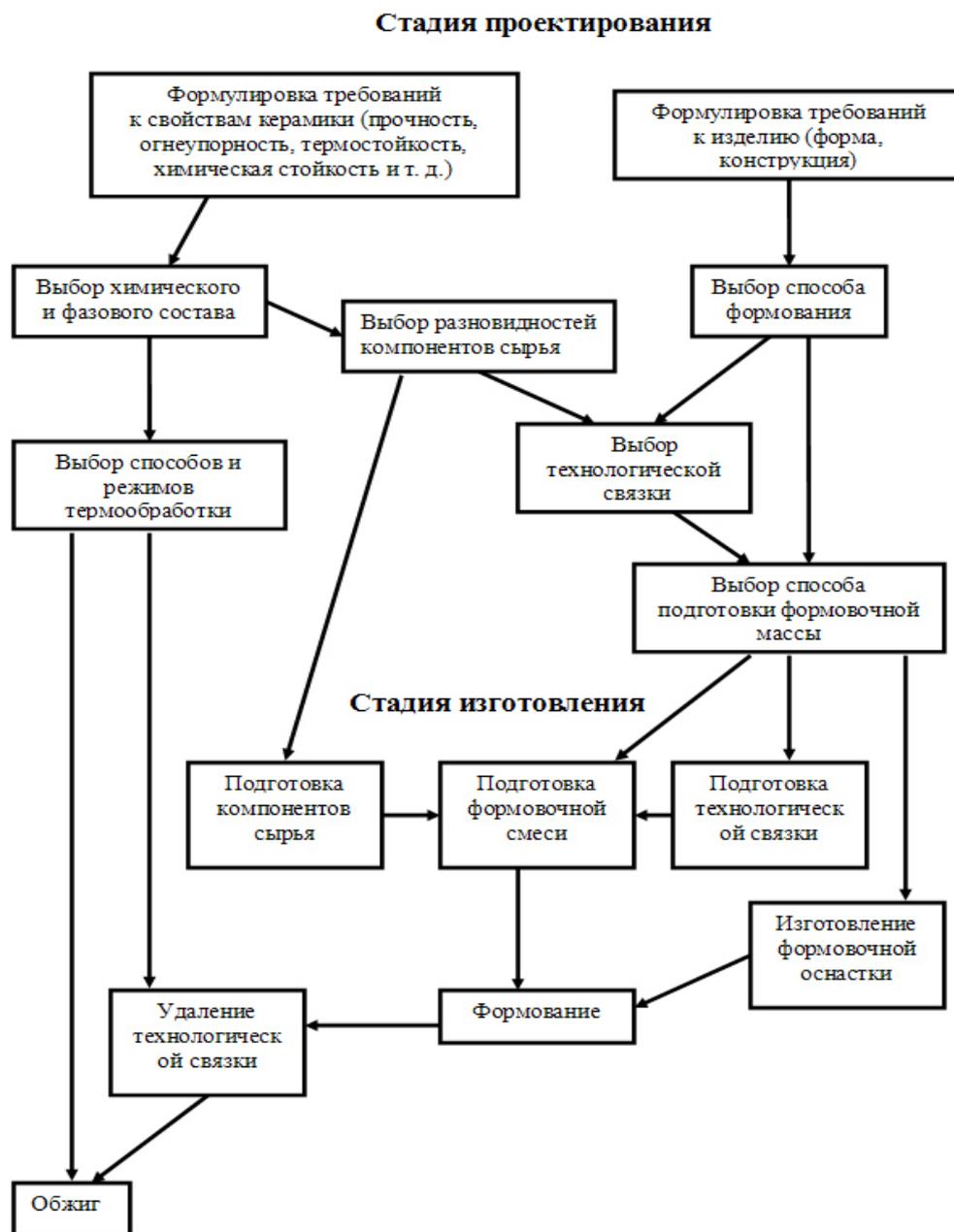


Рисунок 1.15 – Принципиальная схема разработки керамического изделия

Примечательно, что анализ форм древних керамических сосудов культуры Яншао (IV-II тыс. до н. э.), произведенный археологами [98], привел к следующим выводам:

- в течение более чем 2000 лет в изготовлении сосудов наблюдалось, как использование однотипных (устойчивых) форм, так и их усложнение, связанное с совершенствованием технологии (рис. 1.16);

- совершенствование технологии изготовления сосудов заключалось в более тщательной подготовке формовочной массы и преимущественном использовании кольцевого и спирально-ленточного способа формования, по сравнению с использовавшимся ранее формованием в формах.

Последний вывод весьма важен для понимания того факта, что послойное формование позволяет достичь сложных форм в отличие от одномоментного формования в форму (ср. с современными аддитивными технологиями – см. далее).

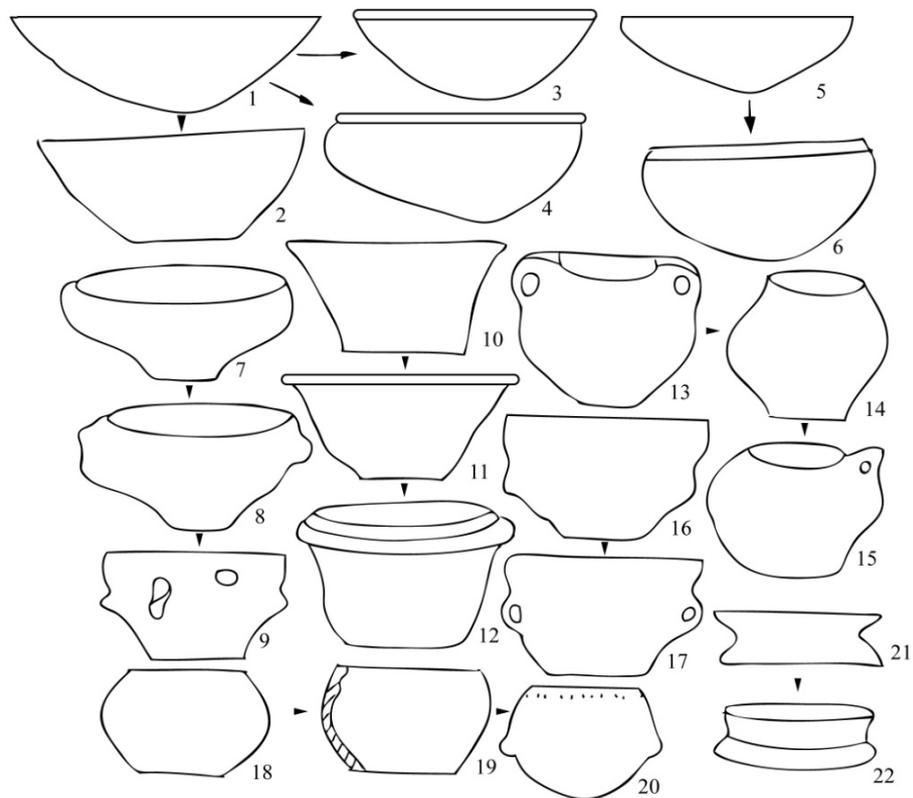


Рисунок 1.16 – Эволюция форм керамических сосудов культуры Яншао.

Номера у изображений по мере их увеличения обозначают сосуды более поздних сроков изготовления [98]

Если древнейшие керамические изделия, найденные на территориях обитания различных племен, представляют собой небольшие культовые фигурки и осколки посуды, то для развитых цивилизаций, например, крито-микенской, характерно повсеместное использование керамики в строительстве домов, что требовало наличия развитого массового производства. Производство строительной, так называемой «грубой», керамики (кирпичей, черепицы), хотя и не требовало столь тщательной подготовки массы, как производство фигурных ваз, но нуждалось в переработке большого количества сырья, для чего было необходимо наладить его добычу, формование плотных изделий, их длительную сушку и обжиг.

Производство большого количества одинаковых изделий возможно лишь при применении форм, в которых отминали пластичную глиняную массу (штамповка). Штампование ранее использовали лишь для нанесения декора оттиском на полу фабрикате, находящимся в так называемом кожетвердом состоянии, соответствующем состоянию массы близкому к нижнему пределу пластичности (обычно 15-18 % влажности) [98]. В этом состоянии глина поддается формованию при приложении значительных развиваемых вручную усилий, масса при этом не теряет сплошности и не образует трещин. Материалами форм служили дерево и керамика (терракота). Ручную штамповку черепицы и кирпича заменили механизированной штамповкой даже в странах Европы лишь к концу XIX в. [100].

Керамическое производство требовало не только стабильного развития и накопления опыта в течение десятилетий, но и значительных затрат. Поэтому в странах жаркого климата (Африка, районы Центральной и Средней Азии) с успехом использовали необожженные саманные кирпичи или глинобитные стены, а в странах Юго-восточной Азии – легкое и прочное дерево для быстро возводимых построек, в Европе – тесанный камень.

С развитием производства керамики повсеместно наблюдался процесс не только расширения областей ее применения, но и усложнения форм керамических изделий. Значительный прогресс в разнообразии форм полых керамиче-

ских изделий (посуды, ваз) был достигнут с появлением и распространением гончарного круга. Формование сосудов лепкой с использованием жгутовой техники или поворотного стола даже у искусных мастеров занимали значительно больше времени, чем вытягивание на гончарном круге. Десятки разнообразных форм греческих ваз, каждая из которых имела свое назначение, появились лишь с развитием гончарной техники. При этом индивидуальность каждого мастера проявлялась не столько в формовании, сколько в декорировании, недаром за ними закрепилось название вазописцев.

От момента появления гончарного круга, управляемого руками (IV тысячелетие до н. э.), до круга, раскручиваемого при помощи ног (при этом значительно возросла производительность труда), прошло немало времени и гончарные изделия заняли прочное место в материальной культуре практически всех народов Европы, Азии и Северной Африки [101]. Позднее гончарный круг преобразовали в высокопроизводительный станок для формования и обработки поверхности, вместо рук гончара стали использовать профильные шаблоны, наконец, вращающиеся гладкие ролики, и в конце XVIII в. круг стал механизированным [102].

Раскатка на гончарном круге приводит к относительно равномерному распределению неизометричных частиц глинистых минералов по образующей формируемого сосуда, что определяет равномерной усадке (уменьшению размеров) в последующей сушке. Толщина стенок полого формируемого изделия обычно составляет не менее 4-5 мм, что связано и с достижимой точностью формования, и с возможностью деформации влажного, только что «вытянутого», полуфабриката под собственным весом. Подобные же изделия, изготовленные ручной лепкой и набивкой форм глиняной массой, обычно имеют более толстые стенки из-за опасности неравномерной усадки при сушке. Причина – фиксация формовочных усилий массой, частицы которой распределяются по направлению их приложения. Текстурированность массы приводит к анизотропии усадки и возникновению напряжений, которые могут превысить критические значения и привести к образованию трещин. Высокая скорость вращения заго-

товки, раскатываемой на гончарном круге, позволяла получать более точный профиль изделия и более гладкую поверхность.

Таким образом, появление способа формования раскаткой на гончарном круге позволило быстро формировать относительно тонкостенные сосуды точной формы. Однако изделия, формуемые на гончарном круге, представляют собой лишь заготовки с осью вращения, все прочие их элементы требуют изготовления другими способами, либо обработкой вручную отформованной заготовки, либо приставкой заранее формованных деталей (ручек, носиков и др.). Рельефная поверхность на изделиях может быть получена лишь со стороны формы – другая будет гладкой. Полностью отформовать изделие сложной формы в одну стадию возможно лишь способом шликерного литья, при котором глинистая водная суспензия, наливается в пористую форму [103, 104].

Этот способ приводит к наиболее равномерному распределению частиц массы без заметной фиксации формовочных усилий. Всасывание порами формы воды приводит к образованию на поверхности внутренней полости формы однородного слоя частиц твердой фазы (глин и других компонентов массы). После набора необходимой толщины избыток шликера сливается и набранный слой постепенно обезвоживается, теряя воду, уходящую в поры формы, усаживается, набирая прочность.

Отминка влажной глиняной массы в пористые керамические формы, была известна еще в Древнем Египте [105], однако шликерное литье стало использоваться в конце XVIII в. [106], когда в качестве материала для форм стал использоваться гипс. С тех пор шликерное литье – наиболее распространенный способ формования изделий сложной формы, как строительно-бытового, так и технического назначения.

Производство керамических изделий сложной формы во многом зависит от пластичности формуемой массы и ее способности связывать непластичные компоненты (связанности). Тщательное обогащение глинистых масс с применением отмучивания глин (удаления седиментацией грубых примесей), введение в состав масс армирующих полуфабрикат добавок (волокон шерсти, травы

и др.) повсеместно применялось во многих производствах, начиная с древности. Для формования мало пластичных масс приходилось использовать приемы резчиков по камню, а также вводить природные пластификаторы (растительные смолы). Так были вынуждены поступать в Древнем Египте при формовании кремнеземистых масс так называемого «египетского фаянса» [105, С. 238-239], пластификаторы добавляли при формовании сильно отощенных (с высокой долей каменистых непластичных материалов) масс кашана, персидского фаянса и др. Такие массы формовали и весьма необычными способами, - например, выпиливая из обожженных пористых пластов фигурные пластины для мозаичных панно [58, С. 90, 94]. Органическую связку вводили в безглинистые массы так называемого «французского» мягкого фарфора, после формования толстых изделий их обтачивали [100, С. 67].

Каменная керамика отличается высокой прочностью плотно спеченного практически беспористого материала, поэтому формование изделий из нее могло проходить в несколько стадий, включая шлифовку и полировку обожженных изделий, чего нельзя было делать с пористыми фаянсовыми и майоликовыми массами. Такие приемы позволяли Дж. Веждвуду достигать в яшмовой (джаспер) и базальтовой массах большего сходства с натуральным камнем [102, С. 57-59].

В Древнем Китае массы для производства протофарфора и фарфора содержали большое количество каолина и огнеупорных глин, образующих при высыхании весьма прочный полуфабрикат, что позволяло изготавливать, изящные тонкостенные заготовки, вырезая на них ажурные отверстия. Такие приемы не могли быть использованы европейскими мастерами, работавшими с непрочными майоликовыми массами.

Современные технологии формования глинистых масс, основанные, прежде всего, на явлении пластичности глин, наряду с технологическими приемами переработки масс (измельчением, смешиванием, вакуумированием) в высокопроизводительных агрегатах, используют и традиционное вылеживание в по-

стоянных термовлажностных условиях, значительно повышающее их технологические свойства [107].

Дальнейший прогресс в области формования керамики был связан, прежде всего, с развитием промышленности и резко возросшими потребностями в таких керамических изделиях как огнеупоры для выплавки металлов, а также керамические изделия технического назначения (фарфоровые изоляторы, свечи зажигания, кислотоупорные изделия и многое другое). Технологии традиционных керамических изделий (строительного и хозяйственно-бытового назначения) перешли на промышленный уровень.

В XIX в. были разработаны высокопроизводительные способы формования наиболее востребованных керамических изделий: полусухое прессование порошков и штамповка пластичных масс в металлических формах, выдавливание (экструдирование) пластичных масс через мундштуки [53, С. 116]. Прессование использовали для получения изделий простой формы – кирпичей и плиток, штамповку пластичных масс для плоских и изогнутых черепиц, выдавливание – для труб и кирпичей. Попутно внедрялись в производство высокопроизводительные печи непрерывного действия.

Для массового производства изделий требовалась автоматизация процессов формования. XX в. ознаменовался активным развитием порошковой металлургии, которая использовала и успешно развила основные способы формования керамики. Создание способа изостатического прессования порошков через упругую резиновую оболочку позволило перейти к массовому производству однородных и плотных изделий сложной формы [108]. Способ обеспечивал не только высокое качество заготовки, но и высокую точность ее размеров (допуск не более 1 %).

Затем были разработаны способы горячего литья (парафиновый и injecting moulding), использующие термопластичные связки, легко деформируемые в нагретом состоянии и быстро набирающие прочность (фиксирующие форму полуфабриката) при охлаждении после впрыскивания в металлическую форму [109, 110]. Горячее литье (инжекция) оказалось незаменимым для мало-

габаритных изделий сложной формы технического назначения. Высокая производительность этого способа сочетается с точностью размеров и однородностью заготовки. Прогресса в этой области нельзя было достичь без получения многокомпонентных полимерных связок, определяющих необходимые реологические свойства.

Со второй половины XX в. для создания высокоплотных керамических изделий стали применять способы, позволяющие совместить в одном процессе формование прессованием и высокотемпературное спекание. Горячим прессованием (ГП) и горячим изостатическим прессованием (ГИП) получали, соответственно, изделия простой и сложной формы с максимальными прочностными характеристиками.

Способ шликерного литья получил развитие с разработкой прочных полимерных пористых форм, позволяющих заливать шликер под давлением [111]. Использование способа литья под давлением для получения фарфоровых изделий сложной формы (сантехники, посуды) позволило сократить процесс формования в десятки раз – с нескольких часов до 10-20 минут. При этом улучшилось качество поверхности изделий и в тысячи раз возрос срок использования формы.

В последней четверти XX в. массивные огнеупорные изделия и некоторые крупногабаритные изделия технической керамики стали формовать литьем высоконцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС) [112], которые получали длительным измельчением оксидных материалов с малым количеством воды. Благодаря приобретению измельчаемым материалом вяжущих свойств из-за образования коллоидных частиц (наночастиц) оксидов заготовки быстро «схватывались» в непористой форме, приобретая достаточно высокую плотность и прочность для использования.

Для оксидной керамики развитие получил способ формования, совмещенный со спеканием – так называемый *lanxide process* – высокотемпературное окисление металлических заготовок с наследованием их формы образуемым керамическим образцом [36, С. 386].

В последние 20 лет проводятся интенсивные исследования еще одного процесса, совмещающего прессование со спеканием – SPS (Spark Plasma Sintering). Это аналог горячего прессования при пропускании через прессуемый материал импульсов большой силы тока, в результате чего внутри заготовки образуется газ из ионизированных частиц [113].

Современный этап развития технологии керамики ставит своей целью создание материалов нового качества (наноматериалов и композиционных материалов) и оптимизации технологии с целью минимизации потерь и ущерба, наносимого окружающей среде на всем жизненном цикле изделия. Увеличивается количество способов формования, основанных на коллоидных процессах, в которых принимают участие частицы материала с размерами менее 100 мкм [114]. Такие способы, например, модификации способа шликерного литья, дают возможность наносить тонкие слои материала и регулировать процесс.

На первый план выходят цифровые технологии, позволяющие радикально сократить проектирование и конструирование изделия – CAD/CAM/CAE компьютерные программы, с помощью которых проводят визуализацию проекта, расчет поведения материала в процессе изготовления и эксплуатации, получают необходимую техническую документацию и, наконец, изготавливают необходимую технологическую оснастку (технологии быстрого прототипирования) [115, 116].

Следующим этапом развития технологии XXI в. – применение цифровых технологий, как непосредственно для формования без использования формующей оснастки (технологии 3D-печати), так и для формования керамического изделия селективным спеканием с применением лазерной обработки [117].

Лазерные технологии используются для послеобжиговой обработки керамических изделий, обеспечивающей высокой точностью изготовления базовых (плоскости, отверстия и пазы) и уникальных конструктивных элементов в керамических заготовках при практическом отсутствии сколов [118].

Подводя итоги краткого исторического обзора, выделим несколько тенденции в развитии способов формования за последние 200 лет:

- повышение скорости формования и производительности;
- увеличение количества способов формования для изделий сложных форм, в первую очередь, способов формования коллоидных частиц;
- разработка способов формования, позволяющих сократить общее количество технологических стадий.

Ретроспектива способов формования представлена в таблице 1.4 и на рисунке 1.17. В таблице и на рисунке способы формования сгруппированы в соответствии с состоянием (вязкостью) формовочной массы. Связь между реологическими характеристиками массы и параметрами формования и ее влияние на однородность изделий будет рассмотрена в разделе 2.

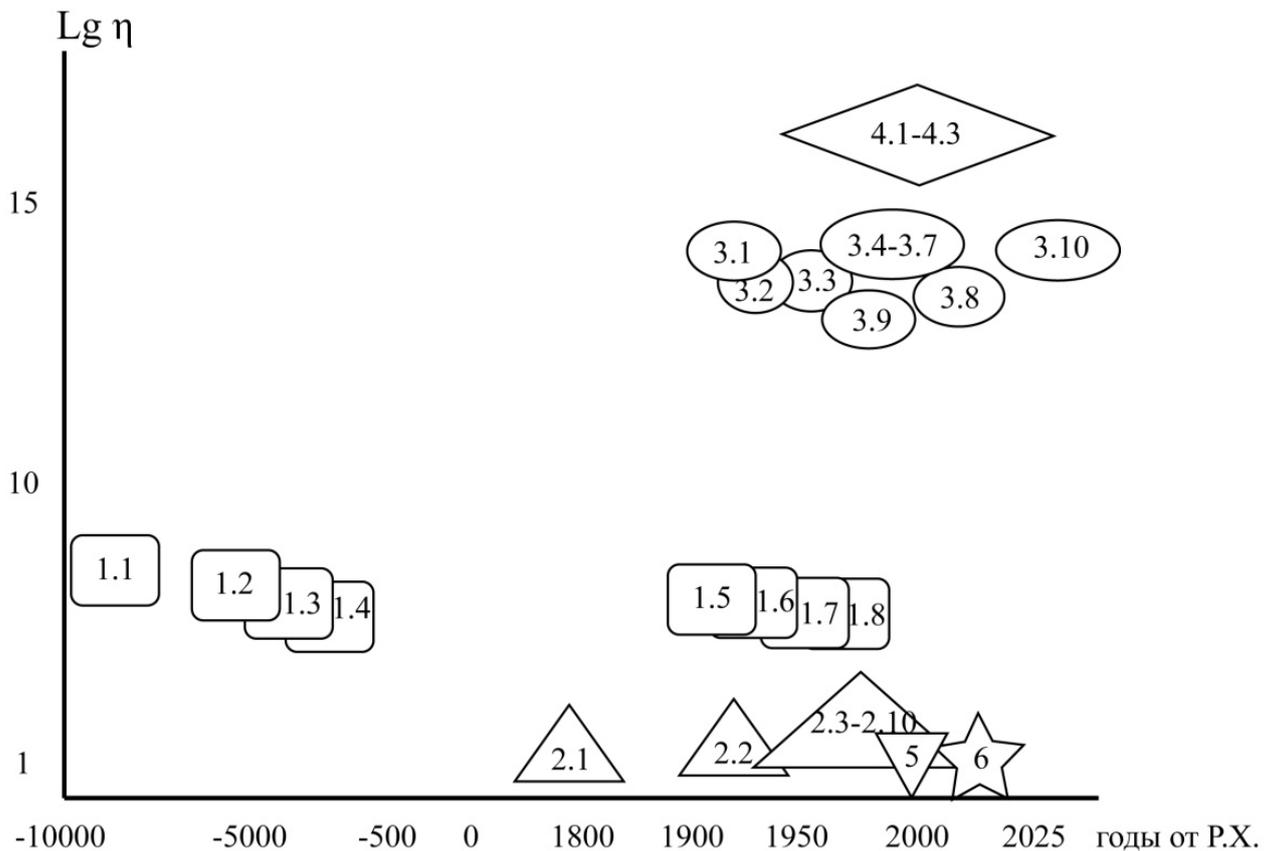


Рисунок 1.17 – Хронология начала применения основных способов формования, различающихся вязкостью формовочной смеси  $\eta$ . Численные обозначения на диаграмме соответствуют нумерации способов формования, приведенной в табл. 1.4

Таблица 1.4 – Хронология и краткая характеристика способов формования и их основных разновидностей

Обозначение нумерации (№): 1 – формование из пластичной массы; 2 – из суспензии (шликера); 3 – из пресс-порошка; 4 – из спеченной керамики; 5 – на металлический прекурсор; 6 – из газовой фазы на графитовый прекурсор.

№	Способ формования	Начало использование способа	Сущность способа	Преимущественная форма изделий	Область применения изделий
1.1	Лепка	24 тыс. лет до н. э.	Формование руками	Толстостенные полые или сплошные.	Посуда, художественные изделия
1.2	Набивка	Более 6 тыс. лет назад	Формование частыми ударами в гипсовую, деревянную или керамическую форму	Толстостенные полые или сплошные.	Строительные и интерьерные изделия
1.3	Отмин	5 тыс. лет до н. э.	Формование руками в деревянной керамической или гипсовой форме	Толстостенные полые	Посуда, строительные, художественные изделия
1.4	Раскатка	4 тыс. лет до н. э.	Разглаживание куска массы на вращающемся диске (позже – на форме) пальцами, позже – металлическим шаблоном или роликом	Полые фигуры вращения	Посуда
2.1	Шликерное литье	XVIII в.	Концентрирование частиц суспензии на поверхности гипсовой формы из-за всасывания воды порами формы	Полые, в том числе тонкостенные, сложной формы	Посуда, сантехника, технические детали
1.5	Штамповка	XIX в.	Прессование в металлической форме	Сплошные простой формы	Строительные изделия, огнеупоры
1.6	Допрессовка	XIX в.	Прессование в металлической форме	Сплошные простой формы	Строительные изделия, огнеупоры

№	Способ формования	Начало использование способа	Сущность способа	Преимущественная форма изделий	Область применения изделий
1.7	Протяжка (экструзия)	XIX в.	Продавливание через металлический мундштук	Сплошные и полые, в том числе длинномерные, постоянного сечения	Строительные изделия и технические детали
3.1	Полусухое прессование	1-я половина XX в.	Двухстороннее прессование металлическими штампами	Сплошные простой формы	Строительные изделия, технические детали, огнеупоры
3.2	Трамбовка	1-я половина XX в.	Импульсное полусухое прессование	Сплошные и толстостенные полые простой формы	Строительные изделия, огнеупоры и технические детали
3.3	Вибропрессование	1-я половина XX в.	Полусухое прессование, совмещенное с вибрацией	Сплошные простой формы	Огнеупоры, Технические детали
4.1	Алмазная обработка	XX в.	Вырезание отверстий, резка, обработка поверхности спеченных керамических заготовок алмазным инструментом	Сплошные простой формы	Технические и строительные детали
2.2	Центробежное шликерное литье	XX в.	Шликерное литье во вращающейся форме	Полые фигуры вращения	Технические детали
2.3	Пленочное литье	2-я половина XX в.	Литье тонкого слоя термопластичного шликера на плоскую обогреваемую поверхность	Тонкие пленки	Технические детали
1.8	Обточка	XX в.	Обточка металлическими резцами вращающейся заготовки	Полые и сплошные фигуры вращения	Изоляторы
4.2	Ультразвуковая абразивная обработка	2-я половина XX в.	Вырезание отверстий и пазов в спеченных керамических заготовках ультразвуковыми импульсами абразива в водной среде	Сплошные простой формы	Технические детали

№	Способ формования	Начало использование способа	Сущность способа	Преимущественная форма изделий	Область применения изделий
3.4	Электроимпульсное спекание (Spark Plasma Sintering)	1-я половина XX в., широко – в XXI в.	Формование, совмещенное с обжигом в результате пропуска через прессуемый материал импульсов большой силы тока	Сплошные простой формы	Технические детали
4.3	Гидроабразивная обработка	2-я половина XX в.	Резка спеченных керамических заготовок струей воды с примесью абразива, под высоким давлением	В основном пластины	Строительные изделия и технические детали
3.5	Горячее прессование	2-я половина XX в.	Прессование, совмещенное с обжигом	Сплошные простой формы	Технические детали
3.6	Изостатическое прессование	2-я половина XX в.	Всестороннее обжатие жидкостью через резиновую оболочку	Любой формы	Сантехника, посуда, технические детали, огнеупоры
3.7	Горячее изостатическое прессование	2-я половина XX в.	Формование, совмещенное с обжигом: всестороннее обжатие газом через металлическую или стеклянную оболочку при высокой температуре	Сложной формы	Технические детали
3.8	Полусухое ультразвуковое прессование	2-я половина XX в.	Полусухое прессование совмещенное с ультразвуковой обработкой	Сплошные усложненной формы	Технические детали
3.9	Квазиизостатическое прессование	2-я половина XX в.	Всестороннее обжатие фигурными резиновыми штампами	В основном полые, сложной формы	Технические детали
2.4	Шликерное литье под давлением	2-я половина XX в.	Шликерное литье под давлением в гипсовые или пластиковые пористые формы	Полые толстостенные	Сантехника, посуда, технические детали
2.5	Электрофоретическое литье	2-я половина XX в.	Шликерное литье, ускоренное электрофорезом в форме с электродами	Полые сложной формы	Технические детали

№	Способ формования	Начало использование способа	Сущность способа	Преимущественная форма изделий	Область применения изделий
2.6	Литье высококонцентрированных суспензий	2-я половина XX в.	Шликерное литье высококонцентрированных самосхватывающихся суспензий в гипсовые и пластиковые формы	Сплошные, крупногабаритные, любой формы	Огнеупоры, технические детали
2.7	Горячее (парафиновое) литье	2-я половина XX в.	Литье суспензий на основе расплава парафина в охлаждаемые металлические формы	Малогобаритные сложной формы	Технические детали
2.8	Инжекционное литье (injecting moulding)	2-я половина XX в.	Литье (экструзия) суспензий (паст) на основе полимеров в охлаждаемые металлические формы	Малогобаритные сложной формы	Технические детали
5	Лонсайд процесс (lanxide process)	2-я половина XX в.	Формование деталей оксидной керамики путем окисления металлических Технические детали деталей-прекурсоров	Малогобаритные сложной формы	Технические детали
6.1	Испарение-осаждение (CVD)	2-я половина XX в.	Испарение - конденсация тугоплавких соединений на подложку-прекурсор	Полые сложной формы	Технические детали
2.9	Золь-гель формование	2-я половина XX в.	Литье самосхватывающихся коллоидных суспензий в непористые формы	Полые сложной формы	Технические детали
3.10	Лазерное спекание	XXI в.	Послойное спекание порошка лазерным лучом	Малогобаритные сложной формы	Технические детали
2.10	Экструзионная и стереографическая печать	XIX в.	Объемное послойное формование отверждаемых паст	Малогобаритные сложной формы	Технические детали

Рисунок 1.17 иллюстрирует как развитие всех трех групп основных способов формования (пластического формования, литья и прессования), так и появление многообразных специализированных способов формования, используемых для получения изделий сложной формы.

Остановимся подробнее на современном этапе развития технологии керамики, который во многом определяет уровень дизайна керамических изделий. Как верно было резюмировано в [6, С. 15, 18, 24] третий этап развития промышленного дизайна (1980-2000-е гг.) связан с переходом к математически моделируемым материалам и конструкциям, на следующем этапе - дизайн сплетается не только с конструированием, но и с инжинирингом. Таким образом, развитие цифровых (компьютерных) технологий за последние 20 лет привело следующим последовательным шагам в дизайне и технологии керамики:

1. Построение цифровых моделей изделий (полуфабрикатов), процессов их получения и эксплуатации с целью их визуализации и расчетов некоторых характеристик.
2. Инженерные расчеты изделий и процессов с целью определения поведения в изменяющихся условиях.
3. Внедрение цифровых технологий в проектирование, производство и (прежде всего, для изделий технического назначения) в эксплуатацию изделий.

В информационно техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям, опубликованном в конце 2015 г. среди перспективных технологий, обеспечивающих в производстве керамики ресурсо- и энергосбережение описываются цифровые технологии, элементы которых внедрены на многих предприятиях [89, С. 174-175].

Технология компьютерного проектирования включает в себя следующие стадии:

- анализ аналогов и прототипов по структурированным данным электронных баз;
- 3D-моделирование и визуализация;
- расчет материалов и технико-физических характеристик изделия;

- автоматизированное создание конструкторской документации.

### **Анализ аналогов и прототипов по структурированным данным электронных баз**

Для создания нового дизайна изделия требуется проведение анализа аналогов и прототипов. Анализ включает в себя исследования технологических, художественных и эксплуатационных свойств прототипов, их сравнительное сопоставление и выбор аналогов. Обычно анализ предваряется длительными поисками образцов или их графических представлений. Часто необходимо проведение практических или социологических исследований. Эта стадия проектирования в традиционном подходе ее решения требует много времени, частых согласований с заказчиком и нередко значительных финансовых затрат. Для решения этих трудностей традиционного проектирования в компьютерном способе применяются структурированные базы аналогов и прототипов проектируемого изделия. Надо отметить, что создание таких баз было началось уже с первого этапа развития промышленного дизайна [6, С. 15, 25] и было весьма развито на втором этапе, однако тогда эти базы представляли собой бумажные каталоги или альбомы стандартных технических решений, не могли охватить всю гамму требований потребителей и постоянно меняющихся возможностей технологии. С их помощью можно было облегчить (ускорить) проектирование, но нельзя было оперативно вносить изменения в базы и модифицировать имеющиеся в них элементы.

Между тем, элементы баз (прототипы) и их системоприобретенные свойства и отношения дают возможность закономерного оперирования субэлементами (свойствами элемента), выявленными в процессе структурирования. Анализ, приводимый для создания современной базы, состоит из 3 этапов: 1) создание структурированной базы; 2) вывод необходимых (технологических, эргономических и др.) следствий на основе раскрытых закономерностей; 3) приоритетное сопоставление выводов, определяющее форму изделия в соответствии требованиям технического задания. Выполнение первых двух этапов требует определенных затрат, однако при решении конкретной задачи осущест-

вление этих этапов задается узкими рамками своеобразного набора прототипов. И при выполнении последующих однотипных проектов может понадобиться лишь рациональное пополнение имеющейся базы. На третьем этапе пользуются выводами, и наглядностью базы, представленной в графическом исполнении. Анализ, ограниченный этим этапом, проводится довольно быстро и не требует профессиональных навыков.

Что касается качества, такой подход позволяет перейти от классического, преимущественно описательно-эмпирического анализа к абстрактно-теоретическому уровню исследования; основу этого перехода составляет использование структурного метода, моделирования, а также элементов формализации и математизации.

### **3D-моделирование и визуализация**

Весьма целесообразным способом выполнения эскизов является трехмерное моделирование с различной степенью детализации - от упрощенных, абстрактных представлений проектируемого изделия в качестве предварительных эскизов, до подробного фотореалистично визуализированного эскиза и сопутствующих изображений с имитацией декора и предметной среды.

### **Расчет материалов и технико-физических характеристик изделия**

Анализ технико-физических характеристик осуществляется посредством моделирования состояний полуфабриката на различных стадиях передела. Что делает возможным рациональное корректирование технологической модели проектируемого изделия с учетом изменений параметров полуфабриката в процессе производства (сушки, обжига).

### **Автоматизированное создание конструкторской документации**

Для создания конструкторской документации используются программы твердотельного моделирования. Большинство таких программ имеют собственный инструментарий для создания чертежей и пр. Их оформление сводится к ручному рисованию с расстановкой необходимых данных при помощи специальных инструментов, значительно упрощающих задачу. Существуют про-

граммы, предлагающие большую степень оптимизации данного процесса. В них автоматически создаются указанные проекции и разрезы изделия, наносятся размеры и другие элементы оформления.

Современные компьютерные методы моделирования и анализа значительно превосходят по скорости классическое проектирование, предлагают более высокое качество изделия и его проектно-графического сопровождения.

Существенный прогресс достигнут в области применения цифровых способов формования, спекания и декорирования керамических изделий.

Прежде всего, следует отметить интенсивные разработки в области аддитивных технологий (3D-печати) [113, С. 465-467], с помощью которых можно формовать, а, в некоторых случаях, спекать сложные миниатюрные изделия, не прибегая к использованию форм и печей.

В таблице 1.5 приведены основные разновидности способов 3D-печати, отличающиеся по состоянию печатающей среды (порошок, паста, суспензия), по способу печати (экструзия, печать каплями, ламинирование, стереолитография), по наслаиваемым элементам (нити, капли, слои, частицы порошка). В основном для печати используют растворы и расплавы полимеров, которые связывают дисперсные частицы порошков в микрообъемах (элементах печати), последовательно наслаиваемых друг на друга. Такие способы формования предполагают использование ультрадисперсных (в том числе нанодисперсных) порошков, создающих структуру керамики с новым уровнем свойств (механических, электрофизических и др.).

Печать используют, как для непосредственно быстрого прототипирования – изготовления моделей и форм из пластика или гипса, так и для формования полуфабрикатов из наполненных порошком полимерных паст, суспензий или самих порошков. Стереолитографическая печать, при которой наносимая послойно полимерная паста отверждается лучом лазера (SLA) подобна способу непосредственно селективного спекания порошков лучом лазера (SLS).

Таблица 1.5 – Характеристики основных способов формования заготовок и изделий с использованием технологий «быстрого прототипирования» и «быстрого производства»

Метод	Технология	Используемые материалы	Сущность способа	Некоторые характеристики	Применение	Начало применения
Экструзионный Material extrusion	<u>Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)</u>	Термопластики (такие как полилактид (PLA), акрилонитрил-бутадиенстирол (ABS) и др.)	Наслаивание полимерными нитями, подплавляемыми в экструдерах	Размер элементов печати 30-500 мкм, толщина слоя 18-33 мкм, ширина линии 50-2500 мкм	Быстрое прототипирование (пластиковые модели и формы), быстрое производство (игрушки, украшения, сувениры, композитные детали для аэрокосмической промышленности)	1988
Material etting	Моделирование методом напыления с последующим фрезерованием слоя (Drop On Demand Jet, DODJet)	Литейный воск	Одновременное распыление материала модели и поддержки	наполнение порошком 50 %, толщина слоя до 12 мкм Размер капли 10-150 мкм. Ширина линии 20-5000 мкм	Стоматология, ювелирное производство	
Проволочный Directed energy deposition	<u>Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF<sub>3</sub>) (EBM)</u>	Практически любые металлические сплавы	Наплавление металлической проволоки электронными пучками в условиях вакуумной камеры	Ширина линии 0,08-20 мм	Быстрое производство сложных металлических деталей в условиях вакуумной камеры Изделия для медицины	1997

Метод	Технология	Используемые материалы	Сущность способа	Некоторые характеристики	Применение	Начало применения
Порошковый Powder bed fusion	<u>Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)</u>	Любые металлы и сплавы в порошковой форме	Послойное спекание порошков лучом лазера	Толщина слоя до 20 мкм	Быстрое прототипирование, быстрое производство готовых изделий малого и среднего размера в различных отраслях, включая аэрокосмическую, стоматологическую, медицинскую	1971 г.
Powder bed fusion	<u>Выборочное лазерное спекание (SLS)</u>	Термопластики, металлические порошки, керамические, стеклянные порошки	последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности.	Толщина слоя 20-100 мкм, диаметр пятна 100-500 мкм	Функциональные детали сложной геометрической формы	1986
Powder bed fusion	<u>Выборочная лазерная плавка (SLM)</u>	Титановые сплавы, кобальтохромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий	Послойная плавка порошков с помощью лазерного луча в атмосфере инертного газа	Толщина слоя 20-100 мкм	Детали и изделия для медицины и аэрокосмической техники	2000 г.
Powder bed fusion	<u>Выборочное тепловое спекание (SHS)</u>	Порошковые термопластики	Плавка слоев термопластического или металлического порошка с помощью теплового излучателя.	Толщина слоя до 100 мкм	Производства недорогих функциональных прототипов	2011
Струйный Material etting Binder jetting	<u>Струйная трехмерная печать(3DP)</u>	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси	Послойное построение гипс, самые разные материалы, включая пластики, песчаные смеси и даже металлы.	Толщина слоя до 90 мкм Размер капли от 10 до 150 мкм Ширина линии 20-5000 мкм	Сувениры, украшения или макеты не подверженных высоким механическим нагрузкам. Биология, кондитерское дело	1993

Метод	Технология	Используемые материалы	Сущность способа	Некоторые характеристики	Применение	Начало применения
Material etting Binder jetting	Многоструйное моделирование	Термопласты, воски, фотополимеры	Построение послойной модели с помощью печатной головки с множеством сопел	Толщина слоя до 16 мкм	Стоматология, ювелирное дело, промышленный и архитектурный дизайн, разработка электронных компонентов и пр.	
Ламинирование Sheet lamination	<u>Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)</u>	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка	последовательное склеивание листового материала	Толщина слоя до 100 мм	Быстрое прототипирование	1985 г.
Полимеризация Vat photopolymerization	<u>Стереолитография (SLA)</u>	Фотополимеры жидкие фотополимерные смолы	Наслаивание полимера, отверждаемого под действием ультрафиолетового лазерного луча	Толщина слоя 50-150 мкм Ширина линии от 0,01 до 5 мкм	Быстрое прототипирование, быстрое производство производстве прототипов стоматологических протезов и ювелирных изделий.	1984-86 г.
	<u>Цифровая светодиодная проекция (DLP)</u>	Фотополимеры	Последовательное проецирование изображения слоя до затвердевания полимерной смолы	Толщина слоя до 15 мкм	Стоматологии, ювелирной промышленности, свободном дизайне и в производстве сувениров.	

Использование технологий быстрого прототипирования экономит время и материал при изготовлении моделей и форм, используя компьютерную 3D-модель, и позволяет изготавливать полуфабрикаты очень сложных форм с прецизионным разрешением.

САЕ-технологии (построение твердотельных моделей с учетом свойств материала, расчет поведения при механических нагрузках и т. д.) используются для изготовления необычно сложных технических и архитектурных деталей [119, 120, 6, С. 15, 25], технологии 3D-печати уже используются для формования (печати) высокопористых полуфабрикатов со сложной структурой [121, 122], и целых зданий из глины, армированного бетона, геополимера и лигнина [123, 124].

Способы печати (формообразования) в основном характеризуются размерами элементов печати (отверждаемой или спекаемой областью), которая может быть как точечной, так и плоскостной. Точность воспроизводства в материале созданной в 3D-модели формы определяется, как техническими возможностями способа (диаметром используемого сопла, пятна луча лазера и т. д.), так и применяемыми материалами (суспензиями, пастами, порошками).

Для получения высокой чистоты поверхности формуемого полуфабриката (изделия) необходимо стремиться к уменьшению области печати [139]. Для некоторых способов, например, для самой распространенной экструзионной печати, характерно образование достаточно высокой шероховатости поверхности, что связано размерами областей печати не менее 30-50 мкм.

Начиная с 2016 г. аддитивные технологии [125] прочно вошли в производство. Структура их использования очень широка и охватывает, прежде всего, конструирование и изготовление деталей в автомобилестроении (29,6 %), авиастроении и обороне (17,8 %), а печать инструмента и оснастки находится на 3 месте (7,5 %). По другим данным [126] в применении АТ лидируют промышленность и машиностроение (20 %), аэрокосмический сектор (17 %) и автомобилестроение (14 %)

В табл. 1.5 представлены основные способы формования методом 3D-печати, используемые как для «быстрого прототипирования» – изготовления объемных макетов изделий, моделей и форм для их производства, так и для «быстрого производства» - изготовления изделий сложных форм из пластиков, металлов, композиционных материалов, керамики. Табл. 1.5 составлена по материалам следующих специализированных сайтов [127-132], а также по статье [133] и докладу [134].

Необходимо отметить, что большинство способов находит применение для изготовления деталей из пластиков или композитов на их основе. Это связано с относительной легкостью фиксации структуры полимеров в результате фазового перехода жидкое-твердое и практически моментальным набором прочности заготовкой. Значительный прогресс достигнут в формовании изделий из металлических порошков. Для формовочных масс, используемых в производстве керамики (алюмосиликатов, оксидов, нитридов и т. д.), эффективность аддитивных методов производства во многом определяется связкой (см. раздел 2).

Многочисленность способов, разработанных для формования изделий сложной формы и основанных на принципе наслаивания формируемого материала, вызывают сложность их классификации. Поэтому в таблице приведены как русские, так и иностранные термины, обозначающие ту или иную технологию.

Так, согласно стандарту ASTM [135] аддитивные технологии классифицируют по принципу создания материала на 7 категорий:

1. **Material extrusion** – «выдавливание материала»
2. **Material etting** – «разбрызгивание материала» «струйные технологии»
3. **Binder jetting** – «разбрызгивание связующего»
4. **Sheet lamination** – «соединение листовых материалов»
5. **Vat photopolymerization** – «фотополимеризация в ванне»
6. **Powder bed fusion** – «расплавление материала в заранее сформированном слое»

7. **Directed energy deposition** «прямой подвод энергии непосредственно в место построения».

В одном из последних обзоров, посвященных коллоидным способам производства [136], приводится деление аддитивных технологий на 5 основных категорий (рис. 1.18): печать чернилами или проволокой, печать каплями, стереолитография (отверждение ультрафиолетовым лучом), печать каплями связки и селективное лазерное спекание.

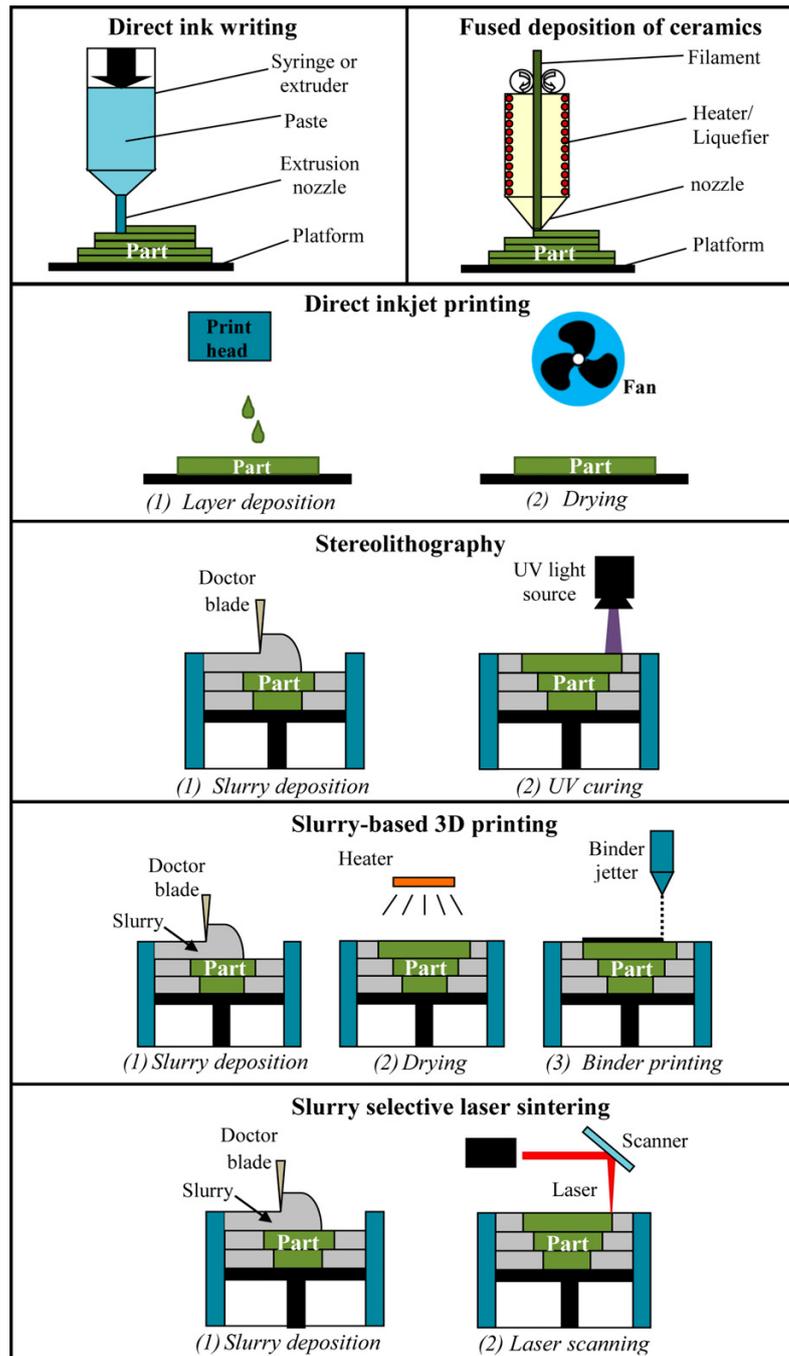


Рисунок 1.18 – Схематическое изображение основных способов аддитивных технологий [138]

В работе [137] (рис. 1.19) приведена, на наш взгляд, наиболее полная и краткая классификация методов 3D-формования, охватывающая как способ печати, так и характеризующая применяемые исходные материалы и средства образования слоя – точечный (каплю), линейный (проволоку или луч), планарный (пластину или луч).

В целом, классификации способов, приведенные на рис. 1.18 и рис. 1.19, совпадают.

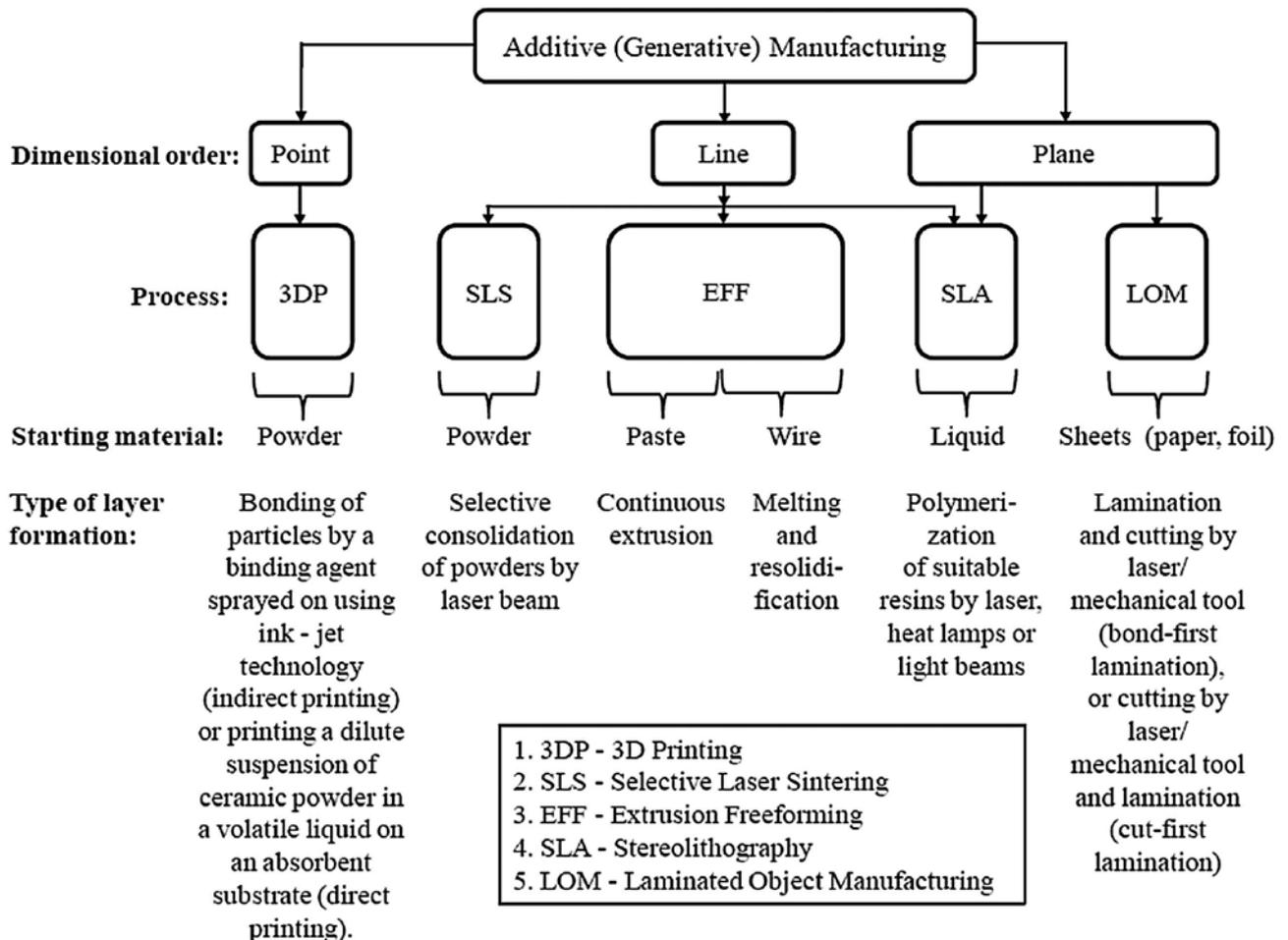


Рисунок 1.19 – Классификация аддитивных технологий (по [137])

Другим, пожалуй, важнейшим направлением аддитивных способов производства является получения миниатюрных деталей, используемых в активно развиваемых нанотехнологиях [140]. Известными ранее способами формования было невозможно или очень сложно получить столь малые изделия или создать, например, регулярные структуры мезопористых материалов [136, С. 11-15].

Важная характеристика способов аддитивных технологий – скорость печати. В зависимости от способа скорость роста материала колеблется от 0,05 до 5 мкм<sup>3</sup>/с для наплавки и нанолитографии, 0,25-60 мм<sup>3</sup>/с – для печати каплями. Наибольшие линейные скорости печати достигаются экструзионными способами – до 300 мм/с [133, С. 618]. С усовершенствованием способов печати их производительность возрастает, но печать массивных и крупногабаритных изделий достаточно длительный процесс.

Итак, аддитивные технологии предназначены, прежде всего, для производства изделий сложной формы, которые при других способах производства потребуют применения сложного оборудования, специальной оснастки и будут мало технологичными. Однако их внедрение, удешевление и массовое использование потребует новых подходов к формообразованию. Эти технологии, используя специальные формовочные массы, позволят существенно экономить материал за счет создания более эффективных конструкций (топологическая оптимизация), что неминуемо изменит внешний вид изделия, а во многих случаях создаст новую конструктивистскую эстетику. Так, массу кронштейна для реактивного двигателя, изготовленного методом 3D-печати, по сравнению с массой оригинала удалось уменьшить более чем в 4 раза (на 84 %), при этом изменился его внешний вид [141].

В развитии аддитивных технологий можно отметить 3 периода – от использования 3D-печати для создания моделей и форм (быстрое прототипирование) до современных исследований, посвященных созданию структур новых материалов и сложных форм, отображающих принципиально новые конструкции (табл. 1.6).

В отличие от времен расцвета конструктивизма новое поколение разнообразных изделий – от технических деталей до бытовых изделий и архитектурных объектов, изготовленных с использованием аддитивных технологий, будет базироваться не на конструкторском наборе модулей, имеющих в своей основе кристалломорфные формы – пластины, параллелепипеды, балки. Новые технологии позволят строить изделия из микроэлементов материала, подобно росту

живых организмов из клеток. Очевидным станет преобладание органоморфных форм сложных конструкций (рис. 1.20).

Таблица 1.6 – Периоды развития аддитивных технологий

Характеристика	Периоды развития		
	1 период	2 период	3 период
Для чего используется	Быстрое прототипирование	Изготовление изделий сложных форм, включая их малотиражное производство	Создание нового поколения конструкций и материалов
Какие материалы и изделия	Макеты и модели сложных форм из пластиков	Изделия из пластиков, металлов, керамики, композиционных материалов	Изделия из композиционных материалов особых конструкций



Рисунок 1.20 – Сетчатая конструкция для бетонного строительства и элемент головки робота для ее создания методом АТ [124, С. 58]

Дальнейшее развитие аддитивных технологий позволит снизить влияние технологичности (учет сложности производства изделия) и повысить долю функциональности в предметном дизайне. Формообразование изделий будет все более опираться на расчеты их поведения в условиях эксплуатации, при этом производство (технология) проектируемого изделия станет уходить на второй план, т. к. затраты на производство практически не будут зависеть от внешней формы и конструкции спроектированного изделия.

**Выводы по разделу 1.2:**

1. При проектировании формы керамического изделия необходимо рассматривать все стадии жизненного цикла.
2. Ресурсоэффективность керамического изделия во многом определяется стадией его проектирования.
3. Эволюция форм керамического изделия идет по пути их усложнения, облегчения массы, повышения функциональности.
4. Эволюция способов формования позволила увеличить производительность, формировать изделия сложной формы, в ряде случаев сократить количество технологических стадий.
5. Внедрение цифровых технологий в производство позволяет сократить время производства, и перенести акцент разработки на оптимизацию эксплуатационных характеристик.
6. Развитие аддитивных технологий приведет к новому этапу формообразования изделий с преобладанием биоморфных сложных форм, затраты на производство которых будут снижаться.

**Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Цифровые технологии в производстве керамики [Текст] / **Захаров А. И.**, Безменов А. И. Андреев Д. В. // Техника и технология силикатов. 2018. № 1. С. 12-16.
2. Крахматова В. Ю., **Захаров А. И.**, Андреев Д. В., Кривощепов А. Ф. Методы аддитивных технологий для производства керамических изделий (обзор). // Стекло и керамика. 2018. № 12. С. 26-33.
3. **Захаров А. И.** Наилучшие доступные технологии производства керамических строительных материалов как инструмент экологического нормирования отрасли. К выходу отраслевого информационно-технического справочника «Производство керамических изделий» ИТС [Текст] / Гусева Т. В., **Заха-**

**ров А. И.**, Молчанова Я. П., Вартамян М. А., Акберов А. А. // Строительные материалы. 2016. № 4. С. 4-10.

4. **Захаров А. И.** Программа гармонизации экологических стандартов как инструмент повышения эффективности производства строительной керамики [Текст] / Бегак М. В., **Захаров А. И.** // Строительные материалы. 2009. № 4 С. 17-19.

5. **Захаров А. И.** Перспективы повышения энергетической и экологической результативности производства изделий из керамики [Текст] / **Захаров А. И.**, Гусева Т. В., Бегак М. В., Вартамян М. А. // Стекло и керамика. 2009. № 10. С. 19-25.

6. **Захаров А. И.** Совершенствование энергоэффективности производства керамической плитки: сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта [Текст] / **Захаров А. И.**, Вартамян М. А., Молчанова Я. П., Аверочкин Е. М., Кастрицкая С. В. // Строительные материалы. 2013. № 8. С. 41-43.

7. Guseva T., **Zakharov A.**, Vartanyan M., Molchanova Ya., Makarov N. Identifying Best Available Techniques for Ceramic and Glass Industries in Russia. Proceedings of the 16-th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. SGEM. 2016. Book 5. Vol. 1. P 351-358.

8. **Захаров А. И.** Наилучшие доступные технологии и комплексные экологические разрешения: перспективы применения в России [Текст] / Бегак М. В., Гусева Т. В., Боравская Т. В., Руут Ю., Молчанова Я. П., **Захаров А. И.**, Сивков С. П. Под ред. М. В. Бегака. М.: ООО «ЮрИнфоР-Пресс», 2010. 220 с.

9. **Захаров А. И.** Форма керамических изделий: философия, дизайн, технология [Текст] / **Захаров А. И.**, Кухта М. С. Томск: СТТ, 2015. 224 с. (сер. Дизайн и общество).

10. **Захаров А. И.** Дизайн керамических изделий: энергосбережение как общий тренд [Текст] / **Захаров А. И.**, Безменов А. И, Голдобина В. Ю. // GAUDEAMUS IGITUR. 2015. Т. 1. № 1. С. 17-21.

11. **Захаров А. И.** К вопросу о выборе маркерных показателей для производства керамических изделий [Текст] / **Захаров А. И.**, Гусева Т. В., Молчанова Я. П., Вартанян М. А., Щелчков К. А. // Наилучшие доступные технологии. Применение в различных отраслях промышленности. М.: Издательство «Перо». Выпуск 3. 2015. С. 32-42.

## Выводы по разделу 1

1. Современный поход к промышленному дизайну изделий опирается на понятие жизненного цикла, включающего в себя все стадии разработки, производства, эксплуатации изделия. Проектирование изделия должно опираться на сочетание экономических, эстетических и экологических требований к продукту, при этом роль потребителя многократно возросла за время существования промышленного дизайна, как отдельной области творчества.

2. Актуальные требования к энергоэффективности, технологичности и полифункциональности керамического изделия во многом определяют его формообразование. Форма изделия определяет способ формования и значительное число технологических стадий, а также влияет на ресурсоэффективность процесса и возможность образования брака.

3. Эволюция способов формования керамических изделий шла по пути увеличения производительности способов и усложнения форм. Количество способов формования и их разновидностей многократно возросло со времени промышленной революции.

4. Современный этап развития формообразования в технологии керамики связан с цифровыми, прежде всего, аддитивными технологиями, которые позволили сократить время проектирования и изготовления изделия, спрогнозировать его поведение при производстве и эксплуатации, что должно увеличить технологичность производства, предотвратить преждевременную потерю потребительских свойств. Новые способы формования керамических изделий способом 3D-печати в сочетании с использованием нанопорошков открывают новые перспективы в области создания керамических изделий с полифункциональными свойствами.

5. Разработка общих научных подходов к проектированию формы керамических изделий позволит расширить диапазон дизайнерских решений и оптимизировать технологию производства.

Научные результаты, изложенные в разделе 1, были использованы при подготовке информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 4-2015 «Производство керамических изделий», который является документом национальной системы стандартизации, разработанным в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2014 г. № 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям». Ранее, в 2012-2013 гг. научные результаты нашли применение при разработке национальных стандартов ГОСТ Р 55645-2013 «Ресурсосбережение. Производство керамической плитки. Руководство по применению наилучших доступных технологий повышения энергоэффективности и экологической результативности» и ГОСТ Р 55646-2013 «Ресурсосбережение. Производство кирпича и камня керамических. Руководство по применению наилучших доступных технологий повышения энергоэффективности и экологической результативности» (письмо Федерального государственного автономного учреждения «Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики» об использовании результатов диссертационной работы от 25.12.2017 № 07-2/Б/617, приложение 1.1).

## **2 Методология проектирования формы керамического изделия: критерии сложности формы**

### **2.1 Сложность формы изделия как мера технологичности**

Основной областью исследований в материаловедении и технологии материалов долгое время оставался так называемый причинно-следственный треугольник «состав-структура-свойства», дополненный [142] еще одной «вершиной» – размером (дисперсностью) частиц материала. Академик И. В. Тананев называл эту связь формулой, устанавливая иерархию – подчиняя свойства структуре, а ее, соответственно, дисперсности и составу материала. Однако, если говорить о структуре поликристаллических материалов (в том числе о структуре керамики), то становится понятным, что столь строгой иерархии не может существовать. Основные свойства керамики (механические, теплофизические и др.) являются структурно чувствительными, но получить подобные структуры (и, соответственно, во многом подобные свойства) возможно из различных материалов или из материалов различной дисперсности. Изменение дисперсности материала дает возможность изменить тип структуры, изменить и, иногда расширить, уровень свойств. Так, в последнее время в связи с революционным развитием нанотехнологий, основанных на получении и использовании частиц материалов с размерами менее 100 нм, появились возможности организации структур материала с новым уровнем свойств.

Формула И. В. Тананева «состав-дисперсность-структура-свойства» на деле представляет собой своеобразную пирамиду с вершиной «свойства» и горизонтальными связями между вершинами треугольника основания. С уменьшением дисперсности материала и увеличением поверхности частиц обычно изменяется их химический состав за счет нарушения кристаллической структуры материала на поверхности, нескомпенсированных химических связей и наличия примесей. В свою очередь состав материала определяет возможность получения частиц определенного размера, т. е. «состав» и «дисперсность» влияют друг на друга.

В результате формования полуфабриката керамического изделия формовочная смесь, независимо от способа формования, приобретает неравномерную структуру, объяснимую отличием структуры материала вблизи границ полуфабриката. Степень уплотнения и текстурирования (возникновение преимущественной ориентации частиц) материала на границе полуфабриката зависит от способа формования и задаваемой формы изделия. Очевидно также, что конечные физико-химические свойства керамического изделия (не говоря о функциональных) будут в значительной степени зависеть от конструкции изделия.

Так, воспринимаемые изделием механические и термомеханические нагрузки определяются не только свойствами керамического материала, но и конкретной формой изделия. Для керамических конструкций (керамическая плитка, санитарные керамические изделия и др.), как в зарубежных, так и в ряде отечественных стандартов, помимо удельных величин предела прочности, регламентируется разрушающая нагрузка – величина статического механического усилия, приложенного к изделию [143, 144].

Таким образом, при формулировке потребительских свойств любого керамического изделия недостаточно опираться на свойства материала, из которого изделие должно быть изготовлено, необходимо определять свойства самого изделия, зависящие от его формы и конструкции. С другой стороны, технологические свойства изделия также не могут быть полностью описаны технологическими свойствами материала. Так, низкая чувствительность глинистого сырья к сушке не может быть гарантией бездефектной сушки полуфабриката, необходимо учитывать соответствие скорости сушки массивности изделия. Особенности производства керамических изделий позволяют оптимизировать производственный процесс, используя наиболее эффективный способ формования и максимально приближая форму полуфабриката к форме готового изделия. В итоге форма изделия во многом определяет всю «технологическую нитку» – способ подготовки сырьевых материалов, способ формования, особенности сушки и обжига и, если речь идет об изделиях не технического назначения, способ декорирования.

Роль формы изделия значительна для стадий проектирования, сбыта и эксплуатации, а на стадии производства роль формы полуфабриката, столь велика, что для полного описания продукта, причинно-следственный треугольник «состав-структура-свойства» должен быть превращен в тетрагональную дипирамиду, – основанием которой является упомянутый треугольник, а вершинами – размер (элементов структуры или исходных частиц) и форма (изделия) (рис. 2.1). Рассмотрим роль формы керамических полуфабрикатов и изделий в технологии керамики.

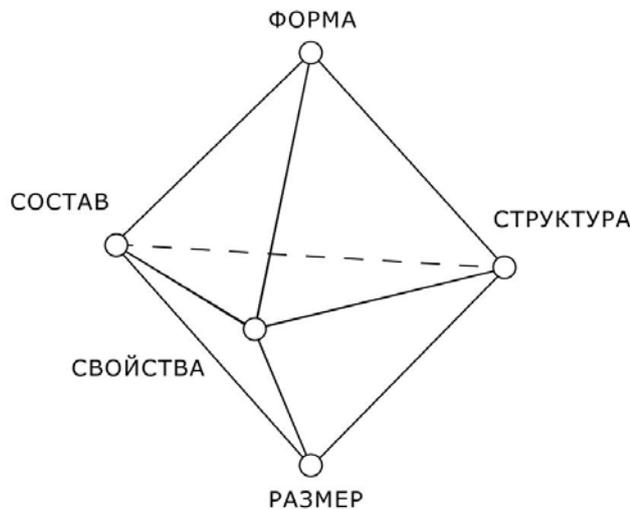


Рисунок 2.1 – Дипирамида связей материала и изделия

Если обобщить научные подходы, учитывающие влияние формы изделия при формовании, термообработке, а также в условиях эксплуатации, когда осуществляется тепло- и массообмен изделия с окружающей средой, то можно убедиться, что решающее значение приобретает так называемый определяющий размер изделия. Определяющий размер, в качестве физического параметра входит в уравнения, описывающие критерии подобия. Иногда он совпадает с толщиной изделия, но для учета влияния конфигурации изделия используют характерный размер тела или приведенную толщину (табл. 2.1). Расчет приведенной толщины особенно важен для процессов, связанных с теплопередачей.

Геометрическое подобие заготовки и изделия, участвующего в процессах уплотнения (формование, сушка, спекание) под действием сил различной природы определяется подобием действия этих сил через границы твердого тела.

Таблица 2.1 – Критерии подобия, описывающие процессы технологии керамики

Стадия изготовления	Процессы	Критерии подобия, описывающие процессы
Формование	Уплотнение с минимальным влиянием внешнего трения	Критерий Пуассона $\frac{F}{E \cdot l^2}$
Сушка	Нагрев и испарение влаги. Уплотнение за счет сил поверхностного натяжения	Критерий Био: $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda},$ Массообменный критерий Кирпичева: $Ki_{m0} = (R_v^2 / a_m) (N/W_0)$
Обжиг	Нагрев и охлаждение. Уплотнение за счет сил поверхностного натяжения.	Радиационный критерий Био $Bi_{rad} = \frac{\sigma_0 T_0^3 l_0}{\lambda},$

Обозначения:  $F$  – сила;  $t$ ,  $T$  – время;  $m$  – масса;  $E$  – модуль упругости;  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $k$  – коэффициенты, соответственно, теплоотдачи, теплопроводности, массоотдачи, массопроводности;  $\sigma$  – постоянная Больцмана;  $l$  – характерный линейный размер тела;  $R_v$  – отношение объема тела к его поверхности;  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги;  $N$  – скорость сушки;  $W_0$  – начальное влагосодержание.

При формовании приложением внешних механических нагрузок (прессование, трамбовка, штамповка и т. д.) в закрытую форму усилия, распределенные по площади одной стороны заготовки, ослабляются в результате внешнего и внутреннего трения формируемого материала. Поэтому плотность и однородность заготовки возрастают при увеличении площади приложенных усилий и соответственно, уменьшении размера заготовки в направлении усилий формования. Эффективными оказываются такие способы формования, которые обеспечивают укладку и уплотнение частиц материала на максимально большой площади заготовки. Так, наибольшую однородность и плотность заготовок получают способами изостатического и квазиизостатического прессования через упругую резиновую оболочку. При формовании с использованием сил поверхностного натяжения, которые велики в дисперсных системах, или полимеризации-конденсации (шликерное литье, золь-гель и др.) формование, казалось бы, дает возможность получать однородные изделия сложной формы, однако, с увеличением габаритов и приведенной толщины изделий неоднородность заготовки также возрастает.

При сушке и обжиге тепло- и массообмен, определяющий уплотнение и усадочные явления в материале, осуществляется через поверхность заготовки и

длительность процессов определяется ее толщиной. Уменьшение толщины заготовки приводит к ее более быстрому прогреву, уменьшению времени диффузии через тело заготовки паров воды и газов, равномерному распределению образующейся жидкой фазы и быстрому охлаждению спеченного изделия.

Определяющий размер изделия не имеет прямой связи с его габаритами, хотя совершенно ясно, что с увеличением габаритов изделия пропорционально возрастают затраты энергии на его формование, сушку и обжиг. Однако, при увеличении габаритов изделий одинаковых пропорций (конфигурации или формы) приведенная толщина изделия, трактуемая как отношение его объема к площади поверхности, будет возрастать также пропорционально.

Определяющий размер ничего не говорит нам о собственно форме изделия, его конфигурации и пропорциях, хотя из практики известно, что затраты на изготовление изделия увеличиваются с усложнением его конфигурации. Роль приведенной толщины (определяющего размера) полуфабриката и изделия на каждой из стадий технологии будет подробнее рассмотрена ниже.

В целом, очевидно, что, если существует некие критерии (характеристики) сложности изделия, они должны нести в себе информацию об особенностях его формы. Причем с момента появления формы (оформления заготовки) на различных стадиях изготовления изделия оно подвергается энергетическим воздействиям различной степени интенсивности, которые могут привести к возникновению дефектов. В значительной степени сложность или простота формы изделия определяется сложностью или простотой его бездефектного производства, т. е. мера сложности определяется технологичностью.

Оценить сложность любого предмета можно, разделив его на простые объемы, с помощью которых можно понять взаимосвязь частей. Чем больше простых объемов требуется для построения такого предмета, тем он сложнее. Оценка сложности формы архитектурных объектов [145] может быть проведена по-разному. Например, сложность формы может быть описана с позиции геометрии, как разность объема объекта и объема простой геометрической фигуры, заданной максимальным размером объекта. С точки зрения психологии

восприятия, когда объект рассматривается как знаковая система. Наиболее сложным оказываются трудно описываемые (анализируемые) и, соответственно, трудно воспроизводимые объекты, содержащие во внешнем облике большое количество статистической информации (число элементов в системе).

В перечисленных подходах форма объекта оценивается по-разному: как единая и как совокупность более простых элементов.

В конструировании деталей и машин принято оценивать сложность формы как основную характеристику ресурсосбережения, выраженную отношением массы детали к массе условной детали в форме цилиндра или параллелепипеда, в которую можно вписать данную деталь [3, С. 223].

В конструировании машиностроительных изделий принят расчет коэффициента сложности изделия на основе разделения конструкции на составные части и учета трудоемкости изготовления отдельных частей по сравнению с аналогом [146]. Трудоемкость рассчитывается с учетом различных технических требований к детали и технологических особенностей (способов производства). В данном случае сложность формы является экономической характеристикой и учитывается в расчете технологичности.

При конструировании изделий задачу оптимизации формы изделия так же решают по-разному. Во-первых, это поиски формы, идеальной с точки зрения распределения воспринимаемых нагрузок и обеспечения ее устойчивости. Критерием идеальности формы служит снижение массы изделия, уменьшение толщины стенок. В результате сложных математических расчетов выводятся формулы, по которым определяются оптимальные пропорции предметов (простых форм – пластин, стержней и т. п., многослойных пластин с различными характеристиками слоев, оболочковых форм) для минимизации напряжений, возникающих при внешней нагрузке [147]. Однако, такие расчеты эффективны при конструировании отдельных деталей, испытывающих механические нагрузки, тогда как большинство рассматриваемых в работе керамических изделий должны обладать целым комплексом, прежде всего, функциональных свойств.

Ряд справочных пособий посвящен обобщению значительного производственного опыта: в них приведены шкалы сложности форм изделий для каждого способа формования и, в зависимости от типа производимых изделий, выдаются конкретные рекомендации по выбору материала, способов его формования и обработки. Такой опыт обобщен для производства изделий из пластических масс широкого ассортимента [148]. Подробные рекомендации значительно облегчают работу конструктора и дизайнера, дают возможность использовать для оптимизации формы изделия параметры стандартизации, унификации, себестоимость производства и т. д. Однако, таким образом определяется логика конструирования технических деталей, которая оставляет за пределами рассмотрения функциональные и эстетические требования к форме изделий.

Сложность формуемых изделий тесно связана их технологичностью, т. е. с низкой себестоимостью их производства по конкретной технологии. В металлургии и производстве изделий из пластмасс основные способы формования (литье, прессования, экструзия) подобны способам формования, используемым в производстве керамики. Сопоставление подходов к степени сложности формуемых изделий из различных материалов имеет смысл также из-за более массового, по сравнению с керамикой, производства сложных металлических и пластиковых изделий, в котором вопрос технологичности определяется в основном сложностью формования изделий.

В [149] предлагают изготавливать металлические изделия сложной формы способами обработки давлением и сварки, а способы порошковой металлургии (аналогичные способами технологии керамики) и прокатки использовать лишь для изготовления изделий простой геометрической формы.

Степень сложности или технологичность изделий в этих многотиражных производствах основном зависит от формы изделия и удобства их изготовления на разных стадиях производства. Классификация изделий по классам сложностей в технологиях пластмасс и металлов (табл. 2.2) основаны как на характеристиках формы изделий, так и на методах их формования [150-152].

Таблица 2.2 – Примеры групп сложности изделий из технологий пластмасс, порошковой металлургии, литья металлов

Группа сложности изделий	Материал и способ формования, источник		
	Пластмассы, прессование и литье [150]	Порошки металлов, прессование [151]	Металлы, литье [152]
Простые изделия	Монолитные изделия типа плит габаритными размерами до 50 мм с отношением высоты к длине не более 1:10 и разнотолщинностью не более 2:1 для прессованных изделий и 2,5:1 для литых изделий 2. монолитные изделия, имеющие форму тела вращения при отношении диаметра к высоте не более 1:2 и с габаритными размерами до 50 мм	–	м
1	Изделия без арматуры, резьбы и элементов, препятствующих свободному съему с формы, с неразвитой или малоразвитой поверхностью (количество элементов развитости < 4	Детали без отверстий с неизменным сечением по высоте, ограниченными 2 параллельными плоскостями, перпендикулярными направлению прессования	Простой геометрической формы без внутренних полостей
2	то же с развитой поверхностью (количество элементов развитости более 4).	С неизменным сечением по высоте, ограниченные 2 параллельными плоскостями, с 1 или несколькими отверстиями в направлении прессования с соотношением высоты изделия к толщине стенки $8 \div 10$	Коробчатой формы с наличием открытой внутренней полости простой формы

Группа сложности изделий	Материал и способ формования, источник		
	Пластмассы, прессование и литье [150]	Порошки металлов, прессование [151]	Металлы, литье [152]
3	любая развитость поверхности, 1-4 резьбы или несколько видов арматуры (не более 4), 1-4 поднутрений, оформляемых разъемными матрицами.	детали второй группы, но соотношением высоты изделия к толщине стенки $h/\delta > (8\div 10)$ ;	с наличием внешних криволинейных поверхностей и внутренних полостей открытой, более сложной формы
4	то же, комбинация резьбы и арматуры, 3 - 10 видов арматуры	с наружным или внутренним буртом и отношением $h/\delta \leq (6\div 8)$	с наличием внутренних полостей средней сложности и затрудненным выходом наружу.
5	более 10 видов арматуры, резьба с шагом менее 1 мм.	детали четвертой группы, но с отношением $h/\delta > (6\div 8)$	закрытой формы со сложными внутр. полостями.
6	количество резьб, видов арматуры и поднутрений - более 10, боковая резьбовая арматура	без отверстий, имеющие по высоте несколько сечений и переходов;	закрытой формы с наличием тонких сложных ребер и многоярусных внутр. Каналов
7	—	с отверстием, имеющие несколько наружных и внутренних переходов по высоте и детали, ограниченные не параллельными плоскостями или криволинейными поверхностями	—

Из рассмотрения табл. 2.2 следует, что в качестве критериев для оценки сложности используют следующие характеристики изделий:

- габариты и отношение высоты к длине (высоты к толщине стенки);
- наличие элементов, осложняющих формование: отверстий и внутренних полостей и каналов, резьб, арматуры, буртов, внутренних и наружных переходов по высоте, криволинейности и тонких сложных ребер.

В технологии керамики понятие групп сложности изделий присутствует в стандартах, отраслевых справочниках и заводских регламентах. Например, огнеупорные изделия, различают по форме и размерам [153], а количество групп сложности для конкретных категорий изделий (например, шамотных фасонных огнеупоров) доходит до 15 [154].

Так, на Подольском заводе огнеупорных изделий для высокоогнеупорных изделий из чистых оксидов группы сложности составляли по материалам: для наиболее распространенных изделий на основе оксида алюминия были приняты 9 групп сложностей; для изделий на основе оксида циркония – 3; для изделий из оксида магния группы сложности отсутствовали [155]. Изделия изготавливали шликерным литьем, экструзией и прессованием. Усложнение изделий (повышение группы сложности) было связано как с увеличением габаритов (емкости), так и ужесточением допусков по размерам. Наиболее сложными считали: капиллярные трубки и бусы для защиты электродов термопар с диаметром 2,5-10 мм и длиной 10-300 мм (6 группа сложности), трубки и чехлы прессованные (7 группа сложности), стержни для покрытия металлов защитным слоем керамики методом напыления диаметром 2,1-3,2 мм и длиной 380 мм (8 группа сложности) и особо сложные сплошные и полые изделия, изготовленные по чертежам заказчика. Из приведенной классификации видно, что сложность определяли технологичностью производства и не связывали непосредственно с формой изделия.

В производстве фарфоровой посуды, отличающемся очень широким ассортиментом и разнообразием способов формования (шликерное литье, раскатка, изостатическое прессование) изделия классифицируют по форме (полые и

плоские), размерам и емкости (мелкие, средние и крупные) и толщине стенки (обычные и тонкостенные) [156].

В производстве керамических строительных изделий также отсутствует шкала сложности – плитки различают по форме и размерам [157-159], кирпич – по видам, наличию пустот и размерам [55, С. 5-6], санитарные керамические изделия – по типам (видам) и размерам [160].

Классификация изделий по группам сложности часто используется для расчета трудозатрат при их производстве [161] и для облегчения проектирования формующей оснастки [162].

Совпадение основных принципов формования дает возможность корректного сопоставления технологичности изделий из таких разных материалов, как металл, пластик и керамика.

Так, при формовании способом литья расплав металла или нагретой пластической массы после заливки в форму переходит в твердое состояние с уменьшением объема, т. е. с усадкой. Наличие усадки накладывает ограничения на конструкцию форм, которая должна обеспечивать как бездефектную отливку без образования раковин и пузырей воздуха, так и легкость извлечения отливки из формы. Точность размеров, чистота поверхности и возможность получения неискаженного в результате отливки металлического изделия возрастают с уменьшением толщины стенки [163].

При шликерном литье керамических полуфабрикатов наблюдается подобные явления, связанные с отверждением в результате удаления влаги, усадка может достигать нескольких процентов, и конструкция изделия должна быть устойчива к усадочным напряжениям.

При формовании металлов, пластмасс и формовочных керамических масс, находящихся в пластичном состоянии, ограничением формы и габаритов изделий служит не столько наличие усадки, сколько вероятность образования разнонаправленных участков структуры материала – создание текстуры. Слои материала, прилегающие к формующему инструменту, будут иметь более выраженную ориентацию по сравнению с другими слоями, что может привести к

образованию трещин. Поэтому при таких способах формования как прокатка, раскатка, штамповка и др. стремятся ограничить толщину материала в направлении перпендикулярном поверхности формующего инструмента.

Наконец, при прессовании порошков металлов, пластиков и пресс-порошков смесей для получения керамики, существует опасность получения заготовок с неравномерной плотностью из-за влияния внешнего трения порошков о поверхность формы.

На предприятиях различных отраслей ассортимент выпускаемых изделий делят по группам сложности, учитывающим трудозатраты при их изготовлении, включая конструирование формующей оснастки.

На основе анализа групп сложности изделий из различных материалов можно предложить следующие степени сложности формуемых изделий:

- 1) простая геометрическая форма, отсутствие отверстий и пазов
- 2) простая форма, пазы и отверстия
- 3) сложная форма (криволинейные поверхности, асимметрия)
- 4) сложная форма, пазы и отверстия

Недостатком рассмотренных выше критериев (степеней) сложности изделий является то, что основное значение придается безусловно важной, но часто отнюдь не критической, стадии формования. Например, известно, что сушка и обжиг массивных изделий простой формы требует гораздо большего времени и подбора режимов нагрева и охлаждения, т. е. зачастую изделия простой формы оказываются более сложными и менее технологичными для всего производственного цикла, чем аналогичные изделия с пазами или отверстиями. Так, энергопотребление при сушке и обжиге в 1,5-2 раза выше для полнотелых керамических кирпичей, чем для перфорированных керамических блоков [88, С.].

Приведенные шкалы сложностей характерны для изделий, для которых стадия формования совпадает с фиксацией формы. Так при литье пластмасс и металлических сплавов оформление, заданное внешней формой, закрепляется в результате отверждения пластика или сплава. В технологии керамики приобретенная на стадии формования форма закрепляется на стадиях сушки (удаления

временной технологической связки) и обжига. Закрепление формы проходит в результате резкого повышения вязкости системы, происходящего сначала из-за удаления прослоек жидкой временной технологической связки (на стадии сушки), затем – в результате спекания (на стадии обжига). Таким образом, определяя критерии сложности керамических изделий, необходимо рассматривать все 3 стадии, в которых участвует оформленное тело.

Стабильность и активность изделия на разных этапах его изготовления и в эксплуатации будет зависеть от его формы, которая может быть представлена с помощью определяющего размера или фактора формы.

Так как в процессе изготовления и эксплуатации часто встречается однонаправленное воздействие на изделие, то возможен также учет его гидравлического радиуса изделия, описывающего сопротивление частицы в потоке – отношения площади сечения частицы к периметру проекции ее формы в направлении потока.

Рассмотрим определяющие размеры, гидравлические радиусы, факторы формы тел основных геометрических форм (табл. 2.3). Сопоставление определяющих размеров, рассчитанных для куба, шара, параллелепипеда, пластины и цилиндра приводит к следующим выводам:

При сопоставимых геометрических размерах приведенная толщина, равная половине толщины изделия, оказывается равной для изделий различной конфигурации.

Если оценивать приведенную толщину как гидравлический радиус [164], то, в зависимости от направления потока, необходимо учитывать или его минимальную, или максимальную величину, которая, в свою очередь, зависит от симметрии изделия.

Если оценивать приведенную толщину как отношение объема изделия к площади поверхности (фактор формы) [165], то можно убедиться, что она зависит как от формы, так и от габаритов изделия.

Таблица 2.3 – Геометрические характеристики основных тел простой формы

Форма тела	Определяющий размер, l	Площадь поверхности, S	Объем тела, V	Минимальный гидравлический радиус, $R_{hmin}$	Максимальный гидравлический радиус, $R_{hmax}$	Фактор формы, фактора f	Примеры изделий
Куб	Половина стороны куба $c/2=2$	$6c^2$	$c^3$	$c^2/4c = c/4 = 1$	$c/4 = 1$	$c/6 = 0,67$	–
Параллелепипед $c > a, b$	Половина стороны $c/2=2$ или $a/2=0,5$	$2(ab+bc+ac)$	$Abc$	$ab/(2(a+b)) = 0,33$	$ac/(2(a+c)) = 0,4$	$abc/2(ab+bc+ac) = 0,57$	Потнотельный кирпич
Пластина $c' \gg a, b$	Половина толщины $b/2=1$ или $a/2=0,5$	$2(ab+bc+ac')$	$Abc'$	$ab/(2(a+b)) = 0,33$	$ac'/(2(a+c')) = 1,8$	$abc'/2(ab+bc+ac') = 0,31$	Плитка
Шар	Половина диаметра (радиус) $D/2=2$	$\pi D^2$	$1/6 \pi D^3$	$(\pi D^2/4)/\pi D = D/4 = 1$	$D/4=1$	$D/6=0,67$	-
Полая сфера	Половина толщины стенки $(D-D_1)/4=0,25$	$\pi D^2 + \pi D_1^2$	$1/6 \pi D^3 - 1/6 \pi D_1^3$	$(\pi D^2/4)/\pi D = D/4=1$	$D/4=1$	$1/6(D^3 - D_1^3)/(D^2 + D_1^2) = 0,25$	Посуда
Цилиндр $h > D$	Половина диаметра (радиус) $D/2=2$	$\pi Dh$	$h\pi D^2$	$D/4=1$	$Dh/(2D+2h) = 1,3$	$h\pi D^2/4(\pi Dh + \pi D^2/4) = hD/4(h + D/4) = 0,9$	-
Труба	Половина толщины стенки $(D-D_1)/4=0,25$	$\pi Dh + \pi D_1 h + 1/2(\pi D^2 - \pi D_1^2)$	$h\pi(D^2 - D_1^2)$	$D - D_1 = 1$	$Dh/(2D+2h) = 1,3$	$h(D^2 - D_1^2)/(Dh + D_1 h + 1/2(D^2 - D_1^2)) = 0,61$	Трубы

В таблице приведены численные значения характеристик, рассчитанные для следующих значений:  $a = 1$ ,  $b = 2$ ,  $c = D = 4$ ,  $D_1 = 3$ ,  $c' = h = 8$ .

Сравнение факторов формы для объемных фигур, характеризующих форму различных изделий, было проведено в монографии [166], посвященной сушке огнеупоров. Вслед за В. Н. Зиминим автор монографии доказывает, что исчерпывающей характеристикой, определяющей продолжительность сушки фасонных огнеупоров, отличающейся разнообразной формой, является фактор формы (отношение объема заготовки  $V$  к площади ее поверхности  $F$ ):

$$f = V / S \quad (2)$$

Результаты многочисленных экспериментов, приводящиеся в монографии, в целом подтверждают степенную зависимость (3) времени сушки  $\tau$  от фактора формы  $f$  (отношения объема изделия  $V$  к площади его поверхности  $S$ ):

$$\tau = A f^n, \quad (3)$$

где  $A$  и  $n$  – коэффициенты, определяемые из опытов.

Использовать приведенное уравнение рационально при переходе от одного ассортимента изделий к другому (от заготовок одной формы к заготовкам другой формы) при неизменности используемого материала и условий сушки.

Зависимости скорости формования способом литья из расплавов изделий из металла и стекла также связывают с массой и толщиной охлаждаемых заготовок [167, 168]. Приведенную толщину изделия (отливки) учитывают при конструировании литейных систем [169].

Анализ литературы показывает, что сложность изделий оценивают, как величину обратную технологичности, по сложности их формы, которая затрудняет формование полуфабрикатов. Для стадий сушки и обжига проблему представляет термически массивные тела с большим фактором формы.

Теперь перейдем к рассмотрению влияния формы керамических изделий на их устойчивость в процессе службы (эксплуатации).

Известно, что одним из главных недостатков керамики, как конструкционного материала является ее хрупкость, поэтому при конструировании керамических изделий, в первую очередь, обращают внимание на обеспечение механической прочности изделия. Как верно сказано в [170], принципы конструирования керамических изделий отнюдь не ограничиваются обеспечением запаса

прочности на наиболее опасных по концентрации напряжений участках изделия, но должны включать в себя учет возможности замедленного разрушения, а также отличие в формах и размерах изделий, отличающихся от форм и размеров испытательных образцов. Последнее замечание особенно важно, т. к. результаты испытаний зависят от объема материала, находящегося под действием напряжений.

При эксплуатации керамических изделий часто решающее значение приобретает устойчивость к различному роду воздействий, при этом необходимо учитывать поверхность, форму и толщину изделий. В ряде случаев, например, когда изделие подвергается резкому нагреву или охлаждению, важна именно форма изделия и его толщина. Так в 2 из 4 так называемых критериев термостойкости, используемых для оценки способности керамического изделия сопротивляться разрушению из-за внутренних I напряжений рода, возникающих под воздействием резких перепадов температур, содержат информацию о форме и габаритах керамического изделия (через критерий Био или параметр поверхностной энергии) [171]:

$$\Delta T_p = RS[1/(0,31r_m)K], \quad (4)$$

где  $R$  – критерий термостойкости;  $S$  – фактор, зависящий от формы изделия;  $r_m$  – фактор, зависящий от размеров изделия;  $K$  – коэффициент теплопередачи от поверхности к окружающей среде.

$$R = \sigma_{пч}(1-\mu)/(E\alpha), \quad (5)$$

где  $\sigma_{пч}$  – прочность материала (предел прочности при изгибе, растяжении или сжатии);  $\mu$  – коэффициент Пуансона;  $E$  – модуль упругости;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения.

Прежде всего, при использовании керамики в качестве конструкционного материала, пытаются избежать концентраторов напряжений, проявляющих себя при механических усилиях [172-175]. Оптимизация формы изделий заключается в ликвидации или нивелировании концентраторов напряжений уменьшением разницы в толщине различных частей изделия путем образования переходных

частей, например, увеличения радиуса кривизны переходного контура между частями (рис. 2.2).

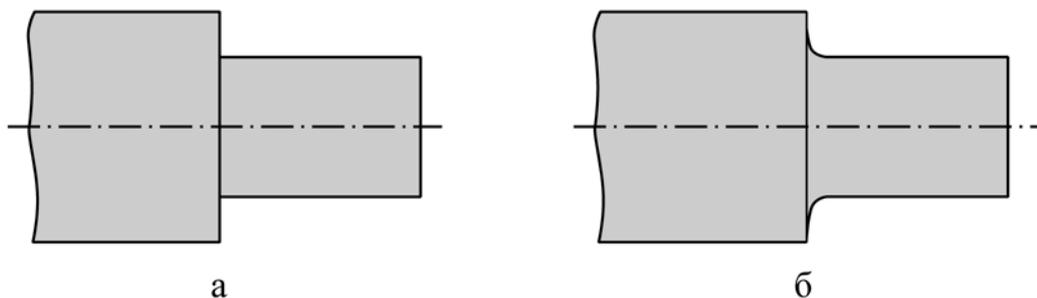


Рисунок 2.2 – Упрочнение конструкции изделия увеличением радиуса кривизны переходного контура между различными частями. а – изделие до коррекции, б – изделие после коррекции формы [175, С. 120]

Острые углы изделия образуют отдельные его части, отличающиеся развитой поверхностью. Помимо того, что на этих углах развиваются опережающие усадочные напряжения, углы более других частей подвержены опасности образования трещин и откалывания особенно во время ударных нагрузок. Наиболее эффективный способ избежать этих опасностей – сгладить контуры, увеличивая радиус их кривизны (рис. 2.3). Например, снятие фаски с ребер строительного керамического кирпича позволяет не только улучшить его внешний вид, но существенно уменьшить риск скалывания острых краев во время перевозки и использования.

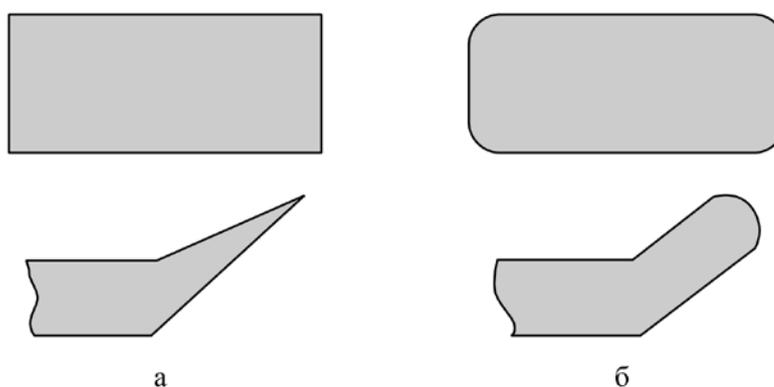


Рисунок 2.3 – Упрочнение конструкции изделия увеличением радиуса кривизны углов изделия между различными частями: а – изделия до коррекции, б – изделия после коррекции формы [175, С. 120]

Оптимизация формы изделия может быть выражена в изменении мест расположения отверстий (рис. 2.4), выполнении дополнительных отверстий в массивных частях (рис. 2.5), уменьшении толщины стенок в различных частях изделий (рис. 2.6).

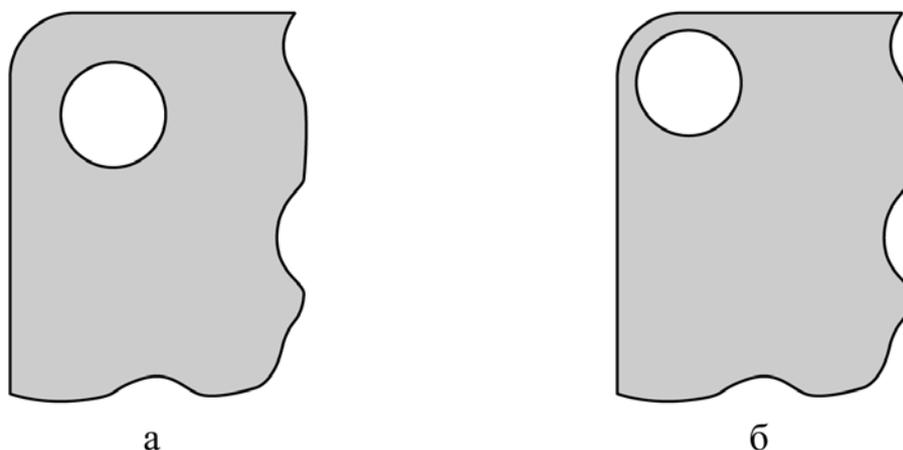


Рисунок 2.4 – Примеры расположение отверстий в керамическом изделии:

а – расположение отверстия с отступом от края позволяет нивелировать возникающие напряжения; б – отверстие, размещенное слишком близко к краю, возможно образование трещин, как при изготовлении, так и при эксплуатации [175, С. 124]

Расположение отверстий рядом с краем изделия вызывает опасность образования трещин в тонких стенках, образуемых между отверстием и краем изделия, из-за торможения объемных изменений массивной частью изделия при сушке, либо при температурных перепадах (термоударах). В таблице 2.4 указаны рекомендуемые [175, С. 124] расстояния от края керамических изделий в виде пластин. В этой же таблице приведены соотношения факторов формы пластины размером  $200 \times 200 \times h$  и сегмента, показанного на рисунке 2.4. При выполнении рекомендаций, указанных в таблице 2.4, с увеличением толщины пластины необходимо перемещать место расположения от ее края, при этом увеличиваются как фактор формы самого изделия, так и фактор формы указанного сегмента, а соотношение между ними меняется мало.

Правильно расположенные отверстия, выполненные в массивных частях изделия, значительно их облегчают и повышают термостойкость (рис. 2.5).

Таблица 2.4 – Рекомендуемое расстояние от отверстия до края керамического изделия в зависимости от его толщины и соотношения факторов формы фрагментов изделий

Толщина изделия $h$ , мм	Рекомендуемые расстояния от отверстия до края изделия	Заданная толщина пластины $h$ при диаметре отверстия 10 мм, мм	Отношение фактора формы пластины ( $200 \times 200 \times h$ ) к фактору формы сегмента (с учетом отверстия)
Менее 10	$1/4 h$	8	3,2
10 – 20	$1/5 - 1/6 h$	20	3,9
Более 20	$1/6 h$	36	4,3

При возможности замены отверстий, расположенных рядом с краем изделий на пазы с аналогичными радиусами закругления возрастает устойчивость изделия к термоударам. Этот прием (создание пазов, иногда вытянутой формы, но обязательно с достаточным радиусом закругления) используют для повышения термостойкости керамических пластин.

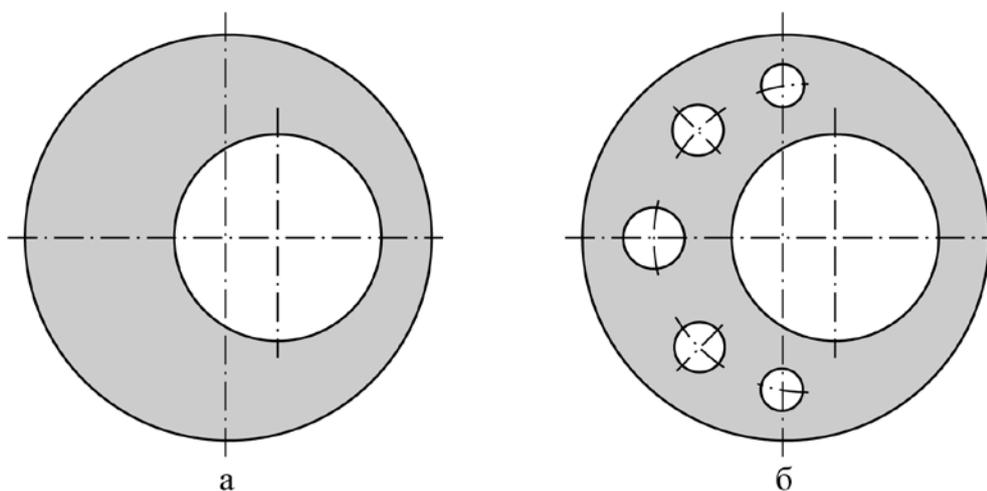


Рисунок 2.5 – Облегчение детали с помощью перфорации – прием, известный для металлических изделий, но работающий и для керамики  
а – форма до коррекции, б – после внесения коррекции [175, С. 122]

Придание конструкции жесткости и устойчивости при объемных изменениях, происходящих при термообработке, и эксплуатационных нагрузках мо-

жет заключаться в образование дополнительных ребер жесткости, или изменении формы конструкции на обеспечивающую более равномерное распределение нагрузок (рис. 2.7).



Рисунок 2.6 – Выравнивание фактора формы различных частей изделия за счет выравнивания толщины изделия. а – форма до коррекции, б – после внесения коррекции [175, С. 130]

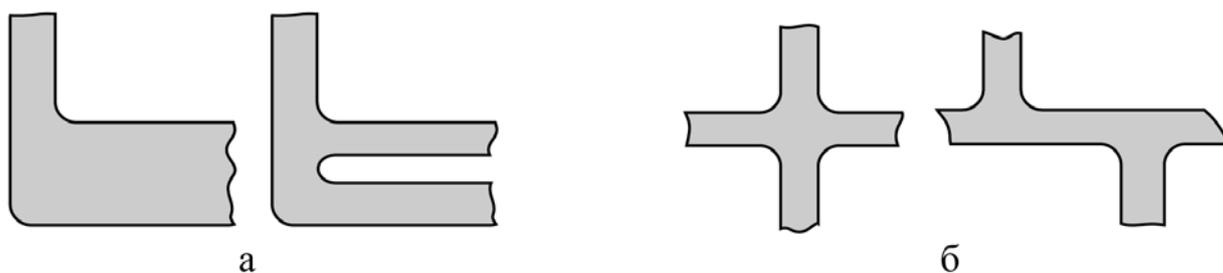


Рисунок 2.7 – Упрочнение изделий за счет выравнивания факторов формы разных частей изделия. а – уменьшения толщины части изделия и образование двойной стенки; б – дробления части изделия на две с одинаковой геометрией [175, С. 122]

Устойчивость изделия определяется также расстояниями от проекции центра тяжести изделия на основание до краев ассиметричных частей изделия. При увеличении этого расстояния, т. е. наличия так называемых выносных эле-

ментов, увеличивает величина рычага силы, создающий изгибающий момент. Для изделий асимметричных форм, для которых точка проекции силы тяжести не совпадает с геометрической серединой площади основания возрастает также вероятность опрокидывания изделия.

Наиболее простой способ придать изделию устойчивость – утяжелить его нижнюю часть (рис. 2.8), однако этот прием противоречит общей и правильной тенденции облегчения изделий.

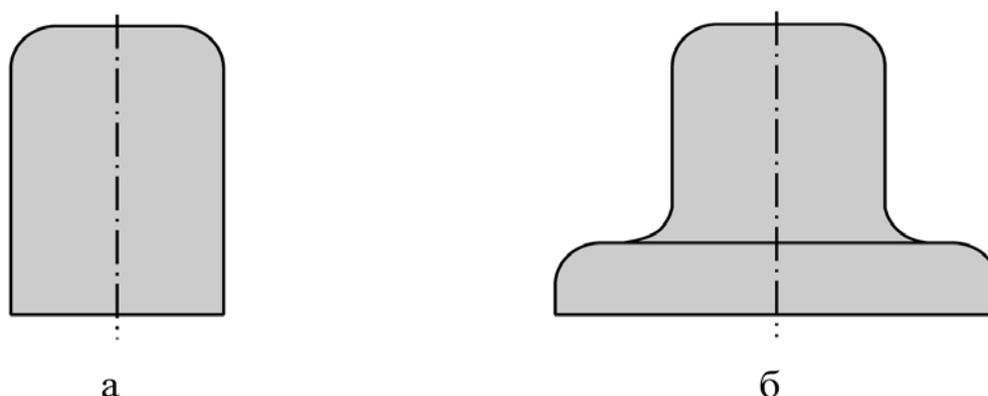


Рисунок 2.8 – Повышение устойчивости изделия за счет создания широкого основания. а – деталь до коррекции формы, б – после коррекции [175, С.120]

Общие рекомендации к форме проектируемого керамического изделия могут быть сформулированы несколькими пунктами:

1. Из-за хрупкости керамики, т. е. низкой устойчивости к ударным нагрузкам, следует избегать:

- тонких стенок (в общем случае менее 2-3 мм);
- острых краев и граней изделий с малым радиусом закругления;
- отверстий, расположенных вблизи края изделия;
- небольших выступающих элементов (типа шпонки), воспринимающих на себя изгибающие усилия.

2. Относительно низкий предел прочности керамики при напряжениях растяжения и изгиба делает нежелательным:

- расположение выносных элементов и деталей, имеющих значительную массу, вдали от центра тяжести изделия;

- использование опорных поверхностей керамических изделий таким образом, чтобы возникали значительные изгибающие усилия.

Таким образом, при изготовлении и эксплуатации керамических изделий их форму пытаются оптимизировать исходя из требований технологичности и устойчивости к тепловым и механическим нагрузкам. При этом важную роль играют:

- соответствие формы формуемого полуфабриката способу формования;
- приведенная толщина изделия;
- наличие концентраторов напряжений.

При рассмотрении процессов формообразования и спекания керамического изделия исследователи нередко стремились найти универсальные критерии. Так, П. О. Грибовский рассматривал коэффициент упаковки ( $K_{уп}$  – формула 6) [176] в качестве универсального критерия, которым можно описать все стадии технологии керамики.

$$K_{уп} = P_m / d_m, \quad (6)$$

где  $P_m$  – вес частиц материала, фактически находящихся в  $1 \text{ см}^3$  полуфабриката;  $d_m$  – удельный вес материала.

Дискуссия в статьях [177] и [178] о выяснении роли тех или иных факторов в обеспечении качества керамических изделий привела к выводу о рациональности использования обобщенных (универсальных) критериев, связанных с фундаментальными свойствами. В качестве таких критериев, которыми можно описывать поведение тех или иных систем (формуемой массы, полуфабриката, изделия), можно использовать, например, коэффициент трения, вязкость, поверхностное натяжение и т. д.

В работах В. А. Лотова [179-182] предлагается использовать в качестве универсального критерия коэффициент уплотнения системы (коэффициент пористости) или объемной концентрации твердой фазы  $K_T$ , как характеристику развивающихся систем с изменяющимися под внешним воздействием структурными свойствами (рис. 2.9 и рис. 2.10).

$$K_T = \rho_m / \rho_T, \quad (7)$$

где  $\rho_m$  – кажущаяся плотность сухого слоя материала,  $\rho_T$  – истинная плотность материала.

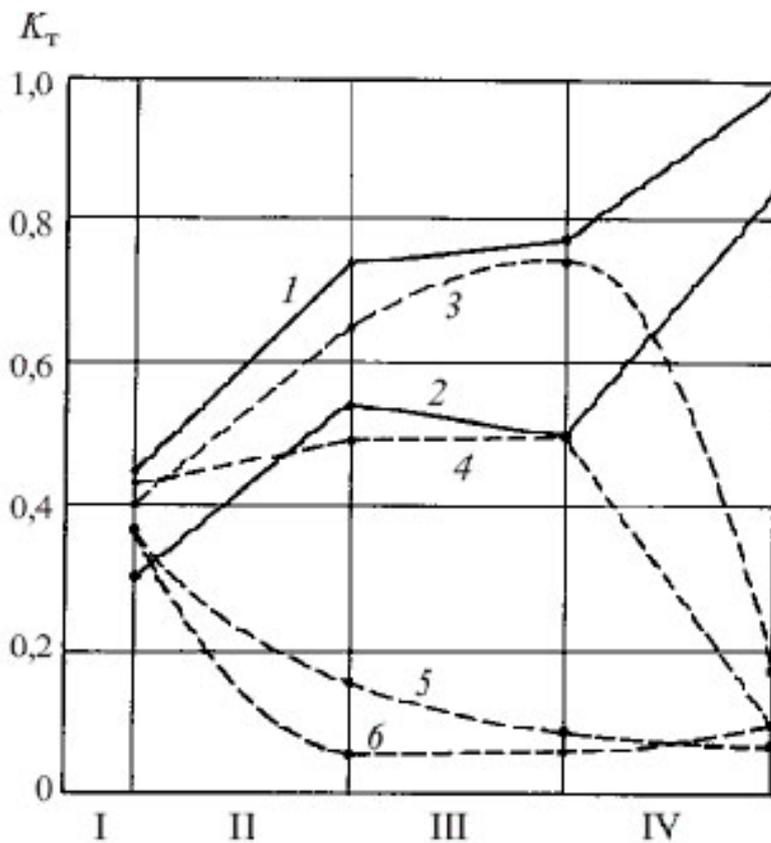


Рисунок 2.9 – Объемная доля твердой фазы  $K_T$  на различных стадиях технологического процесса получения плотных керамических материалов 1, 2, керамзита 3, пеностекла 4, пористой керамики 5, 6 (I – приготовление формовочной (дисперсной) системы, II – формование (формообразование), III – сушка (формирование конденсационной) и V – обжиг (формирование кристаллизационной) структур [182])

По мнению автора, перестройку структуры на отдельных технологических стадиях можно оценивать с помощью структурно-энергетического параметра  $n$ .

$$n = (K_{T2}/\Pi_2) / (K_{T1}/\Pi_1), \quad (8)$$

где  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  – пористость материала в начале и конце процесса

В зависимости от цели процесса (получения плотной или пористой структуры)  $n$  может быть менее или более 1, и при использовании безразмерного параметра  $\alpha$  (степени перестройки структуры) можно описать любую технологию.

$$\alpha = (n_1 - 1) / n_1, \text{ для } n > 1; \quad (9)$$

$$\alpha = 1 - n_1, \text{ для } n < 1 \quad (10)$$

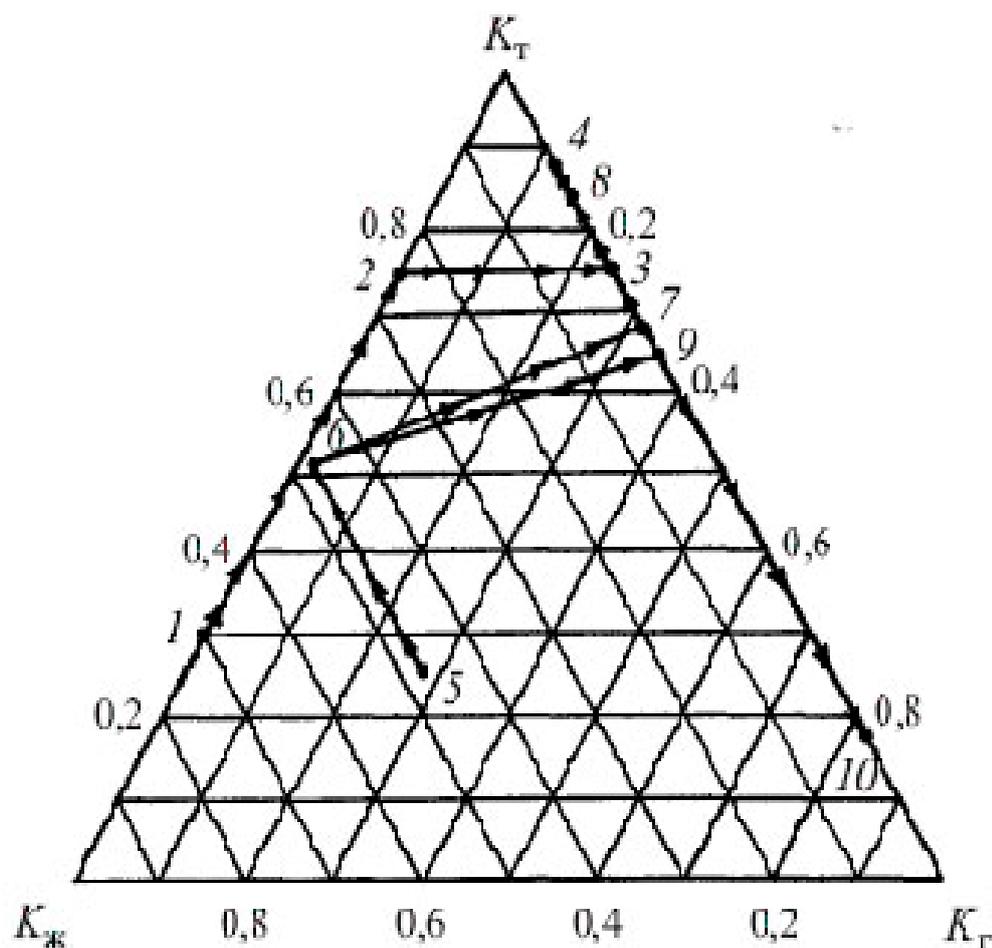


Рисунок 2.10 – Фазовая диаграмма технологий получения керамики методом шликерного литья (точки 1-2-3-4), керамического кирпича (5-6-7-8), керамзита (5-6-9-10) [182]

Рассмотренный подход отличает единый взгляд на все 3 основные стадии технологии керамики на основе критерия, описывающего структуру. Однако, этот критерий не дает возможность оценить влияние сложности формы керамического изделия на получение качественного изделия.

Анализ литературы показал, сложность изделия определяет в основном способ его формования. Предлагается провести анализ соответствия способа формования сложности полуфабриката с учетом эффективной вязкости формируемой системы и меру энергетического воздействия на материал на всех этапах технологии.

**Выводы по разделу 2.1:**

1. Форма керамического изделия, аналогично изделиям из металлов и пластиков, оказывает непосредственное влияние на выбор способа формования и особенности других технологических стадий.

2. Если при выборе способа формования важным оказывается отклонение формы изделия от простой геометрической (за счет пазов, отверстий, криволинейных поверхностей), то при термообработке важным критерием технологичности (сложности) оказывается приведенная толщина.

3. Для эксплуатации устойчивости керамических изделий к механическим нагрузкам в условиях эксплуатации, в первую очередь, внимание обращают на уменьшение количества возможных концентраторов напряжений.

4. Оценка сложности формы изделия для всей технологии должна основываться на обобщенных критериях структуры и ее реакции на внешние воздействия при основных технологических стадиях.

**Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Устойчивость керамического полуфабриката художественных и технических изделий различной формы к образованию дефектов [Текст] / **Захаров А. И.**, Андреев Д. В. // Дизайн. Теория и практика. (электронный журнал). 2011. Вып. 8. С. 50-70.

2. **Захаров А. И.** Форма керамических изделий: влияние технологии [Текст] // Дизайн. Теория и практика. (электронный журнал). 2011. Вып. 7. С. 59-72.

3. **Захаров А. И.** Форма керамических изделий: философия, дизайн, технология [Текст] / **Захаров А. И.**, Кухта М. С. Томск: STT, 2015. 224 с. (сер. Дизайн и общество).

## **2.2 Критерии сложности формы керамических изделий: энергетические воздействия на форму и материал. Дефекты керамических изделий, как реакция на энергетические воздействия на материал и форму при формовании, сушке, обжиге**

Все основные способы формования керамических изделий (прессование, пластическое формование, шликерное литье) резко отличаются по эффективной вязкости формируемой системы. Рассмотрим формируемые системы на примере глинистых масс, наиболее широко распространенных в производстве хозяйственно-бытовой и строительной керамики, а также для некоторых видов огнеупоров (шамотные огнеупоры) и технической керамики (алюмосиликатная керамика).

Способность держать форму характерна для керамического полуфабриката в пластичном состоянии, характеризуемой величиной эффективной вязкости порядка  $10^8$ - $10^{12}$  Па·с. Это состояние, при котором частицы компонентов исходного сырья связаны друг с другом через тонкие (толщиной несколько нанометров) прослойки жидкой связки, позволяющие частицам смещаться друг относительно друга под действием внешних сил, превышающих предел текучести, но восстанавливать структуру после снятия нагрузки. Такие контакты, носящие название коагуляционных («твердое-жидкое-твердое»), частично присутствуют в густом литейном шликере, но толщина прослоек жидкости велика (так называемые коагуляционные контакты дальнего порядка), частицы отодвинуты на расстояние в десятки нанометров и слабо связаны, что обеспечивает высокую подвижность шликера и характеризуется относительно малой эффективной вязкостью порядка  $10^7$ - $10^8$  Па·с. В разбавленных шликерах (вязкость 0,001-0,1 Па·с) частицы твердой фазы практически не связаны друг с другом и такие шликера, подобно так называемым ньютоновским жидкостям, обладают высокой текучестью.

В научной литературе встречаются различные названия типов контактов между частицами, требующие пояснений [183-185].

В керамике как в твердом поликристаллическом теле между зернами фаз (кристаллов минералов и стекла) существуют прочные кристаллические (фазовые или конденсационные) контакты. В рыхлых осадочных породах твердой консистенции (глинах), дисперсных системах с малым количеством связки преобладают атомные (точечные или переходные контакты). В отличие от фазовых, такие контакты непрочны, характеризуются небольшой площадью и легко разрушаются в результате расклинивающего действия добавок жидкости. При наличии в материале контактов подобного типа он отличается хрупкостью, нарушенные контакты не восстанавливаются. В системах «жидкое–твердое» – глинистых грунтах, илах, пастах, текучих смесях, высоконаполненных шликерах – наблюдают коагуляционные контакты, которые, в зависимости от расстояния между частицами, различаются на контакты ближнего и дальнего вида. Коагуляционные контакты характерны для различного рода агрегированных дисперсных систем, отличающихся сложным реологическим поведением.

В таблице 2.5 приводятся общие характеристики дисперсных систем, содержащих частицы минеральных порошков и технологическую связку, используемых в различных способах формования.

На рис. 2.11 показано изменение эффективной вязкости дисперсной системы при формовании. Несмотря на значительные различия в начальном состоянии системы для шликеров, пластичной массы и порошка, на стадии непосредственно формования частицы сближаются друг с другом и образуют коагуляционные контакты, позволяющие удерживать массу заданную форму. Формование заготовки (полуфабриката) можно условно разбить на несколько этапов: на первом (смешивание компонентов с временной технологической связкой и добавками) формируется устойчивая дисперсная система, на втором – происходит заполнение формы, на третьем уплотнение под действием механических или диффузионных сил. При диффузии воды в поры гипсовой формы (шликерное литье) происходит постепенное наращивание слоя частиц на поверхности формы, расстояние между частицами в процессе формования сокра-

щается от сотен до десятков нанометров, соответствующих двум энергетическим минимумам.

На стадии формования способом шликерного литья происходит быстрый переход от жидкотекучей консистенции шликера к пластичной заготовке, благодаря отсосу части воды порами гипсовой формы. Эффективная вязкость системы резко повышается из-за сокращения расстояния между частицами и возникновения коагуляционных контактов (табл. 2.5). Материал густеет и образует твердое тело, имеющее форму, совпадающую с заданной.

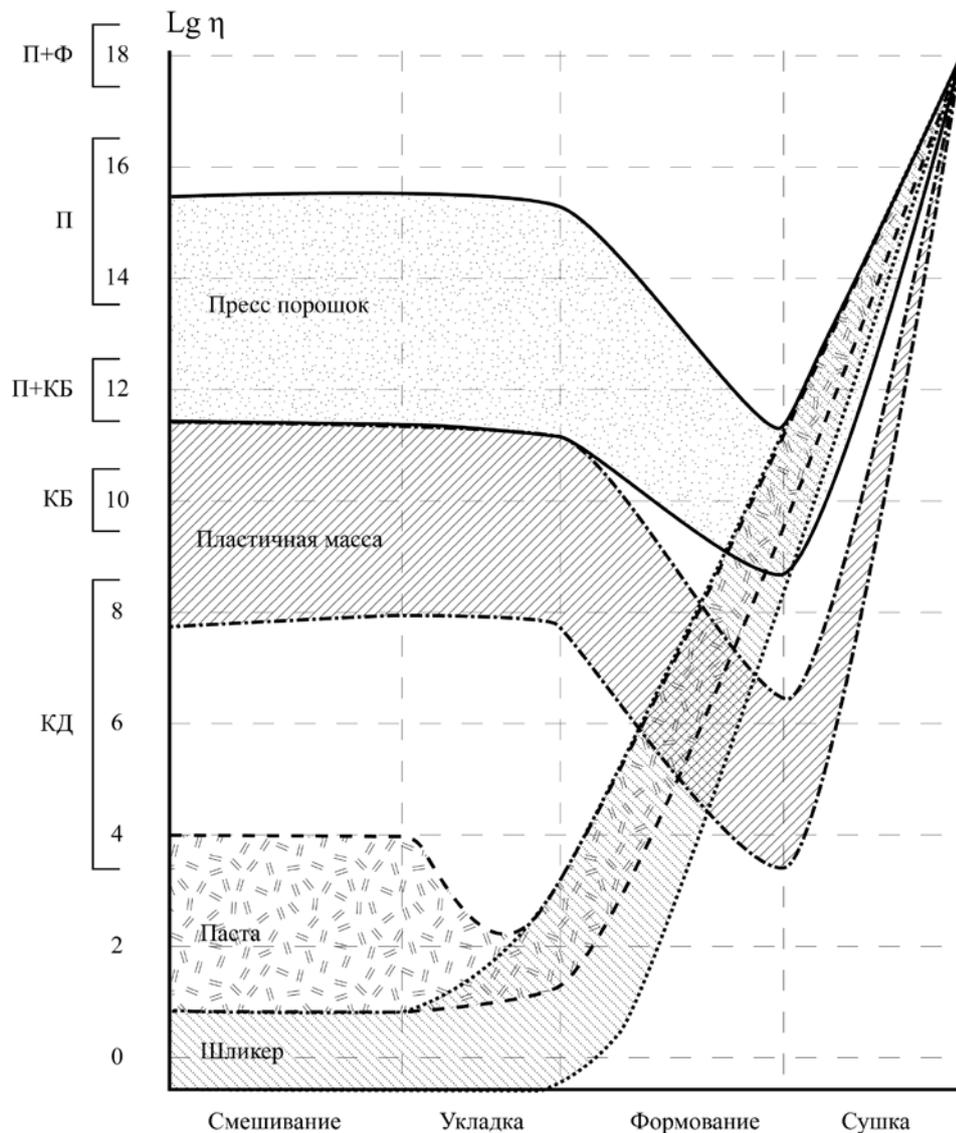


Рисунок 2.11 – Изменение вязкости формируемой системы на разных стадиях технологии. Обозначения: ф – фазовые контакты, п – контакты переходного типа, кб – коагуляционные ближние контакты, кд – коагуляционные дальние контакты

Таблица 2.5 – Характеристики формируемых дисперсных систем

Состояние формируемой массы	Типы контактов между частицами	Характерные особенности	Прочность контактов, Н	Эффективная вязкость, Па*с	Перепад вязкости с ростом скорости деформации (разрушение структуры), порядки
Шликер	Нет контактов	Текучесть	-	0,1-1	1
Литейный тиксотропный шликер, пластичная масса	Коагуляционные дальнего порядка,	Текучесть, подвижность	$10^{-12} - 10^{-9}$	10 - 500 $10^7 - 10^8$	1-3
Пластичная масса	Коагуляционные ближнего порядка	Пластичность	$10^{-9} - 10^{-8}$	$10^8 - 10^{12}$	Более 10
Пресс-порошок	От коагуляционных при перемещении гранул до переходного (точечного) типа между коагуляционными и фазовыми для прессовки	Возможно проявление как пластичности, так и хрупкости	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{12} - 10^{14}$	Более 3
Высушенная заготовка	Контакты переходного (точечного) типа между коагуляционными и фазовыми	Хрупкость	$10^{-7} - 10^{-3}$	$10^{13} - 10^{14}$	Хрупкое разрушение

При формировании пластичной массы способами протяжки (экструзии, штамповки, раскатки) происходит ее частичное уплотнение, под действием приложенных напряжений эффективная вязкость системы резко снижается на несколько порядков, и она приобретает свойство текучести, подобное текучести шликеров. Это происходит из-за практически полного нарушения контактов между частицами, которые под действием высоких напряжений не успевают восстанавливаться. Однако при прекращении действия напряжения, выходя из мундштука пресса, освобождаясь от давления ролика или руки гончара, вязкость системы мгновенно возвращается к вязкости пластической массы и обретает прочность.

Обращает на себя внимание своеобразные «разрывы» между областями, характеризующими основные параметров способов формирования. Между состоянием шликера и пластичной массы существует состояние легко текучих паст, работа с которыми затруднена: достаточно высокая вязкость не дает возможности быстрого заполнения форм, а текучесть не позволяет использовать оборудование пластического формирования. Однако для изделий простых форм, например, для полнотелого кирпича разработаны способы формирования, позволяющие после быстрого заполнения формы легко текучей пастой (влажность глиняной массы 25-35 %, что больше, чем верхний предел пластичности или предел текучести) быстро повышать ее вязкость, переводя ее в разряд пластической, с последующим ее уплотнением (так называемая технология “soft-mud”) [186]. Это состояние текучести характерно для способов формирования капли стекломассы с вязкостью  $10^2$ - $10^4$  Па·с [187], при попадании в форму (начало формирования) вязкость быстро возрастает на 2 порядка, при том что диапазоны вязкости  $10^4$ - $10^6$  Па·с характерны для формирования стекла способами прессования и моллоирования [188]. В [189] для широко выпускаемых стекол указан более широкий вязкостной интервал формирования –  $10^2$ - $10^7$  Па·с. Для огнеупорных материалов со значительным преобладанием кристаллических фаз температуре начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа соответствует эффективная вязкость  $10^9$ - $10^{9,6}$  Па·с, температуре 10 %-ной деформации – вязкость  $10^{8,5}$ -

$10^9$  Па·с, 20 %-ной деформации – вязкость  $10^8$ - $10^{8.5}$  Па·с [172, С. 217]. Таким образом, вязкость деформируемых стеклообразных и стеклокристаллических систем приближается к вязкости соответствующей вязкости пластического формования.

Для такого способа формования как горячее шликерное литье (“injecting moulding”) большое внимание уделяют разработкам связок, обеспечивающих высокую подвижность (литейную способность) шликера. При этом вязкость шликеров, в зависимости от вида связки и объемного содержания частиц твердой фазы колеблется от 5 до  $10^3$  Па·с [174, С. 138].

С другой стороны, при совершенствовании способа шликерного литья особое внимание уделяют снижению количества вводимой связки при сохранении необходимой текучести [190, 191], при этом литейные шликера, как правило, характеризуются повышенной вязкостью [192]. Уменьшение размеров частиц твердой фазы приближает традиционное шликерное литье к золь-гель технологиям [193].

Текучие диспергированные суспензии могут содержать до 60 об. % твердых частиц, тогда как обычно объемная доля твердой фазы для суспензий значительно ниже (от 5 до 20 об. %) и зависит от массы (размера) частиц, которая регулирует силу разделения частиц при течении. [114, С. 2351, 194-195].

Слияние коллоидных суспензий в плотные, однородные, зернистые тела является основным элементом в коллоидной обработке. Чтобы использовать преимущества этого метода, желательно, формировать заготовки непосредственно из суспензий. После образования формы ее реологические свойства должны измениться для возможности извлечения (при необходимости) и последующей обработки без деформации формы. Отверждение формы может происходить при удалении жидкости, уплотнении частиц и гелеобразовании. Было разработано несколько коллоидных способов для производства керамических изделий различной геометрической формы, сложности и микроструктуры материала (табл. 2.6).

В ряде коллоидных методов 3D-печати используют гидрогели, консистенция которых соответствует понятию текучих паст с эффективной вязкостью от  $10 \cdot 10^4$  Па·с [196-198]. Такая консистенция характерна для высококонцентрированных суспензий, очевидно, что речь идет о подобных системах.

Таблица 2.6 – Некоторые коллоидные методы производства керамических изделий [193]

Метод формования	Механизм уплотнения	Компонент формы
Шликерное литье	Удаление жидкости под действием капиллярных сил	Комплексный, 3D, тонкостенные формы
Фильтрация под давлением	Удаление жидкости через пористый фильтр с приводом под действием приложенного давления	Простой, 3D
Осмотическое уплотнение	Удаление жидкости через полупроницаемую мембрану под действием осмотического давления	Простые, 3D
Пленочное литье	Удаление жидкости за счет испарения	Простые, 2D, тонкие пленки
Robocasting	Удаление жидкости за счет испарения	Комплексный, 3D
Уплотнение центрифугированием	Возникновение потока частиц за счет приложения гравитационных сил	Комплексный, 3D
Электрофоретическое осаждение	Возникновение потока частиц за счет электрического поля	Простой, 3D, 2D
Жидкостное литье под давлением	Образование гелеобразных органических форм при изменении температуры	Комплексный, 3D
Гелеобразное литье	Формирование органической сетки в ходе химической реакции	Комплексный, 3D
Коагуляция при прямом литье	Образование коллоидного геля в результате флокуляции	Комплексный, 3D
Robocasting	Образование коллоидного геля в результате флокуляции	Комплексный, 3D

Для прессования часто применяют массы с высоким содержанием связки, которые позволяют снизить усилия формования. Такие способы позволяют формировать автоматизированным способом изделия усложненной формы из масс, которые в исходном состоянии не обладают пластичностью, (так называемое «мокрое» прессование). Формовочные усилия при этом примерно на порядок превышают усилия, используемые при пластическом формовании.

Для снижения вязкости прессуемой системы применяют такие эффективные способы как ультразвуковая обработка [199]. УЗ-обработка водных глинистых дисперсий на основе мало пластичных каолинов изменяет их реологические характеристики до соответствующих легко формуемым (2 область по структурно-механической классификации С. П. Нечипоренко) [200].

Для снижения вязкости и, соответственно, улучшения формующих свойств в [201] предлагали использовать электрический нагрев массы во время формования изделий для электрокерамики, вибрацию [202] – для формования кирпича.

Таким образом, в технологии керамики используют исходные массы практически всех возможных исходных состояний (консистенций) – от сыпучих дисперсных порошков, количество связки в которых может не превышать 1 %, до разбавленных суспензий (шликеров) с содержанием связки, достигающим до 50 %. В особенно интенсивно развиваемых сейчас коллоидных способах формования, за счет малых размеров твердых частиц обеспечивающих не только высокие физико-химические свойства керамики, но и возможность формования сложных и миниатюрных изделий, особое внимание уделяется фиксации структуры резким повышением вязкости в результате полимеризации, испарения дисперсионной среды и полиморфного перехода и т. д. Фиксация структуры глинистых полуфабрикатов в основном обеспечивается в результате удаления большей части свободной и физически связанной воды – процесса сушки.

При сушке заготовки из пластичной массы из-за сил капиллярного давления, действующего в направлении вогнутых менисков удаляющейся воды, частицы притягиваются друг к другу. Процесс воздушной усадки приводит к уменьшению размеров полуфабриката с высокой долей содержания пластичных глин на 5-10 %, для отощенных плавнями сантехнических масс сушильная (воздушная) усадка составляет 2-4 % [203]. В заготовках, сформованных на основе глин, дисперсные частицы которых окружены развитыми оболочками воды, процесс усадки при сушке сопровождается развитием значительных напряжений и может привести к трещинам.

Хотя контакты между частицами упрочняются и становятся все в большей мере приближаются к фазовым, после удаления из заготовки технологической связки они остаются непрочными, так как осуществляются по небольшим площадям и между частицами в основном существуют небольшие зазоры из-за сложного рельефа частиц и остатков прочно связанных с поверхностью мономолекулярных слоев жидкости.

Пресс-порошки, формуемые при больших давлениях, содержат гранулы, в которых частицы окружены оболочками связки, и значительное количество воздуха, удаляемого при прессовании. Прессуемая заготовка уплотняется сначала за счет ликвидации крупных пор, затем за счет разрушения гранул и сближения частиц между собой, при котором значительная часть контактов превращаются из коагуляционных в атомные (переходные). О вязкости сыпучей порошкообразной системы можно говорить только при определенной степени контактов между частицами, когда под прессующим усилием материал, заключенный в закрытую форму, начинает деформироваться как единое целое. Условная эффективная вязкость системы при прессовании снижается на несколько порядков, характеризуя значительные перемещения частиц внутри заготовки.

На рис. 2.12 представлена диаграмма, характеризующая связь между напряжениями формования (давлением) и эффективной вязкостью формуемой системы. Различие в трех группах способов формования определяются различиями в используемых реологических системах и напряжениях, которые необходимо развить для их деформации. Из рис. 2.11 видно, что вязкость всех трех систем в момент формования (уплотнения), достигает  $10^8$ - $10^{10}$  Па·с, что характерно для пластичной массы, при деформации которой преобладают сдвиговые напряжения.

На диаграмме (рис. 2.12) также указана область параметров, характерная для используемых в последнее время аддитивных технологий [136, С. 7]. Указанные в этой работе вязкости (0,001-100 Па·с) характерны для большинства способов печати. Однако, в [133, С. 618] приводится более широкий интервал:

так при печати каплями суспензий вязкость последних должна находиться в пределах 0,002-0,1 Па·с, при экструзионной печати высококонцентрированными суспензиями и пастами – 500-1000 Па·с.

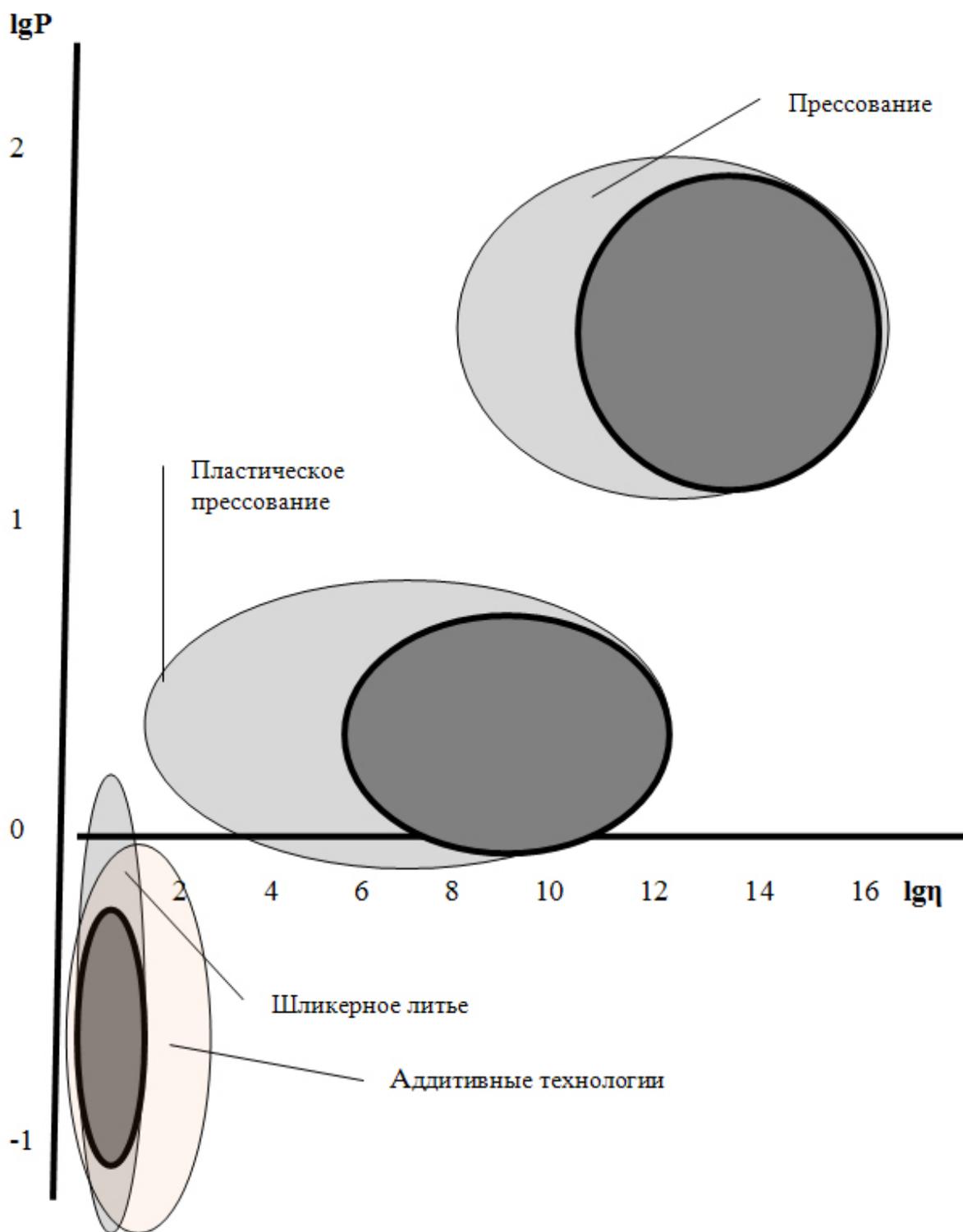


Рисунок 2.12 – Связь между эффективной вязкостью формуемой системы и давлением формования. Интенсивной окраской выделены области преимущественных значений

Необходимо отметить, что интенсивность приложения напряжений при формировании прямо пропорционально величине напряжения. Если цикл традиционного шликерного литья (без нагнетания шликера под давлением) занимает 1-30 минут, то пластическое формирование – 10-30 секунд, а прессование – 1-5 с. При увеличении напряжений, действующих на пластичную массу, и их интенсивности увеличивается вероятность их неравномерного распределения и, как результат, возникновения неравноплотности формуемого материала. Очевидно, это обстоятельство не может не сказываться на требованиях к сложности формы формуемой заготовки.

В табл. 2.7 охарактеризованы основные параметры способов формирования, широко используемых в настоящее время в промышленности.

На рис. 2.13 приведена диаграмма иллюстрирующая связь между вязкостью формуемой системы и сложностью полуфабриката. Шкала сложности изделий (4 степени сложности) соответствует приведенной выше и описанной в табл. 2.2.

Из диаграмм, представленных на рис. 2.12 и рис. 2.13 видно, что формирование изделий сложной формы не требует применения высоких значений давлений формирования и высокой вязкости исходной системы. Наоборот, наиболее сложные изделия формуют с минимальными усилиями, но из малонаполненных низковязких систем, которые при удалении связки испытывают значительные усадки. Последнее обстоятельство говорит о том, что стадия формирования может быть не решающей для получения бездефектного изделия и степень его сложности для производства определяют также стадии, следующие за формированием (сушка и обжиг).

Вязкость формуемой и спекаемой системы можно рассматривать как обобщающую (комплексную) характеристику, определяющую величину прилагаемых к ней (или развиваемых в ней) усилий, соответствующих условиям сохранения однородности материала и его структуры.

Очевидно, сложность изделия можно оценивать, как единый параметр для всех стадий производства и некоторых эксплуатационных условий (например,

для температурных перепадов). Основой для этого утверждения является по сути дела идентичность процессов передачи энергии формуемой, высушиваемой и спекаемой заготовки.

### Степень сложности

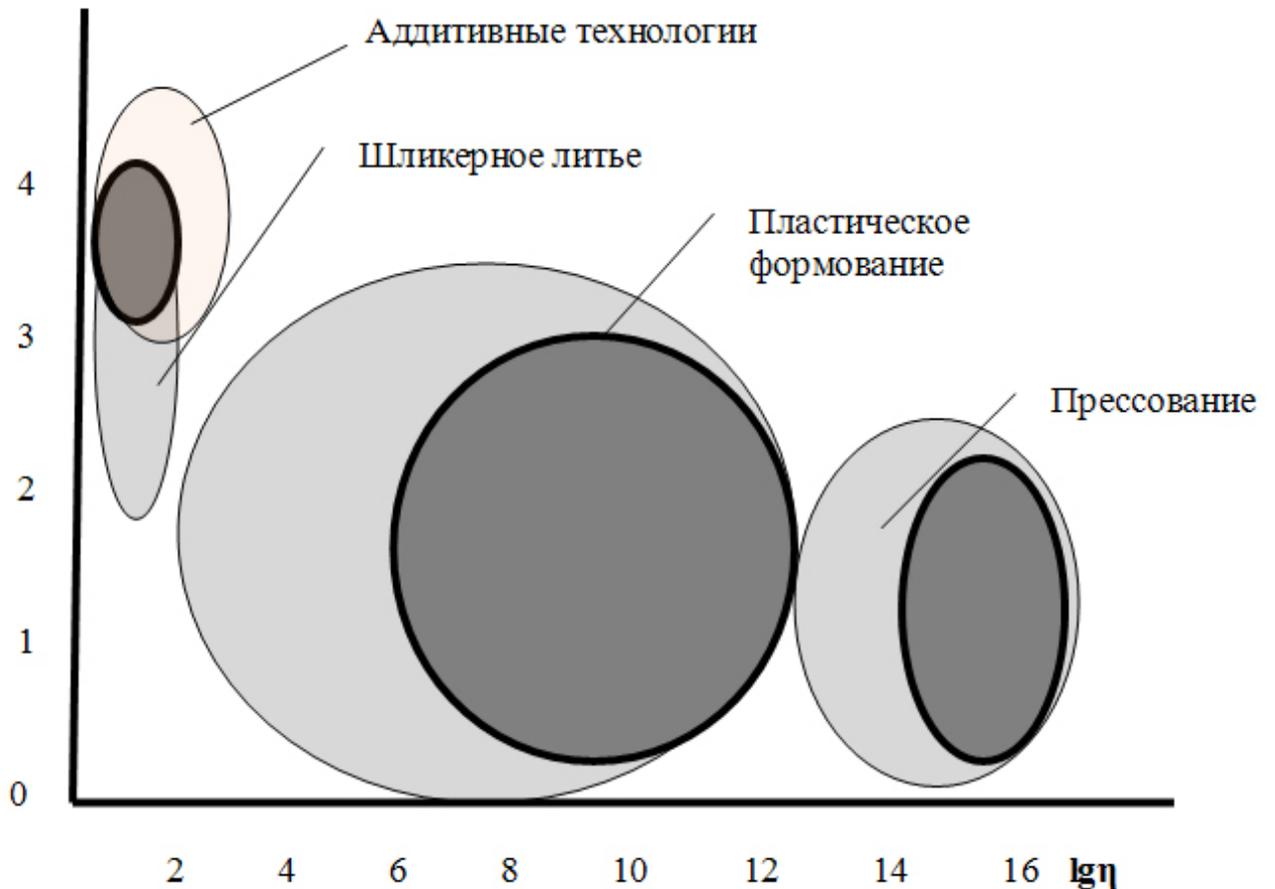


Рисунок 2.13 – Зависимость степени сложности заготовки от способа формования и вязкости системы. Шкала сложности изделий соответствует предложенной выше. Интенсивной окраской выделены области преимущественных значений

Таблица 2.7 – Характеристики способов формования и их разновидностей

№	Способ формования	Эффективная вязкость исходной системы, Па·с	Давление формования, МПа	Формуемые изделия
1	Полусухое прессование	$10^{13} - 10^{14}$	10-100	Плитка, кирпич, технические детали
2	Горячее прессование	$10^{16} - 10^{18}$	100-200	Технические детали
3	Горячее изостатическое прессование	$10^{16} - 10^{18}$	100-200	Технические детали
4	Изостатическое (гидростатическое) прессование	$10^{13} - 10^{14}$	100-200	Сантехника, посуда, технические детали
5	Квазиизостатическое прессование	$10^{13} - 10^{14}$	10-100	Технические детали
6	Трамбовка	$10^{13} - 10^{14}$	10-50	Технические и строительные детали
7	Вибропрессование	$10^{13} - 10^{14}$	10-50	Технические детали
8	Допрессовка	$10^{10} - 10^{12}$	10-50	Строительные детали
9	Штамповка	$10^8 - 10^{10}$	2-10	Черепица, кирпич
10	Набивка	$10^8 - 10^{10}$	1-5	Строительные детали, интерьерная керамика
11	Протяжка (экструзия)	$10^8 - 10^{10}$	1-10	Технические и строительные детали
12	Раскатка	$10^8 - 10^{10}$	1-2	Посуда
13	Лепка	$10^8 - 10^{10}$	1-2	Посуда, художественные изделия
14	Отмин	$10^8 - 10^{10}$	1-2	Художественные изделия
15	Крой пласта	$10^8 - 10^{10}$	До 1	Художественные изделия
16	Обточка	$10^8 - 10^{10}$	1	Изоляторы
17	Шликерное литье	0,001-1	0-1	Посуда, сантехника, технические детали
18	Шликерное литье под давлением	0,001-1	1-3	Сантехника, технические детали
19	Центробежное шликерное литье	0,001-1	0,5-1	Технические детали
20	Электрофоретическое литье	0,001-1	0-0,5	Технические детали
21	Литье высококонцентрированных суспензий	1-10	-	Технические детали
22	Горячее (парафиновое) литье	0,1-10	0-0,5	Технические детали
23	Инжекционное литье (injecting moulding)	1-50	1-5	Технические детали
24	Золь-гель формование	0,001-10	-	Технические детали
25	Аддитивное формование	0,001-10 <sup>4</sup>	-	Технические детали

При формовании энергия, расходуемая на уплотнение материала и создание в ней прочных связей между частицами переходного типа, передается посредством приложения механической нагрузки на поверхность. При этом значительная часть энергии расходуется на преодоление сил внешнего трения о поверхность формы, что особенно заметно при интенсивных способах уплотнения (прессовании). Подробное рассмотрение этого вопроса в монографии [204] показывает, что решающую роль при получении бездефектной заготовки оказывает соотношение  $h/R_r$  – высоты (толщины) заготовки  $h$  к гидравлическому радиусу  $R_r$  равному отношению площади сечения прессуемого слоя материала к его периметру. Это соотношение названо фактором формы, т. е. величиной, которая учитывает влияние геометрии прессуемой заготовки. Разница в плотности слоев прессуемого материала является результатом влияния как внешнего (длина периметра), так и внутреннего (толщина слоя) трения, выраженного через геометрические параметры заготовки.

В [205] установлены обратная зависимость между допустимой скоростью прессования и отношением объема изделия к его двойному периметру в плане, необходимость снижения средней скорости прессования за цикл с увеличением размеров изделия и содержания тонкомолотой фракции.

Из полученных опытным путем и выведенных зависимостей плотности заготовки от давления прессования, внешнего трения материала о форму и фактора формы заготовки следует, что увеличение высоты заготовки при постоянном сечении, а также наличие в ней криволинейных поверхностей, пазов и отверстий в направлении, перпендикулярном прикладываемой нагрузке, приводит к увеличению неравномерности напряжений и, как следствие, фиксации в ее структуре участков различной плотности.

В работе [206] исследовали действие ультразвуковой обработки при прессовании полуфабрикатов из порошков частично стабилизированного диоксида циркония на средний размер зерна керамических образцов, полученных спеканием прессованных полуфабрикатов, и равномерность усадки по высоте и ширине образца. Полуфабрикаты отличались различным соотношением высо-

та : диаметр (0,05 и 0,37), в работе это соотношение названо фактором формы. Определено, что прессование, сопряженное с ультразвуковой обработкой, приводит к уменьшению размера зерна спеченного материала и существенному снижению разницы в усадках, т. е. повышается равномерность усадки. Один из важных результатов исследования – существенное улучшение равномерности усадки при увеличении мощности УЗ-обработки для полуфабрикатов с большим соотношением высота : диаметр. Необходимо отметить, что для образцов с малым соотношением УЗ-обработка практически не сказывалась на равномерности усадки, т. е. «фактор формы» имел решающее значение.

«Оптимальным» керамическим изделием, формуемым способом прессования, является облицовочная плитка. Небольшая толщина обычно в несколько миллиметров и значительное сечение практически сводит на нет краевые эффекты, возникающие из-за внешнего трения.

При уплотнении пластической массы, как уже упоминалось, опасность для образования дефектов заготовок представляет возникновение текстур, т. е. фиксация сдвиговых напряжений, возникающих при формовании, в виде участков, имеющих выраженную ориентацию частиц. При формовании глинистых заготовок их текстурирование выражено наиболее ярко из-за неизометричной формы частиц. Это явление проявляется сильнее с ростом напряжений [184, С. 129-130]. Не имея возможности предотвратить образование текстур, этим явлением можно управлять. Уменьшая сечение формуемой заготовки, можно получить относительно равномерную структуру по всей ее толщине и тем самым обеспечить равномерную усадку при сушке и обжиге. Хорошей однородностью обладают формованные этим способом длинномерные изделия постоянного сечения, например, трубки. При формовании способом раскатки керамической тарелки, под действием вращающегося ролика частицы массы по всей толщине заготовки распределяются, образуя текстуру с центром симметрии, совпадающим с осью вращения заготовки.

При пластическом формовании уплотнения однородной пластической массы с развитыми коагуляционными контактами практически не происходит

из-за малого содержания газовой фазы (большая часть ее удаляется при вакуумировании в прессе или вакуум-мялке), поэтому энергия в основном расходуется на перемещение массы с переменным разрывом и восстановлением контактов и преодоление сил внешнего трения. При этом решающими параметрами являются модули пластичной  $\epsilon_{пл}$ , эластичной  $\epsilon_{эл}$  и упругой  $\epsilon_{уп}$  деформаций (рис. 2.14) [171, С. 97-98, 174, С. 95,]. Преобладание эластичной деформации предпочтительнее (поля I и II на диаграмме) и, соответственно, массы I и II рода при формовании на ленточном прессе не образуют разрывов при соблюдении условия не превышения усилия предела прочности (текучести) (рис. 2.14, рис. 2.15 и рис. 2.16).

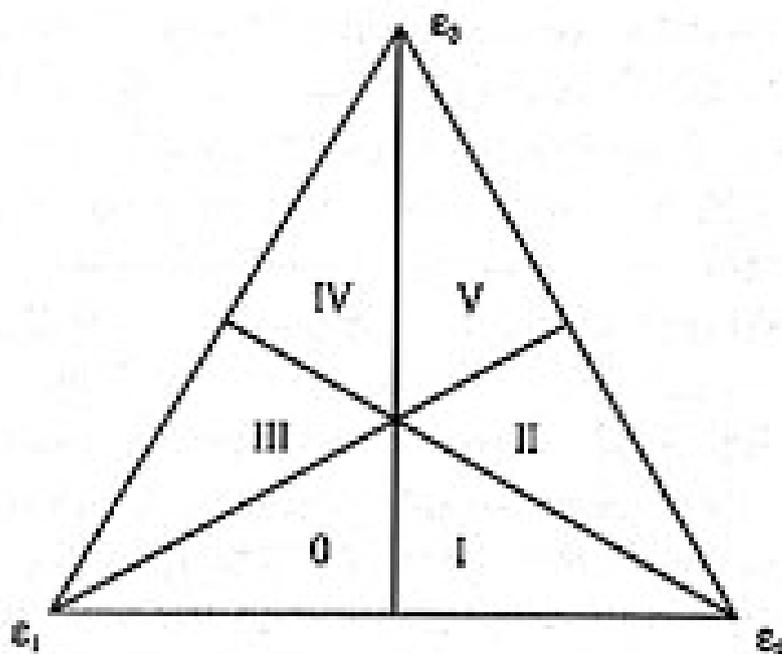


Рисунок 2.14 – Диаграмма С. П. Ничипоренко и структурно-механические типы масс 0 – быстрая обратимая деформация ( $\epsilon_1$ ) преобладает над замедленной обратимой ( $\epsilon_2$ ) и пластической ( $\epsilon_3$ ) –  $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$ ; I – замедленная обратимая – над быстрая обратимая и пластической –  $\epsilon_2 > \epsilon_1 > \epsilon_3$ ; II – замедленная обратимая – над пластической и быстрой обратимой –  $\epsilon_2 > \epsilon_3 > \epsilon_1$ ; III – быстрая обратимая деформация преобладает над пластической и замедленной обратимой –  $\epsilon_1 > \epsilon_3 > \epsilon_2$ ; IV – пластическая – преобладает над быстрой обратимой и замедленной обратимой –  $\epsilon_3 > \epsilon_1 > \epsilon_2$ ; V – пластическая – преобладает над замедленной обратимой и быстрой обратимой –  $\epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$

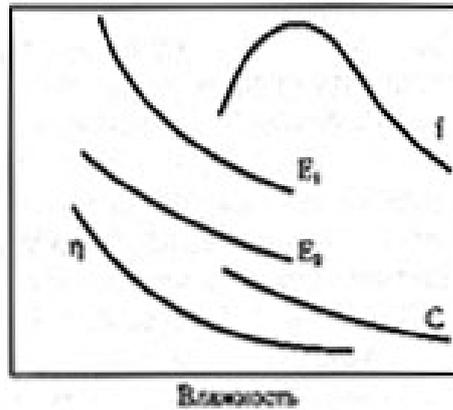


Рисунок 2.15 – Влияние влажности на основные параметры пластичной массы:  
 $f$  – коэффициент внутреннего трения;  $E_1, E_2$  – модули быстрой и замедленной  
 обратимой деформации;  $C$  – сцепление,  $\eta$  – вязкость

В [207] утверждается, что наряду с структурно-механическими критериями масс для получения бездефектных изделий методом экструзии необходимо учитывать их реологические свойства (мощность, расходуемую на разрушение коагуляционных контактов, и индекс течения).

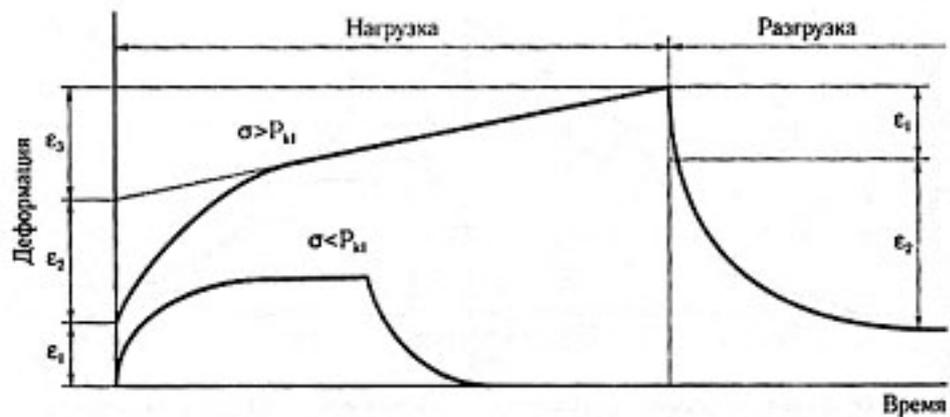


Рисунок 2.16 – Диаграммы развития и спада  
 деформации пластичной массы во времени

По-иному протекает шликерное литье керамических заготовок. Необходимость быстрой заливки форм шликером требует обеспечения равномерного доступа шликера к разным частям формы, невозможность получения абсолютно устойчивого шликера и опасность его расслаивания во время набора массы накладывает ограничения на высоту формы [208]. Диффузионные процессы,

происходящие при наборе массы, определяют зависимость скорости ее набора, прежде всего, от толщины набранного слоя и, тем самым, ограничивают толщину заготовки.

Диффузионные процессы и процессы теплопереноса определяют время сушки заготовки. Сушка заготовок протекает в 3 этапа [209]: на первом (период растущей скорости сушки) заготовка прогревается и время прогрева зависит от ее толщины, на втором (постоянная скорость сушки) идет испарение влаги, диффундирующей из всей толщи материала, и в этом периоде происходит основная часть усадки заготовки. В последнем периоде (падающая скорость сушки) – из сформировавшейся структуры заготовки (с образовавшимися контактами переходного типа) удаляются остатки воды. В определении времени всех 3 периодов решающее значение имеет толщина заготовки, а конкретнее – расстояние от ее середины до поверхности [210].

Режим обжига керамики во многом определяется формой и габаритами обжигаемых изделий. Еще в Китае конца XVII в. использовали несколько видов печей: одни использовали для обжига крупногабаритных изделий, другие – для мелкого товара (посуды). Полная длительность обжига первых достигала 19 суток, вторых – 7 суток [211].

При обжиге керамических изделий скорость нагрева и охлаждения обратно пропорциональна их толщине. Так, при обжиге одних из наиболее массивных керамических изделий – изоляторов, размеры которых иногда достигают 3 м, учитывают как толщину, так и форму обжигаемых изделий, подбирая индивидуальный режим для определенного ассортимента изделий [212, 213]. В первый период обжига повышение температуры в интервале спекания сопровождается усадкой, проходящей, прежде всего, во внешних слоях изделия, в результате чего возникают напряжения растяжения. Градиент напряжений по толщине заготовки уменьшается с уменьшением скорости нагрева в указанном температурном интервале. Скорость нагрева массивных изделий обычно не превышает 100 град/час. С увеличением массы и габаритов изделий скорость нагрева еще более снижается.

Во время нагрева в интервале спекания и выдержки при максимальной температуре во всем объеме изделия происходят процессы спекания, фазообразования. В этом периоде обжига усадка изделия достигает максимальных значений. Тогда же опасность представляет возможная деформации изделий сложной формы – особенно тонкостенных, с выносными элементами, смещающих центр тяжести изделия.

Чтобы установить более четкую связь формы керамического изделия со способами и технологическими параметрами его изготовления, рассмотрим реакцию формуемого (обжигаемого) полуфабриката на внешние воздействия, которая может приводить к образованию дефектов.

Основная задача, которую необходимо решить при изготовлении изделия на всех этапах производства, – добиться сохранения однородности (или, в случае композиционных материалов – квазиоднородности) материала. Если на стадии подготовки формовочной массы эта задача относительно легко выполняема подбором и использованием оборудования и режимов его работы (очередности и параметров дозирования и смешивания), то, начиная со стадии формования, появляется возможность образования разнообразных дефектов, проявляющихся в нарушении структуры или формы полуфабриката (изделия).

Для оценки вклада технологических стадий в получение бездефектного изделия проводили анонимный экспертный опрос специалистов. В число экспертов входили 20 специалистов из производственных, научно-производственных фирм (10 экспертов), а также университетов (10 экспертов), область производственной или научной деятельности которых – производство, разработка и исследование керамики строительного (3 эксперта), хозяйственно-бытового (4), технического (8) назначения, а так же огнеупоров (5). Все опрошенные эксперты имели опыт работы в смежных областях производства керамики, т. е. не являлись узкими специалистами только в производстве керамики одного типа. Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Microsoft Excel (Анализ данных. Описательная статистика.) при доверительной вероятности 0,95. Необходимо отметить, что расчет стандартного

отклонения показал, что при оценке вклада большинства стадий технологии оно составляло 5-6 %, а максимальным было при оценке вклада стадии обжига (11,4 % при оценке экспертов научных организаций, 11,6 % при оценке экспертов производственных организаций). Вероятно, это связано с тем, что именно на стадии обжига проявляются дефекты, заложенные, но не обнаруженные на предыдущих переделах. Кроме того, в таких производствах, как производство декорированной посуды или плитки доля дефектов обжига заметно больше, чем в производствах кирпича, огнеупоров и большинства видов технической керамики, из-за большого количества так называемых дефектов внешнего вида – различных повреждений глазурного слоя и декора.

Результаты обработки опросных листов приведены на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Результаты опроса экспертов научных (а) и производственных (б) фирм о влиянии стадий производства керамических изделий на получение бездефектного изделия. 1 – рецепт массы; 2 – подготовка формовочной массы; 3 – формование; 4 – сушка; 5 – обжиг; 6 – обработка, полуфабриката, включая декорирование

По общему мнению, независимо от области применения изготавливаемых керамических изделий, максимальный вклад в получение бездефектного изделия вносит стадия обжига (26 % и 23 %), второе и третье места делят между собой стадии формования (18 % и 18 %) и подготовки формовочной массы (18 %

и 17 %). Однако, как будет показано далее, количество дефектов обжига значительно уступает количеству дефектов формования, с другой стороны, часть дефектов обжига являются следствием дефектов формования и сушки. Таким образом, экспертный опрос показал сложность оценки вклада той или иной стадии технологии на образование дефектов (все стадии вносят значительный вклад) и, следовательно, классификации дефектов по стадиям технологии.

Проблема снижения брака на производстве керамики непосредственно связана с формой изделий. Как указано в [214], при производстве фарфоровой и фаянсовой посуды доля брака существенно различается для изделий различных форм и габаритов (табл. 2.8). Данные таблицы подтверждают большое влияние на нормы потерь материала формы изделий. Более пористый и менее склонный к деформации фаянс отличается меньшими потерями от брака при обжиге (особенно при политем обжиге глазурованных изделий) по сравнению с фарфором, но и фаянсовые и фарфоровые изделия крупных форм более склонны к образованию дефектов в обжиге по сравнению с мелкими.

Таблица 2.8 – Сравнение доли потерь при обжиге посуды разных групп изделий на производствах фарфоро-фаянсовых изделий [214]

Группа изделий	Брак первого обжига, %		Брак второго обжига, %	
	Фарфор	Фаянс	фарфор	фаянс
Чашки, кружки	4-8		8-13	
Блюда	5-11	4-8	8-13	5-8
Тарелки	5-12	5-9	8-13	3-7
Крупные изделия	8-11	9-13	10-16	9-12

Таким образом, и увеличение массивности изделий, и усложнение их формы требуют серьезной коррекции режима обжига, а часто и применения специальной оснастки (подставки), предотвращающей не только деформацию, но и образование трещин. При их применении трещины не образуются из-за торможения усадки обжигаемой заготовки благодаря ее трению об огнеупорную подставку.

Анализ стандартов на керамические изделия [55, С. 11-12, 144, С. 7-8, 215-219] и литературы [97, 103, С. 82-86, 106, С. 144-160, 108, С. 183-184, 176, С. 213-220, 203, С. 49-51, 204, С. 105, 108-115, 208, С. 27, 29, 209, С. 10-14, 220-226], посвященных проблеме образования дефектов на различных стадиях технологии, показал, что для изделий различных форм основными причинами дефектов могут быть нарушения рецептуры массы или несоблюдение оптимальных параметров формования, сушки или обжига, а также ошибки в проектировании изделий и формующей оснастки (табл. 2.9).

Так, в примечаниях к [217, С. 7-8] сказано, что «дефекты могут быть вызваны неудовлетворительным качеством сырья, неудовлетворительной подготовкой сырья, неудовлетворительным формованием, сушкой, обжигом, декорированием, хранением и небрежным транспортированием». В таблицу, за редким исключением (дефект «летелый край», располагающийся на краях изделия), не включены дефекты глазурных покрытий и декоров (мушки, сборки, наколы и т. д.), так как подавляющее большинство из них не связано непосредственно с материалом и формой изделия, а являются результатом нарушения параметров подготовки, нанесения и закрепления декорирующих препаратов (глазури, декора) термообработкой.

В литературе, посвященной технологии керамики, всегда уделялось большое внимание образованию дефектов в керамических материалах и изделиях, т. к. основная задача технологии – получение изделия высокого качества с минимально допустимым количеством дефектов. Описание дефектов составляет часть текста стандартов на различные керамические изделия. Систематизацию дефектов и причин, их вызывающих, обычно производят по материалам, из которых изготовлена керамика (например, дефекты огнеупорных или тонкокерамических изделий), изделиям (дефекты керамической плитки) или стадиям технологии (дефекты обжига). Наиболее характерна классификация дефектов по месту их образования (например, дефекты поверхности). В конечном итоге неисправимые и допустимые дефекты характеризуют недостатки готовых изделий, исправимые дефекты и дефекты, приводимые к утилизации полуфабрика-

тов (возвратный брак), можно отнести к технологическим дефектам (дефектам полуфабриката). Дефекты готовых керамических изделий обычно объединяют в две группы: отклонения от физико-технических показателей и дефекты внешнего вида. Однако, такая классификация дефектов подразумевает чисто внешнее различие дефектов по месту образования и ничего не говорит о причинах их образования, между тем существует единство изделия-материала-технологии, рассматривая которое позволяет классифицировать дефекты, как результат нарушения формы изделия, исходного материала и (или) технологических параметров воздействия на него. Классификация дефектов по общим причинам образования даст возможность уйти от узкой направленности их рассмотрения и общей описательности, так характерной для изложения этих вопросов в технологии.

В таблице 2.9 дефекты классифицированы на дефекты структуры и формы, объяснение такой классификации следует далее.

Дефект – изъян, недостаток. В [227] (п. 3.6.3) дефект (defect): трактуется как «Невыполнение требования (3.1.2), связанного с предполагаемым или установленным использованием».

Само понятие говорит о нарушении качества объекта (изделия), т. е. нарушении определенного его свойства (свойств). Потребительские свойства изделий подразумевают определенную долю субъективности, т. е. проявляются лишь во взаимодействии с субъектом (человеком), который определяет их как положительные или отрицательные, в соответствии со своими потребностями. Например, [217, С. 7] классифицирует дефекты на измеримые и неизмеримые, оценка неизмеримых зависит от осмотра невооруженным глазом. Кроме того, в зависимости от назначения изделий из керамики, дефектами могут считаться как повышенная пористость (для конструкционной керамики), так и ее невысокое значение (для теплоизоляции). Для всех без исключения изделий дефектами можно считать те нарушения их формы или требуемой структуры материала, которые снижают уровень их потребительских свойств и, тем самым, понижают качество изделий.

Таблица 2.9 – Дефекты полуфабриката и изделий

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
1	Дефекты изделий, формованных способом шликерного литья						
1.1	Деформация	Непропорциональное изменение размеров	Посуда	Неравномерная пористость форм (смазка, остатки массы).	-	литейная форма	Формы
1.2	Трещины	Разрыв массы	Посуда	Те же причины	-	литейная форма	Формы
1.3	Швы	Следы в местах соединения		Изношенные формы	-	литейная форма	Формы
1.4	Выплавки	Местные углубления, заполненные зеленоватым стеклом	Посуда	Попадание гипса из-за изношенности форм.	-	литейная форма	Формы
1.5	Поры	Небольшие углубления и раковины	Посуда	Воздух на поверхности форм. Густой шликер, неправильная конструкция форм, их повышенная влажность или малая пористость.	структура	литейная форма, условия заливки	Формы, структуры
1.6	Недолив	Недоформованность изделия.	Посуда	Слишком густой шликер. Неудачная конструкция форм.	структура	литейная форма, условия заливки	Формы, структуры
1.7	Литьевые пятна.	Кружки или полосы, окаймленные углублениями.	Посуда	Сильная струя шликера. Низкая влажность шликера. Сухая форма.	Структура	Условия заливки	Структуры
1.8	Раковина	В виде полости неправильной формы	Огнеупоры	Несоблюдение параметров формования	-	Условия заливки	Структуры

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
1.9	Волнистость поверхности	Наплыв на поверхности (для литых и вибролитых)	Огнеупоры	Несоблюдение параметров формования, густой шликер	Структура	Условия заливки	Структуры
1.10	Остаток прибыли	Дефект литниковой поверхности в виде выступа (у плавленных изделий)	Огнеупоры	Конструкционный недостаток формы	-	литейная Форма	Формы
Дефекты изделий, формованных способом пластического формования							
2	Дефекты изделий, формованных способом раскатки						
2.1	Деформация плоских изделий	Непропорциональное изменение размеров Коробление	Посуда	Неравномерная влажность массы, наследование структуры	Структура	-	Структуры
2.2	Деформация полых изделий	Разнотолщинность стенок	Посуда	Те же причины	Структура	-	Структуры
2.3	Провисание и выпуклость дна	Несоответствие форме		Неправильная конструкция, плохая подготовка массы, несоответствие диаметра заготовки диаметру изделия, нарушение режима формования	структура	форма, Условия формования	Формы, структуры
2.4	Трещины края		Посуда	Избыточная пластичность и влажность, неоднородность, плохая срезка	Структура	Условия формования	Формы

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
2.5	Трещины дна	S-образные, в виде звездочек, трещины в центре дна	Посуда	Анизотропия массы, низкая прочность, нарушение условий формирования	структура	Условия формирования	Структуры
2.6	Трещины на ножке	Небольшие и частые трещины, сквозные трещины	посуда	Перегрев ролика, несоответствие конструкции массе, плохая конструкция	структура	Форма, условия формирования	Формы
2.7	Лизун	Небольшое утолщение черепка формы полуэллипса	Посуда	Повышенная влажность, несоблюдение режима формирования, изношенность шаблонов	структура	Формующий инструмент, условия формирования	Формы
2.8	Недоформованность полуфабриката	Незавершенная форма изделия	посуда	Неправильная укладка пласта, недостаточная толщина	-	Форма	Формы
2.9	Шероховатая или волнистая поверхность	На внешней поверхности плоских изделий	посуда	Малая разность частоты вращения, недостаточная температура ролика	-	Условия формирования	Формы
Дефекты изделий, формованных способом выдавливания							
2.10	"Драконов зуб"	Зубчатые выступы (разрыв сплошности) на внешней поверхности изделия	Кирпич	Пониженный вакуум, нарушение характеристик массы, большое трение о мундштук	структура	Мундштук, условия формирования	Формы

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
2.11	S-образная трещина, свили	Трещина на поверхности, перпендикулярной направлению прессования (для пластичных масс), эллипсоидные трещины	кирпич	Разделение массы на плохо слипающиеся потоки, повышенный коэффициент внешнего трения (пониженный внутреннего)	структура	Мундштук, условия формования	Структуры
2.12	Слоистость полуфабриката	Наличие в середине изделия воздушной прослойки	Кирпич	Недостаточное разряжение в вакуум-камере, неравномерное питание, износ лопастей	структура	Условия формования	Структуры
2.13	Недопрессованность углов полуфабриката	Трещины и осыпания углов изделия	Кирпич	Пониженная влажность массы, недостаточное разряжение	структура	Условия формования	Формы
3	Дефекты изделий, формованных способом прессования						
3.1	Разнотолщинность изделий	Разная толщина в направлении прессования	Плитка, огнеупоры	Непараллельность штампов, неравномерная влажность и зерновой состав	структура	Форма	Формы
3.2	Слойка Расслоение Слоистость	Слоистая структура В виде 2 или более слоев с различной микроструктурой	Плитка	Запрессовка воздуха при повышенном давлении, отклонениях влажности и большом количестве мелких фракций	структура	Условия формования	Формы

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
3.3	Низкая механическая прочность	Хрупкость отформованного изделия	плитка	Запрессовка воздуха из-за плотно подогнанных штампов, низкая влажность, недостаточное давление	структура	Форма, условия формования	Структуры
3.4	Недопрессовка	Видимая пористость, низкая плотность	плитка	Недостаточная влажность или давление прессования, неравномерная засыпка	структура	Форма, условия формования	Структуры
3.5	Заусеница на поверхности	Избыток материала в виде тонких полосок	Огнеупоры	Несоблюдение параметров формования, неравномерность засыпки, износ формы	структура	Форма, условия формования	Формы
3.6	Срывы кромок прессовок	Местные отколы на поверхностях полуфабриката	Технические детали	Неправильная конструкция или износ форм и штампов	-	Форма	Формы
4	Дефекты сушки						
4.1	Деформация	Изменение размеров, коробление	посуда	Неравномерная усадка. Слишком быстрый режим сушки для данной массы и формы Избыток электролитов	Форма, структура	Условия сушки	Формы

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
4.2	Трещины сквозные. Трещины краевые. Трещины срединные. "Рамочные". Адсорбционные	Разрывы сплошности на поверхности.	Посуда	Слишком быстрая, неравномерная сушка, неудачная конструкция формы. Масса, высокочувствительная к сушке. Увлажнение полуфабриката после сушки	Форма, структура	Условия сушки	Формы
4.3	Посечки	мелкие несквозные трещины	Посуда	Передержка изделий в форме, избыток электролитов, использование свежеприготовленного шликера, нарушение режима сушки	структура	Условия сушки	Структуры
4.4	Отставание, подрыв, Осевое смещение приставных деталей.	Отпадение приставных деталей (ручек, носиков). Трещина в месте приклейки деталей. Отклонение приставных деталей от места приставки.	Посуда	Различная влажность соединяемых деталей. Небрежная зачистка швов, недостаток жиделя	структура	Условия формования	Формы
5	Дефекты обжига						
	Деформация	Отклонение от формы, заданной в модели					

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
5.1	В утельном обжиге	Изменение размеров, коробление	Посуда	Неравномерная усадка, обжиг, односторонний нагрев. Пережог.	структура	Условия обжига	Формы
5.2	В политем обжиге	Изменение размеров, коробление	сантехника	Избыток плавней, наличие кальцита и гипса. Неудачная конструкция изделия Нарушение режима обжига	Форма, структура	Условия обжига	Формы
	Косоугольность, скошенность, кривизна, овальность,	Непропорциональное отклонение формы изделия размеров от заданных	Огнеупоры, плитка/трубы	Несоблюдение параметров формования, обжиг в условиях неравномерного распределения температур	-	Условия обжига	Формы
5.3	трещина	Разрыв изделия без разрушения его на части, шириной раскрытия более 0,5 мм.	Огнеупоры, кирпич	Несоблюдение скорости нагрева или охлаждения в обжиге	-	Условия обжига	Формы
5.4	посечка	Несквозная открытая или закрытая трещина шириной менее 0,5 мм.	Огнеупоры Кирпич, посуда, трубы	Несоблюдение скорости нагрева или охлаждения в обжиге	-	Условия обжига	Формы или структуры
5.3.1	сквозная трещина	Трещина, проходящая через всю толщину изделия, и протяженностью более половины ширины изделия.	Кирпич	Несоблюдение скорости нагрева или охлаждения в обжиге	-	Условия обжига	Формы

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
5.3.2	Односторонняя трещина	Щель, узкое несквозное углубление на поверхности изделия	Посуда				
5.3.3	Холодный треск	Трещины по глазури и черепку	Сантехника	возникающие после процесса обжига изделий на стадии их охлаждения, из-за внутренних напряжений без внешнего механического воздействия	структура	Условия обжига	Структуры или формы
5.3.4	Односторонняя заглазурованная трещина (трещина закрытая)	Щель, узкое несквозное углубление, расположенное на поверхности изделия, покрытое глазурью	посуда	Трещина, неопределенная после сушки	Форма, структура	Условия обжига	Структуры
5.3.4.2	Трещина открытая	трещина, не покрытая глазурью	Посуда	Трещина, образовавшаяся в процессе обжига	Форма, структура	Условия обжига	Формы
	Трещины после уфельного обжига	Разрывы сплошности на поверхности	Посуда	Плохой контроль изделий после сушки, их недостаточная прочность, нарушение режима обжига	Форма, структура	Условия обжига	Формы

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
	Трещины после политого обжига	А. Раскрытая щель. Б. Прямая линия с острыми краями. В. Радиально расходящиеся	Посуда	А. Дефект сушки или первого обжига. Б. Резкое охлаждение. В. Механические усилия при оправке	структура	Условия обжига	Формы
5.5	Сколы, выбоины, щербини Откол	Механическое глазурованное или неглазурованное повреждение черепка	Посуда	Низкая прочность после сушки и обжига, недопустимая ударная нагрузка в результате внешнего воздействия	структура	Условия обжига	Формы
5.6	Откол неглазурованный	механическое повреждение изделия, не покрытое глазурью.	Посуда	Недопустимая ударная нагрузка в результате внешнего воздействия	-	Условия транспортировки	Формы
5.7	Откол глазурованный	механическое повреждение изделия, покрытое глазурью.	Посуда	Недопустимая ударная нагрузка в результате внешнего воздействия	-	Условия транспортировки	Формы
5.8	Откол		кирпич	Дефект изделия, вызванный наличием карбонатных или других включений	структура	-	Формы
5.9	Отбитость впадина	Механическое повреждение грани, ребра, угла изделия.	Кирпич, трубы, огнеупоры	Недопустимая ударная нагрузка в результате внешнего воздействия	-	Условия транспортировки	Формы
5.10	Шелушение	Разрушение изделия в виде отслоения от его поверхности тонких пластинок	Кирпич		структура	-	Формы
5.11	выкрашивание	Осыпание фрагментов поверхности изделия	кирпич		Структура	-	Формы

№	Название дефекта	Внешний вид дефекта	Примеры изделий	Причины дефекта	Решающее воздействие на образование дефекта		Дефект
					Внутренний сигнал	Внешний сигнал	
5.12	растрескивание	Появление или увеличение размера трещины	кирпич	после воздействия знакопеременных температур	-	Условия обжига или хранения	Формы
5.13	Летелый край	Сколы глазури по краям изделия	Посуда	Разница в коэффициентах термического расширения глазури и черепка	Структуры	Условия обжига	Формы
5.14	пустота	Внутренний дефект в виде незаполненного пространства	Огнеупоры	Неправильная засыпка или заливка при формировании	Формы	-	Структуры
5.15	Сердцевина, черная сердцевина	Темный участок в середине изделия	Огнеупоры, кирпич	В результате недостаточного окисления углеродистых примесей или обусловленный образованием в процессе обжига изделия оксида железа (II)	-	Условия обжига	Структуры

Дефекты могут быть заложены на разных стадиях жизненного цикла изделия и проявляться на последующих стадиях – ошибки замысла (проектирования) ошибки исполнения (производства) и ошибки использования (эксплуатации). Так ошибки (собственно говоря, дефекты) проектирования изделия (неверный выбор материала, неправильная конструкция детали) проявятся малом выходе годных изделий или невозможности их эксплуатации при заданных условиях. Технологические дефекты даже правильно спроектированного изделия также повысят количество брака при его производстве или уменьшат срок эксплуатации (службы).

Количество основных стадий производства керамического изделия обычно составляет от 5 до 15, основными из которых являются подготовка формовочных масс (обогащение сырья, измельчение, классификацию по размерам, смешивание, обезвоживание, гранулирование), формование, сушка, обжиг и декорирование (или механическая обработка поверхности, металлизация и т. д.). Грубое нарушение технологических режимов на любой из основных или вспомогательных стадий является причиной образования одного или сразу нескольких дефектов, которые часто могут быть обнаружены лишь в готовом изделии, а иногда только в условиях эксплуатации.

Между тем причина образования дефектов везде практически одна и та же – несоответствие уровня или условий энергетического воздействия, иногда сопряженного с массообменом, на объект (массу, полуфабрикат, готовое изделие) потенциальным возможностям к адаптации (структуре, реологии, прочности связей и т. д.) к внешним условиям. Обмен энергией, массой, информацией является свойством открытой физической системы, в качестве которой можно представлять объект технологии. Наиболее всеобъемлющим является энергообмен.

В серии статей [177, С. 101, 228, 229] рассматривается синергетический подход к технологии керамики. Неравновесные процессы обмена материей (вещество, энергетические поля, информация) между внешней средой и изделием при его изготовлении и эксплуатации наиболее обще и емко описывает си-

нергетика [230, 231] Реакция материала на внешнее воздействие может привести как к совершенствованию его структуры, так и образованию дефектов. Так называемым внутренним воздействием (сигналом), управляющим изменениями материала при воздействии на него внешних сил, является его структура, т. е. взаиморасположение связанных между собой элементов (частиц, пор, фазовых образований, межфазных границ). На атомном уровне рассмотрения элементами структуры можно представлять агрегаты точечных дефектов кристаллической структуры, примесные атомы, вакансии и ионы.

В работе [232] с позиции синергетического подхода рассмотрены причины образования дефекта глазурного покрытия «сборка». Известно, что в качестве причин этого распространенного дефекта, в числе прочих, называют как нарушение технологии приготовления глазури (например, «перемол» глазурной фритты), так и нарушение технологии политого обжига (недопустимое превышение скорости нагрева). И та, и другая причина – пример несоответствия внутреннего (размер частиц глазурной фритты) или внешнего (нагрев) воздействия на материал, который в результате самоорганизуется не в виде покрытия равной толщины, а в виде капель на поверхности изделия. Управляя внутренним или внешним сигналом, можно управлять структурой покрытия. В приведенной работе разбиение свеженанесенного слоя глазури на квадраты с помощью вдавливания смоченной в масле сетки позволило исключить сборку глазури при обжиге.

Изделие представляет собой материал, заключенный во внешнюю форму. Поверхность изделия в значительной степени отличается по структуре от структуры материала из-за избыточной поверхностной энергии упруго-напряженного поверхностного слоя [233]. Эта энергия частично локализована в дефектах, примесях и новообразованиях, концентрация которых вблизи поверхности тела увеличена. Энергетические воздействия из окружающей среды могут вызвать не только изменения в структуре поверхности (например, образование трещины) или материале (например, полиморфные превращения), но и привести к изменению формы при деформации изделия. Рассеивание (диссипа-

ция) и поглощение (аккумулирование) подводимой энергии, например, релаксация механических напряжений, будет осуществляться по предпочтительным направлениям, задаваемым структурой материала и формой изделия. На рис. 2.18 представлена схема взаимосвязей структуры материала и формы полуфабриката и изделия при внешних и внутренних воздействиях, происходящих при изготовлении и эксплуатации изделия.



Рисунок 2.18 – Схема взаимосвязей структуры материала и формы изделия при внешних и внутренних воздействиях

Иерархию структуры керамического материала обычно описывают, исходя из размеров элементов структуры [234-236], и включают в нее следующие уровни, уточненные в [237, 238]: макроструктурные элементы, видимые невооруженным глазом (более 1 мм), микроструктурные, видимые с помощью оптического микроскопа (0,001 до 1 мм) и субструктурные, изучаемые с помощью электронной микроскопии (менее 0,001 мм). К макроструктурным элементам относят крупные зерна (например, шамота), включения стеклофазы, крупные поры, трещины. К микроструктурным и субструктурным – те же элементы соответствующих размеров, вплоть до атомов. В этой же работе к элементам

структуры разного уровня справедливо относят дефекты соответствующего размера (трещины, микротрещины, дислокации, вакансии). При этом дефекты часто относят к практически неизбежным нарушениям структуры, а не к ее элементам. Нерегулярная многоуровневая иерархическая структура керамики – результат необратимых неравновесных процессов, протекающих на всех технологических стадиях изготовления изделия. Рассматривая дефекты структуры материала, наиболее просто их классифицировать по размеру. Однако, при этом не вполне ясно, куда отнести такой часто распространенный дефект, как деформация изделия. Безусловно, явление деформации сопровождается изменениями множества включенных в этот процесс элементов структуры, включая дефекты. Их количество и вид весьма различно и связано с областью полуфабриката или изделия, в которой происходит деформация, сказывающаяся на изменении формы полуфабриката или изделия. Это заставляет особо выделять элемент макроструктуры, являющийся формой полуфабриката или изделия. Предлагается рассматривать форму полуфабриката или изделия (системы) как надструктуру или высший элемент структуры системы, а дефекты формы относить к надструктурным. В то же время, все элементы структуры, находящиеся внутри системы, ограниченной формой, называть дефектами материала. При этом форма является границей между открытой системой и окружающей средой. В этом делении есть некоторая условность, поскольку поверхность тоже состоит из материала, но этот материал обладает особыми свойствами, связанными с влиянием на него границы раздела системы (формы полуфабриката или изделия) с окружающей средой.

Исходя из взаимосвязи, показанной на рисунке 2.18, дефекты, возникающие в материале или полуфабрикате в процессе изготовления изделия, можно разделить, прежде всего, на дефекты структуры материала и дефекты формы (табл. 2.9). К дефектам материала можно отнести дефекты структуры, находящиеся в областях полуфабриката или изделия, удаленных от границы с окружающей средой (формой) на расстояние, где влияние границы достаточно ослаблено. К дефектам формы – все дефекты, которые в первую очередь изменя-

ют размеры, форму изделия и ее сплошность. Это дефекты, находящиеся на поверхности и в прилегающей к ней областях. Следует отметить, что в изменении формы принимают участие все дефекты материала, участвующие в пластической деформации, приводящей к изменению формы. Так, небольшие закрытые несквозные трещины можно отнести к дефектам структуры, а трещины (обычно, размером более 0,5 мм), раскрывающиеся на поверхности и нарушающие сплошность формы, а также более глубокие, не приводящие к разрушению полуфабриката или изделия и связанные с поверхностью – к дефектам формы. Несмотря на некоторую условность, такая классификация более понятна для рассмотрения потребительских свойств изделий, которые в своем большинстве не выделяют дефекты структуры, учитывая их влияние опосредованно (прочность, термостойкость и т. д.).

Из перечисленных в таблице 2.9 дефектов более 60 % формования, 75 % сушки и 70 % дефектов обжига являются дефектами формы. При этом, если дефекты структуры имеют в числе причин нарушения рецептуры, несоответствие уровня или интенсивности внешнего воздействия возможностям релаксации напряжений материалом, то причинами дефектов формы часто является неудачная конструкция формы, недостаточное ее заполнение материалом, недопустимое внешнее воздействие.

Степень внешнего энергетического воздействия (механического при формовании и теплового при сушке и обжиге) на изделия и его интенсивность должна соответствовать структурным характеристикам материала и полуфабриката. На рисунке 2.19 представлена схема энергетических воздействий на материал и полуфабрикат на разных стадиях производства изделия и реакция структуры материала. Система (материал) на различных стадиях производства претерпевает ряд переходных состояний «устойчивость-неустойчивость». Причинами перехода системы в неустойчивое состояние служат как внешние механические или термические воздействия, так и внутренние процессы (например, агрегация, ведущая к расслаиванию суспензии).

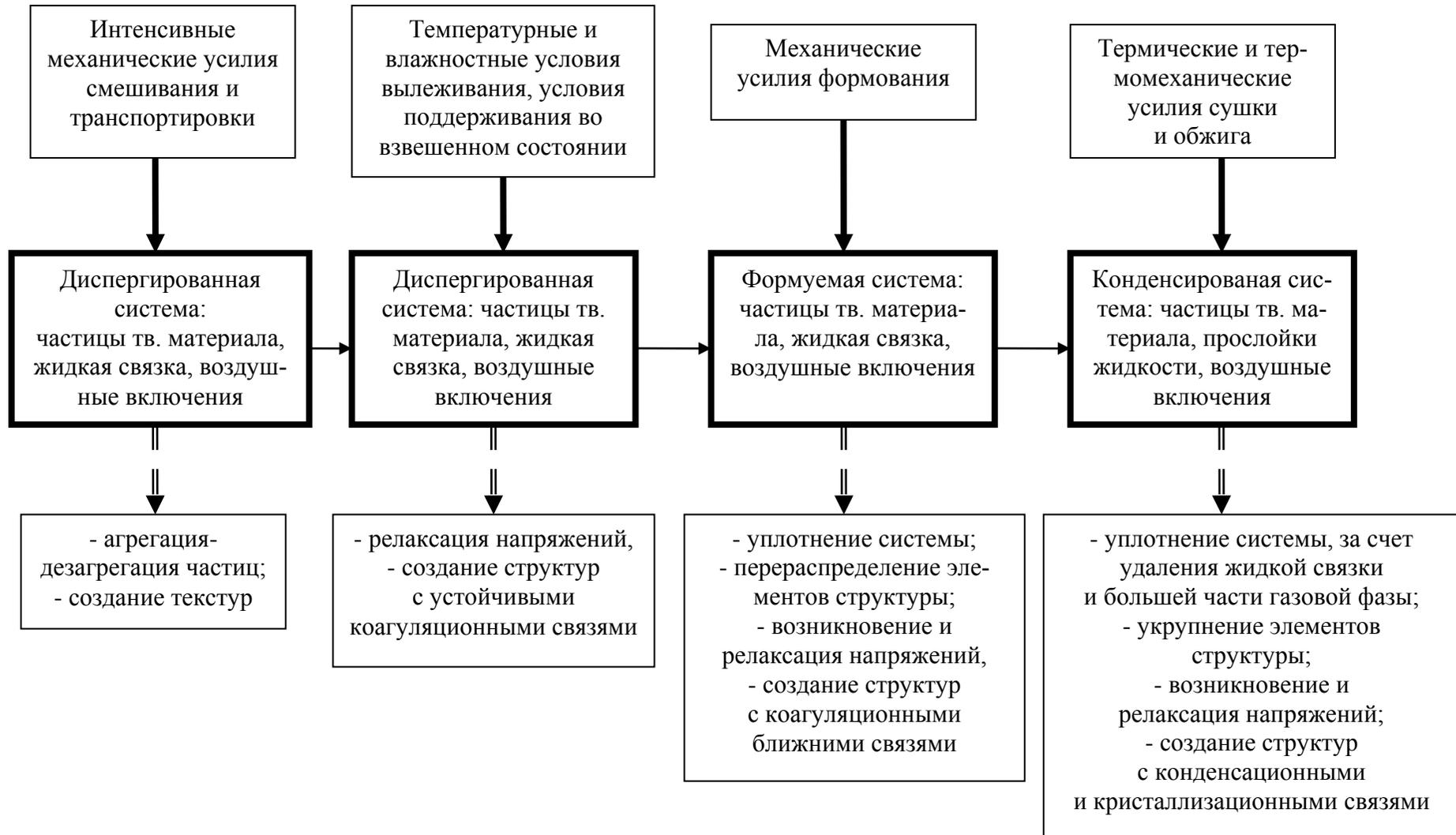


Рисунок 2.19 – Схема энергетических воздействий на материал и полуфабрикат на разных стадиях производства изделия: подготовке формовочной массы, вылеживании, формовании и термической обработке

При невозможности оперативной релаксации избыточных напряжений на сброс энергии во внешнюю среду (тепло) или структурные изменения (полиморфные переходы, перемещение элементов структуры, создание дефектов структуры и т. д.), материал использует энергию на создание надструктур (крупных пор, трещин) или изменение формы (деформацию).

Рассмотрим подробнее дефекты формы – выходящие на поверхность трещины и деформацию. Исходя из теории прочности твердых веществ, можно утверждать, что реакцией керамического материала на приложенное к нему или развивающееся в нем напряжение может быть, как деформация, так и трещина [171, С. 12, 237, С. 43, 238, С. 13-17]. Керамический полуфабрикат в процессе изготовления изделия последовательно проходит стадии изменения структуры – от пластичного состояния с развитыми коагуляционными контактами между частицами при формовании до хрупкого, с конденсационными контактами, после сушки. В процессе обжига, особенно в присутствии жидкой фазы, спекающиеся частицы могут приобретать относительную подвижность, сообщая материалу определенную пластичность. В процессе охлаждения спеченный керамический материал с кристаллизационными контактами между зернами и участками стеклофазы вновь приобретает хрупкость. Но и в процессе эксплуатации при высоких температурах, при приложении к огнеупорному материалу напряжений меньших предела прочности, можно наблюдать необратимую пластическую деформацию – ползучесть (крип) [172, С. 219-223]. Поведение пластичного и хрупкого материала под нагрузкой отличается, прежде всего, тем, что первый может испытывать пластическую деформацию (в некоторых случаях – деформацию по механизму вязкого течения), второй – испытывает непродолжительную упругую деформацию и разрушение. Таким образом, деформация керамического полуфабриката или изделия может происходить лишь в тех условиях, когда материал пластичен и интенсивность приложенной к нему нагрузки такова, что допускает перестройку структуры. Во всех иных случаях при превышении предела прочности образуется разрыв – трещина. Отсутствие или малая доля пластичности в ряде состояний керамического полуфабриката (после

прессования, сушки, предварительных обжигов) и, особенно, изделия представляет собой серьезную проблему из-за механизма хрупкого необратимого разрушения при превышении предела прочности. Наоборот, при повышенных температурах для некоторых керамических материалов (например, нитрид кремния) наблюдается повышение коэффициента трещиностойкости  $K_{Ic}$  из-за появления пластичной деформации.

Трещины являются настолько распространенным дефектом, особенно при создании изделий художественной керамики, что в «Словаре гончара» им посвящена одна из самых больших статей [239]. Авторы выделяют несколько видов (причин) образования трещин:

- термический удар в процессе охлаждения изделия в печи;
- неудачная форма изделия (неравномерное сечение, неглаженные углы);
- неправильный выбор способа формования, параметров изготовления;
- проблемный материал (глина);

По виду раскрытия трещин и месту их расположения можно сделать выводы о наиболее вероятной причине их образования, однако, как правило, причин может быть названо несколько, в том числе дефекты структуры, возникшие на предыдущих технологических стадиях. Так, из-за значительного превышения предела прочности при сжатии для керамического материала над пределом прочности при растяжении трещины в центре изделий образуются обычно при нагревании изделия, на поверхности – при охлаждении [171, С. 229].

Независимо от вида керамических изделий можно выделить 2 основных причины образования трещин: недопустимое внешнее механическое (термическое) воздействие на полуфабрикат (изделие) в процессе его изготовления (эксплуатации), или разрыв сплошности материала в результате внутренних процессов, вызванных внешним воздействием. Обычно сначала это приводит к несогласованным изменениям объема локальных областей полуфабриката (изделия), вызывающих напряжения между этими областями, микротрещинам. И в том, и в другом случае речь идет о превышении предела прочности материала

усилиями, возникающими в его структуре в результате несоответствия внешнего воздействия возможностям аккумуляции и рассеивания поступающей энергии. В первом случае речь идет о слишком интенсивном воздействии на однородное изделие, например, в результате термоудара. Во втором – о наличии в материале структурных дефектов, включая нарушение рецептуры, наличие концентраторов напряжений и т. д. При этом трещины могут образовываться при нормальных по уровню сообщаемой энергии и ее интенсивности, технологически оправданных, внешних воздействий, вследствие удаления избыточной влаги из полуфабриката, неравномерной усадки, реакции гидратации, разложения карбонатов и т. д.

Существующие взгляды на зарождение и распространение трещин в керамических материалах рассматривают ответственными за разрушение материала наличие в нем дефектов, возникающих обычно на ранних технологических стадиях, и распределенных в материале. В результате на достоверность полученных результатов по измерению механической прочности керамических образцов влияет, по разным расчетам, эффективный объем образца, зависящий от схемы нагружения, или площадь нагруженной поверхности. Расчеты трещиностойкости (коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  – формула 11) сводятся к определению энергии разрушения (распространения уже возникшей трещины) и описывается статистическими методами (например, теорией Вейбулла), т. к. нередко разрушение материала происходит при более низком напряжении, чем определенный на образцах средний предел прочности [170, С. 12, 173, С. 241].

$$K_{Ic} = \sigma_1 \sqrt{aY}, \quad (11)$$

где  $\sigma_1$  – растягивающее напряжение;  $a$  – большая полуось эллиптической трещины;  $Y$  – постоянная, зависящая от формы и размера трещины.

Методы определения трещиностойкости спеченных материалов разнятся: обычно используют нагружение образцов с имитирующим микротрещину надрезом или вдавливание инденторов.

Для определения трещиностойкости глиняного полуфабриката под влиянием внутренних усадочных напряжений, развивающихся в процессе сушки, используют характеристику чувствительности к сушке. Коэффициенты чувствительности определяют на образцах в виде пластин по двум распространенным методикам, измеряя потери воды при сушке и связывая их с линейной и объемной усадками [209, С. 56-73, 240]. Если усадки минимальны – материал менее чувствителен к сушке и, следовательно, более трещиностоек.

Известно, что при механизме разрушения хрупких неметаллических тел решающая роль в образовании трещины отводится количеству и размеру дефектов, имеющихся в полуфабрикате или изделии. Чем крупнее дефект, тем больше энергия, которая может быть рассеяна (диссипирована) при зарождении и движении трещины [241, 242], недаром в [170, С. 12] дефекты, ответственные за зарождение трещин названы «трещиноподобными». К таким дефектам могут относиться дефекты микроструктуры: микротрещины, включения примесей, слоистость и т. п. Как правило, такие дефекты превращаются в трещиноподобные на стадии сушки, когда происходит неравномерная воздушная (сушильная) усадка и микротрещины образуются на границах участков с различной усадкой, вокруг включений твердой фазы. Причинами возникновения дефектов могут быть места концентраторов напряжений, определенные формой изделия. При производстве изделий сложной формы, особенно из склонных к текстурированию (т. е. созданию ориентированных участков при формовании) глинистых масс, характерен так называемый фуксиновый контроль (промазывание проблемных участков полуфабриката после сушки окрашенным керосином), позволяющий визуально определить наличие микротрещин.

Таким образом, макро- и микротрещины, возникающие в процессе сушки и, в свою очередь, являющиеся результатом неравномерной усадки из-за неоднородностей, расслоения (текстурирования), представляют одну из самых опасных угроз для образования трещин изделий в обжиге, наряду с резким нагревом или охлаждением изделий. Необходимо также учитывать влияние формы изделия (полуфабриката), на которое оказывается механическое или терми-

ческое воздействие: как область этого воздействия (схема нагружения), так и особенности формы (расположение концентраторов напряжений) часто оказывает решающее влияние на появление трещин.

Другим распространенным дефектом полуфабрикатов при сушке или изделий при обжиге и в процессе эксплуатации при высокой температуре является деформация (табл. 1.14). Деформация может трактоваться как отклонение от заданной формы, что требует уточнения. Так как в процессе сушки и обжига, а для изделий, формуемых способами шликерного литья и литья из расплава, и в процессе формования, полуфабрикаты испытывают усадку, то изменения в размерах изделия учитываются уже на стадии проектирования. Известно также, что усадка никогда не бывает абсолютно равномерной, поэтому речь идет о таком отклонении от заданной формы, которое превышает допустимое значение для данного изделия. Например, при расчете размеров эластичных полимерных форм сегодня учитывают неравномерность усадки полуфабриката при обжиге. При этом не только размер, но и форма полуфабриката отличается от требуемой после обжига формы спеченного изделия. [243, 244].

Допустимые пределы отклонения от размеров для различных сечений изделия указываются в стандартах в абсолютных (мм) или, реже, в относительных (%) единицах. Например, для посуды хозяйственной из полуфарфора [218, С. 3] деформация не должна превышать 2,5 % от наибольшего диаметра или длины изделия, для фаянсовой [245] – не более 1,5 %, для фарфоровой – 1,5 % для плоских изделий и 2,0 % для полых [156, С. 3]. При этом ничего не говорится об отклонениях по высоте изделий. Для кирпича и камней [55, С. 8-9] отклонения от размеров указаны в мм и варьируются для длины, ширины и толщины изделий, также регламентируется отклонения от перпендикулярности смежных граней (мм) и плоскостности граней (мм). Для керамических плиток [157, С. 4] указаны допустимые отклонения по длине, ширине и толщине (мм), от прямоугольности (косоугольность) и плоскостности (мм). Как для кирпича, так и для плиток допустимая деформация зависит от размеров изделий. Для санитарно-технических керамических изделий в [144, С. 3] указаны несколько допустимых

(мм) отклонений (деформации или коробления) от размеров различных зон изделий (монтажных, верхних, нижних и т. д.). Допустимые отклонения в размерах огнеупорных модульных материалов (кирпичей), согласно международным нормам, оценивают в 0,75-2 %, деформацию (коробление) – в 1,5 % (измеряется по диагонали) [246].

Деформация формы может наблюдаться уже в процессе сушки или обжига полуфабриката и проявляться в короблении плоских поверхностей, овальности оболочек цилиндрического сечения, провисании краев и т. п. Деформация керамических изделий в процессе службы особенно характерна для огнеупорных изделий, находящихся в условиях высоких температур. Ее отличают от дополнительной усадки или увеличения объема, которые также приводят к недопустимому изменению размеров изделия.

Превалирующими причинами, вызывающими деформацию, могут быть как внутренние воздействия (несоблюдение рецепта, неоднородности структуры, форма полуфабриката или изделия), так и внешние (формующая оснастка, оснастка для сушки и обжига, превышение интенсивности сушки, температуры обжига или службы, направленное температурно-влажностное или температурное воздействие). Внутренние воздействия – результат заложенных на предыдущих стадиях дефектов или ошибок проектирования формы изделия. Например, повышенная влажность или отсутствие ребер жесткости для полуфабриката пластинчатой формы может привести к типичной деформации, при которой значительные сжимающие напряжения быстрее сохнувших внешних слоев «поднимают» края плитки. Такой же результат можно наблюдать при односторонней сушке с преимущественным испарением влаги с открытой стороны плитки (внешнее воздействие).

Керамическая плитка – наиболее уязвимое изделие для коробления, т. к. ее форма весьма чувствительна как к внутренним воздействиям, так и внешним. В [223, С. 294-286, С. 267-275] дефекты размеров изделий разделяют на 2 класса: так называемые «дефекты ровности» - плоскостности, связанные в основном с условиями обжига, и дефекты формы – косоугольность, связанную как с ус-

ловиями обжига, так и неоднородностями пресс-порошка и загрузки в пресс-форму.

Другой типичный объект, испытывающий деформацию во время обжига, – изделия из фарфора: санитарно-технические (умывальники, бачки, унитазы и т. д.) и хозяйственно-бытовые (посуда). Основная причина деформации фарфоровых изделий – высокая доля плавней в составе рецептуры фарфора, поэтому большое внимание уделяется конструкциям тонкостенных изделий для того, чтобы избежать деформации под действием собственного веса или градиента температур [97, С. 89, 106, С. 144-160]. В этом случае внутренним воздействием выступает форма обжигаемого полуфабриката, задающая распределение массы по внешнему объему, внешними воздействиями – скорость достижения, величина и распределение температуры (градиент температуры в печи) и время выдержки при температуре, обеспечивающей вязко-пластичное поведение материала.

При производстве керамической посуды и художественных изделий их деформацию учитывают уже при изготовлении моделей [247] и предпринимают специальные меры для ее предотвращения и при обжиге (спарка чашек, подпорки выступающих частей скульптур и т. д.).

Наиболее подробно деформацию исследуют для прогнозирования поведения керамических изделий в области высоких температур, в частности, для огнеупорных материалов. Само понятие огнеупорности трактуют, как способность огнеупора или огнеупорного сырья противостоять, не расплавляясь, воздействию высоких температур [248] и определяют по методу деформации пироскопов (конусов Зегера) [249].

Деформацию керамики и огнеупоров рассматривали в монографии [238, С. 4, 47-48], разделяя 2 типа материалов, различающихся по своим структурам: огнеупоры со значительным количеством жидкой фазы и поликристаллическая керамика. На деформацию поликристаллических материалов с ионно-ковалентными химическими связями и сложной иерархией структуры основное влияние оказывают макроструктурные дефекты. В плотной керамике с малым

количеством стеклофазы за деформацию протекает по механизму диффузионно-вязкого течения, в материалах сложного строения – деформация обусловлена поведением «слабого звена» дефектов, включений стеклофазы. В случае непрерывной матрицы стеклофазы деформация определяется ее вязкостью.

В монографии [250] рассмотрена деформация разных классов материалов, включая керамические, исходя из их вязкого течения (пластичности) в области высоких температур. Автор использовал формулы для определения упругой деформации образцов различной формы под собственным весом и нагрузкой для расчета их неупругой деформации с учетом формулы пересчета через модуль  $S$  (формула):

$$S = E\tau/3\eta, \quad (12)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\tau$  – время деформации,  $\eta$  – эффективная вязкость.

$$\varepsilon_\tau = S \varepsilon \quad (13)$$

$\varepsilon_\tau$  – величина неупругой деформации,  $\varepsilon$  – величина упругой деформации.

Таким образом, деформация керамического полуфабриката и изделия, прежде всего, наблюдается в процессе обжига, характерна для керамики с большой долей плавней (фарфора) и зависит от формы изделия и внешних воздействий.

### **Выводы по разделу 2.2:**

1. Условную эффективную вязкость системы «порошок-связка-поры» можно рассматривать в качестве универсального критерия при анализе поведения керамического полуфабриката и изделия в процессе его изготовления и эксплуатации.

2. Дефекты структуры и дефекты формы изделия являются результатом синергетического эффекта взаимодействия внешнего воздействия с внутренними сигналами – структурой материала, конфигурацией и массой полуфабриката (изделия) и приводят к нарушению однородности структуры и формы.

3. Наиболее распространенными дефектами формы являются трещины, возникающие в основном в процессе сушки, и деформации, возникающие в основном в процессе обжига.

4. Помимо параметров внешнего воздействия и внутреннего сигнала большую роль на синергетический эффект оказывает направленность, т. е. симметрия воздействий.

**Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Устойчивость керамического полуфабриката художественных и технических изделий различной формы к образованию дефектов [Текст] / **Захаров А. И.**, Андреев Д. В. // Дизайн. Теория и практика. (электронный журнал). 2011. Вып. 8. С. 50-70.

2. **Захаров А. И.** Форма керамических изделий: философия, дизайн, технология [Текст] / **Захаров А. И.**, Кухта М. С. Томск: STT, 2015. 224 с. (сер. Дизайн и общество).

## 2.3 Критерии сложности формы керамических изделий: симметрия.

### Сложность формы и потребительские свойства. Симметрия изделий

Рассматривая устойчивость формы керамических изделий к внешним воздействиям, можно обратиться к окружающим нас природным формам неорганической материи, имеющим во многом сходный химический и фазовый состав с традиционной керамикой.

В природе частицы материала (минералов) образуются в результате роста из центров кристаллизации. С ростом частицы до размеров, превышающих коллоидные, проявляются морфологические особенности вещества, возникает индивидуальная форма монокристалла. Внешняя огранка кристаллов определяется структурой вещества (его электронным строением) и, в свою очередь, свойствами симметрии пространства [251]. Форму идеальных кристаллов определяют 2 основных закона: закон двугранных углов и закон целых чисел [252], основанные на строгом соответствии их формы кристаллической структуре индивидуального вещества, кратности геометрических параметров ее элементарной ячейки.

Кристаллические формы материи могут быть охарактеризованы тремя основными типами симметрии: осевой (L), плоскостной (P) и центральной (C). Осевая симметрия (иначе поворотная) характеризуется возможностью совмещения элементов структуры при повороте вокруг оси симметрии, плоскостная – совмещением при отражении в плоскости симметрии, центральная – при инверсии в центре симметрии (рис. 2.20). Форма, не обладающая свойствами симметрии, называется ассиметричной. Формы монокристаллов минералов характеризуют одной из 14 пространственных категорий (решеток Браве), которые, в свою очередь, можно разделить на три группы: низшей, средней и высшей симметрий. К пространственным решеткам высшей симметрии относятся решетки, обладающие сочетанием плоскостной и осевой симметриями, с осями не ниже 3-его порядка.

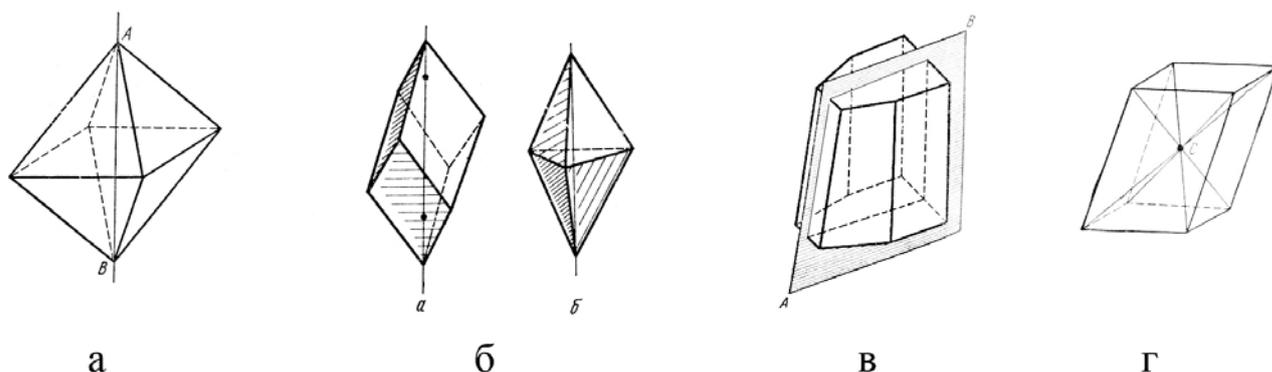


Рисунок 2.20 – Фигуры, обладающие: осями симметрии в сочетании с плоскостями и центром (а, б, г), плоскостями (а-г), плоскостью симметрии и осями (в), центром симметрии в сочетании с плоскостью и осями (г) [252]

Формы реальных кристаллов являются следствием влияния условий кристаллизации твердого вещества из расплавов, растворов или газовой фазы. Отклонения от идеальной формы кристаллов (присущей каждому веществу внутренней симметрии), наблюдаемые в реальных кристаллах, связаны с отклонениями от равновесных условий кристаллизации – с неравновесностью процессов роста в результате следования симметрии окружающей среды (принцип П. Кюри), которая определяется наличием совокупного действия нескольких внешних сил (земного тяготения, потоков воды и т. п.) [253, 254]. Так называемые ложные формы реальных кристаллов минералов несут в себе отпечаток их роста в специфических условиях, что позволяет делать выводы об их генезисе.

Принцип П. Кюри – попытка объединить геометрические законы симметрии с направлением воздействия на предмет, таким образом, он имеет непосредственное отношение, как к процессу синтеза вещества, так и к процессу создания изделия. Исходя из принципа суперпозиции следует, что в материальных гетерогенных системах симметрия части обычно не ниже симметрии целого [255]. Для описания внешних воздействия на объект П. Кюри ввел понятие предельных точечных групп симметрии, содержащих оси симметрии бесконечного порядка (симметрию конуса, цилиндра, шара, в том числе их покоящиеся, вращающиеся и скрученные разновидности – рис. 2.21). Это позволило ему

описывать симметрию физических полей, в частности магнитного и электрического.

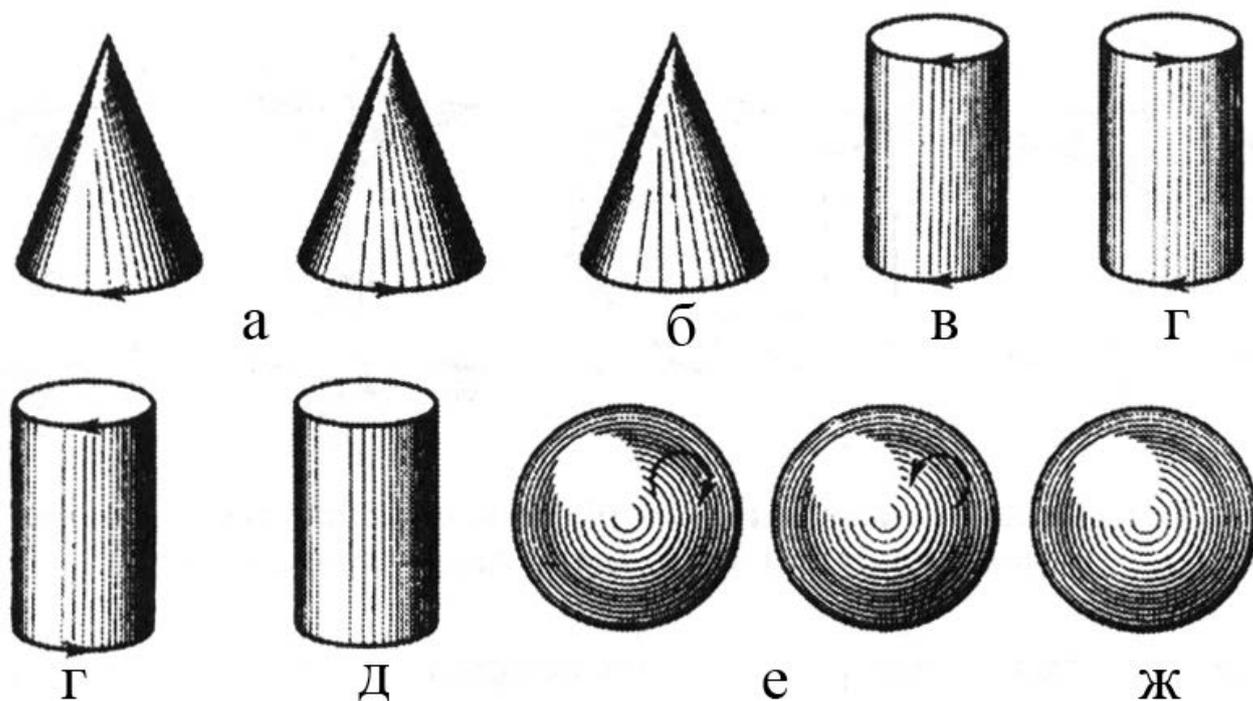


Рисунок 2.21 – Фигуры вращения, изображающие предельные точечные группы симметрии П. Кюри [255, С. 16]: а – симметрия вращающегося (левого и правого) конуса с одной осью симметрии бесконечного порядка  $\infty$ , б – симметрия покоящегося конуса с одной осью и бесконечным числом вертикальных плоскостей  $\infty m$ , в – симметрия вращающегося цилиндра  $\infty/m$ , г – симметрия 2 форм скрученного цилиндра  $\infty 2$ , д – симметрия покоящегося цилиндра  $\infty/mn$ , е – симметрия 2 форм вращающегося шара  $\infty/\infty$ , ж – симметрия покоящегося шара  $\infty/\infty m$

На рис. 2.22 показаны примеры принципа суперпозиции симметрии [255, С. 18]. В первом случае при наложении двух фигур, обладающих разными типами симметрии – равностороннего треугольника (осевая симметрия 3 порядка и 3 плоскости симметрии) и квадрата (осевая симметрия 4 порядка и 4 плоскости симметрии), образуемая фигура обладает пониженной симметрией (1 плоскость симметрии) по сравнению с исходными фигурами. Во втором – действие на куб (а) симметрии силового поля растяжения (б) различных направлениях (в) приводит к его искажению и понижению типа симметрии (г).

Принцип П. Кюри имеет глубокий философский смысл, утверждающий не только наличие симметрии, как неотъемлемого свойства пространства, которое определяет организацию материи, но, в сочетании с теорией И. Пригожина о неравновесных процессах дает представления о возможных формах ее эволюции [255, С. 155]. Недаром в последнее время чаще используют выражение «принцип Пригожина-Кюри», когда речь идет о симметрии возникающих в результате неравновесных процессов диссипативных структур.

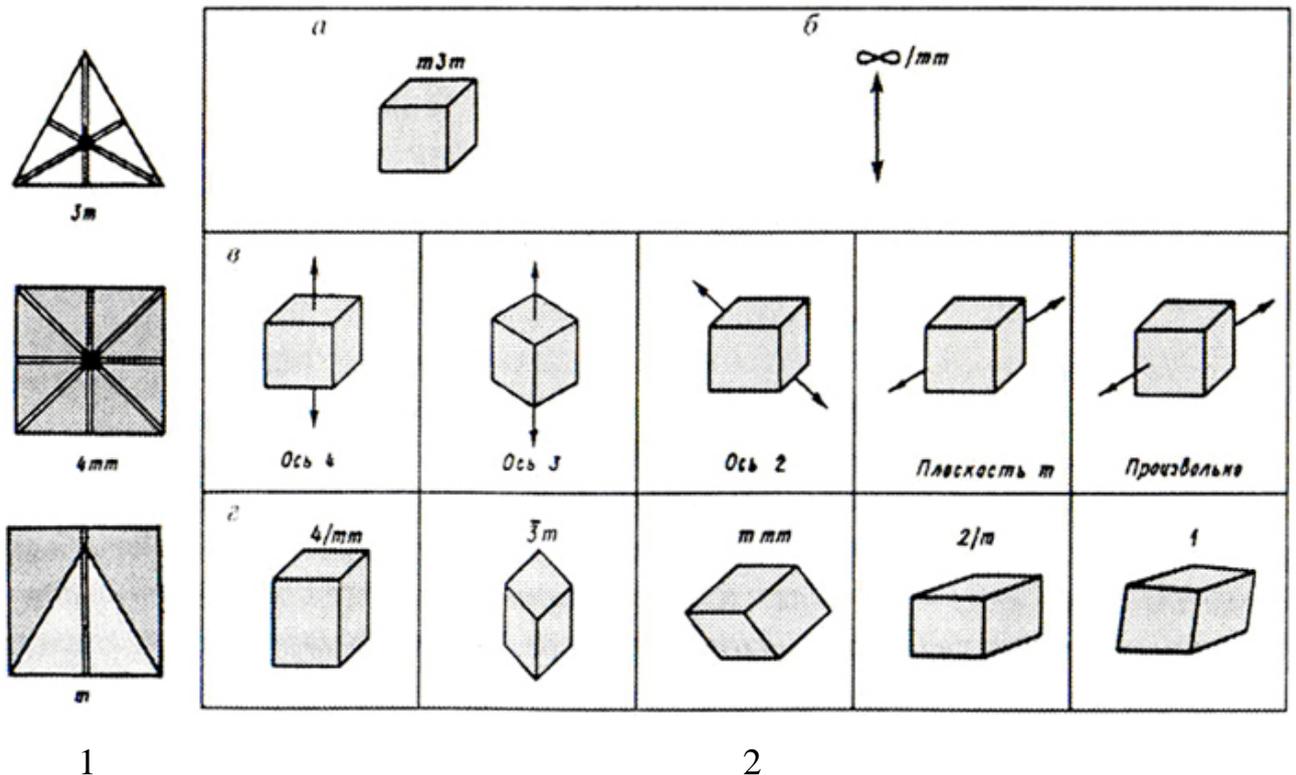


Рисунок 2.22 – Иллюстрация принципа П. Кюри по [255, С. 18]: 1 (сверху вниз) – суперпозиция правильного треугольника и квадрата, дающего составную фигуру с наследованием одного типа симметрии (вертикальная плоскость симметрии), 2 – суперпозиция куба (а) и растягивающего усилия (б) в различных взаимных ориентациях (в), приводящая к ряду объемных фигур с последовательно понижающейся слева направо симметрией (г).  
Обозначения:  $m$  – симметрия плоскости (цифра – порядок),  $\infty/m\bar{m}$  – симметрия покоящегося цилиндра (вертикальная ось бесконечного порядка  $\infty$ , бесконечное число вертикальных плоскостей симметрии  $m$ , одна поперечная плоскость симметрии  $/m$ )

Однако в работах П. Кюри содержатся положения о возможности проявления более высокой симметрии следствий по сравнению с симметрией причин [256], что позволяет трактовать принцип Кюри, как принцип «симметризации-диссимметризации». Очевидно, что в ходе эволюции как живого, так и неживого вещества повсеместно наблюдается его диссимметризация, с возрастанием порядка и снижением энтропии, которое компенсируется ростом энтропии (например, за счет повышения температуры, образования высокосимметричных жидкостей и газов) [255, С. 152-153, 165, 174]. Принцип диссимметризации уточняют, как принцип минимальной диссимметризации, который объясняется как стремление объекта, подвергнутому силовому воздействию, сохранить максимально возможную симметрию [255, С. 40-48].

Само понятие симметрии, т. е. наличия определенного порядка взаиморасположения элементов структуры объекта (частицы, монокристалла, изделия), предполагает неизменность структуры и, ожидаемо, свойств объекта при его трансформациях. Таким образом, устойчивость объекта прямо зависит от степени его симметрии. Форма кристаллов, как известно, характеризуется несколькими группами симметрии (т. н. Федоровские группы), высшей симметрией обладают кристаллы, принадлежащие кубической сингонии, для которых все трансляции (возможные симметричные преобразования) равны между собой. Как выяснилось, эволюция нашей природы направлена в сторону диссимметризации (уменьшения степени симметрии). Органические формы материи (живые организмы) характеризуются пониженной степенью симметрии и сложным строением, их форму называют органоморфной, текучей, криволинейной, противопоставляя простой геометрической.

Напротив, кристалломорфная форма частиц означает наличие плоских граней, ребер и углов (вершин), подобно формам кристалла. Плоские грани изменяют характер поведения частиц в потоке (частицы вытянутой формы выстраиваются по направлению движения потока), они же могут облегчать спекание в результате подстройки граней различных зерен друг к другу [174, С. 125, 132].

Устойчивость изометричных форм материальных объектов (куба, шара), столь распространенных в природе, связано с максимальным фактором формы, т. е. с их минимальной удельной поверхностью, определяющей минимальную степень взаимодействия с окружающей средой. Максимальный объем материала заключается в поверхность шара, отсутствие огранки, как правило, определяет изотропность свойств объекта и максимальную степень симметрии (симметрию шара по П. Кюри). Понижение степени симметрии сопровождается увеличением площади поверхности, увеличение ее вклада в свойства объекта и означает нестабильность, связанную с изменчивостью (взаимодействием с окружением).

Влияние внешних факторов (всех видов излучений и гравитации) на формообразование материальных объектов приводит к разнообразию форм. Загадка известного нам пространства в определенной степени описывается «квадратурой круга» – своеобразной борьбой между абсолютной симметрией изотропного беспорядка (симметрии шара) и трехмерным упорядочиванием, приводящим к появлению высшей кубической симметрии. Возрастание конфигурационной энтропии, проявляющейся в появлении новых поверхностей, уменьшении фактора формы возникающих объектов, – ничто иное, как результат флуктуации симметрии пространства, приводящие к разнообразию форм.

При проектировании практически всегда можно найти природные прототипы, не только при совпадении функций объекта. Так, кристалломорфные формы весьма распространены в архитектуре, хотя в природе живые существа для жилища предпочитают органоморфные пластичные формы, в основе которых лежит шар с наиболее энергосберегающей минимальной удельной поверхностью (максимальным фактором формы).

Технические решения, которые оправдали себя в процессе эволюции, привели к созданию многочисленного ряда форм для различных функций, причем созданные природой формы сочетают в себе, как высокие эксплуатационные характеристики, так и технологичность, правда, с учетом своеобразных технологий их создания. При проектировании и производстве искусственных

объектов необходимо учитывать наличие единых законов и принципов, действующих в природе.

Минеральное вещество концентрируется в виде шарообразных скоплений, имеющих максимальный фактор формы лишь находясь в аморфном высокоэнтропийном состоянии, например, в каплях жидкости или звездных скопления материи. По мере упорядоченности минерального вещества (понижении энтропии за счет передачи ее в окружающую среду) возникают кристаллы, внешняя форма которых является компромиссом между внутренней структурой химического соединения и условиями зарождения и роста. Для них характерны граненые формы с плоскостями и ребрами, представителем простейшей и высокосимметричной и наиболее стабильной из всех кристаллических форм кристаллов является куб. Однако, в отличие от ожидаемого преобладания в земной природе минералов с высокостабильной и высокосимметричной кубической сингонией, большинство из них имеют ромбическую и моноклинную сингонии [255, С. 176], внешние формы которых можно охарактеризовать, как сильно искаженный куб, превращенный в четырехгранную призму с непропорционально вытянутыми сторонами (ромбическая сингония) и одним из углов, отличным от  $90^\circ$  (моноклинная). Такой результат объясняется влиянием внешних условий на зарождение и рост кристаллов. И. И. Шафрановский настаивал на отдельном и тщательном рассмотрении внешних (ложных) форм кристаллов, которые лишь частично могут быть связаны с кристаллической формой минерала, и являются результатом воздействия симметрии внешней среды [253, С. 146, 160]. Понижение симметрии минералов наблюдается с приближением от глубин земной коры к ее поверхности [257].

Итак, различие внешних условий объясняет отличие между идеальными кристаллическими формами и, так называемыми, внешними формами реальных кристаллов. Наиболее общее влияние внешних условий (поля) на форму и структуру возникающего в нем объекта (явления) описывает принцип П. Кюри [253, С. 142-165], связывающий симметрию следствия (явления) с симметрией причины (поля). Согласно принципу суперпозиции, явление, возникающее в ре-

зультате действия причин, обладающих симметрией определенного типа, будет обладать элементами симметрии, общими для всех действующих в данный момент в данной точке пространства причин.

Анализ современной научной литературы выявил отдельные работы в различных областях знаний, в которых использовали принцип П. Кюри и его следствия для анализа и программирования поведения различных систем. Принцип Кюри рассматривается в рамках синергетической теории неравновесных процессов И. Пригожина, как возможность предсказания морфологии возникающих в процессе неравновесности диссипативных структур [258].

Так, в [259] с помощью принципа П. Кюри, который устанавливает связь между симметриями причины и следствия, рассматривают качественную картину поведения динамической системы при заданном типе управления и оценивают тенденции ее эволюционирования.

Известны попытки применения принципа П. Кюри в оптимизации процессов роста кристаллов [260] путем рассмотрения совмещения кристаллографической симметрии затравочного кристалла и внешней симметрии теплового поля, создаваемого тиглем с расплавом.

В [261] для металлических отливок, полученных литьем в различные призматические формы, на основе принципа симметрии Кюри рассматривается связь пластичности и прочности текстурированных материалов в зависимости от симметрии их текстуры.

В работе [262] исследовали применение принципа П. Кюри к моделированию агрегации ограниченной диффузией (DLA) на примере процессов кристаллизации снежинок. Авторы на основе результатов моделирования ассиметричных структур без наследования симметрии поля диффузии ( $L_\infty \propto P$ ) или симметрии растущей структуры  $L_6P$  приходят к выводу, что принцип применим макроскопическим системам, равновесным и, частично, неравновесным процессам. Тут необходимо подчеркнуть, что рассматриваемые нами системы (полуфабрикат, изделие – крупные элементы структуры), безусловно, макроскопичны.

Для технологии вяжущих веществ известны попытки использования принципа П. Кюри для расчета температурного режима остывания бетона в конструкции [263], на который влияет множество факторов: начальная температура бетона, температура окружающего воздуха, скорость ветра, модуль поверхности конструкций, расход цемента, марка цемента, коэффициент теплопередачи опалубки, экзотермия цемента и др. Граничные условия задачи, т. е. внутренний сигнал, определяли: интенсивность и место расположения внутренних источников тепла, геометрическая форма и размер тела, теплофизические характеристики материала.

Наконец, для керамических материалов в работах [264, 265] использовали принцип суперпозиции для анализа плотностей распределения порошковых шихт.

Попытки использовать симметрию силовых полей, исходных и возникающих структур с целью управления процессами твердения и образования малодефектных высокосимметричных структур представлены в работах Л. Шейнич.

В работе [266] предлагается управлять симметрией формирующейся структуры использованием соответствующих технологических приемов. Повышения симметрии образующихся структур предлагается достигать воздействием добавок, обеспечивающих создание в материале расширяющихся усилий, а в качестве способа формования использовать прессование. Соответствие симметрий воздействия и образующихся структур показано в табл. 2.10.

В работе [267], управлять симметрией образующейся структуры вяжущего предлагается, используя растворенные в жидкости затворения вещества различной сингонии (гидросиликаты и гидрокарбонаты натрия) и меняя параметры смешивания. Интерес представляет работа [268], в которой рассмотрено применение данных принципов в исследовании процессов структурообразования вяжущих веществ в свете современных теорий твердения цементов. Разработана модель, позволяющая на основании структурного критерия, сформированного с использованием симметричных преобразований, увязать весь технологический

процесс в единое целое, включая материал и создаваемые технологические воздействия воздействиями поля.

Таблица 2.10 – Возможные группы симметрии бетонов – соответствие симметрий воздействия и образующихся структур бетонов [266, С. 62]

Симметрия воздействия	Взаимное расположение осей симметрии, порядка воздействия и силы Архимеда $P_2$	Симметрия результирующего воздействия	Возможные группы симметрии структуры
$\infty\infty m$ Химическая усадка, расширение	$P_2=0$ $P_2\neq 0$ $\parallel, \perp$	$\infty\infty m$ $\infty m$	$\infty\infty m, m3m, 1$ $\infty m, 6m, 4m, 1$
$\infty/mm$ Прессование или экструдирование изделий с поперечным сечением в виде круга	$P_2=0$ $P_2\neq 0$ $\parallel, \perp$	$\infty/mm$ $\infty$ $m$	$\infty/mm; 6/mmm,$ $4/mmm, m, 1$ $\infty, 6, 4, 3, 1$ $m, 1$
$mmm$ Экструдирование изделий прямоугольного сечения	$P_2=0$ $P_2\neq 0$ $\parallel, \perp$	$mmm$ $mm2$	$mmm$ $mm2, 1$
$\infty/m$ Круговое ненаправленное вибрирование или центрифугирование	$P_2=0$ $P_2\neq 0$ $\parallel, \perp$	$\infty/m$ $\infty$ $m$	$\infty/m, 6/m, 4/m$ $2/m, 1$ $\infty, 6, 4, 3, 1$ $m, 1$
$\infty m$ Набрызг бетона или вакуумирование бетонной смеси или разравнивание слоя, оштукатуривание, окрашивание	$P_2=0$ $P_2\neq 0$ $\parallel, \perp$	$\infty m$ $\infty m$ $mm2$	$\infty m, 6m, 4m$ $3m, 1$ $\infty m, 6m, 4m$ $3m, 1$ $mm2, 1$

Работы Л. А. Шейнич обобщены в докторской диссертации [269], в которой автор рассматривал возможность понижения анизотропии свойств композиционных материалов на основе вяжущих с использованием принципа Кюри-Пригожина. Анизотропия свойств рассматривалась как отрицательный фактор, управление которым на уровне микро- и макроструктуры возможно на разных стадиях технологии. Рассматривая симметрию в качестве универсального количественного структурного критерия пригодного для описания не только материала, но и технологических полей и процесса Л. А. Шейнич предложил принципиально новый подход к оптимизации структуры и технологии композиционных материалов. Так как формирование отрицательного энтропийного пото-

ка за счет образования упорядоченных структур проходит в материале под действием поля тяготения и полей технологического происхождения с различным типом симметрии, в технологии строительных материалов принцип Кюри надо применять для закристаллизованных структурных элементов, а на макроуровне – в период структурных превращений композита, связанных с понижением анизотропии его свойств. Предельные группы симметрии макроструктуры композита автор определял акустическим методом, микроструктуры – рентгеновским методом. По его мнению, на микроуровне повышенная анизотропия свойств связана с микроструктурными дефектами, на макроуровне – является следствием протекания процессов структурообразования под действием полей, создаваемых технологическими воздействиями. В работе показано, что изменения симметрии микроструктуры, складывающейся из структур жидкой и твердой фаз вяжущего возможно при наличии у них общей группы симметрии. При этом, чем выше симметрия исходной микроструктуры, тем интенсивнее протекает процесс структурообразования. Применение технологических приемов, создающих высокосимметричные поля, позволяет повысить статистический класс симметрии образующихся структур. Введение в состав вяжущих расширяющих добавок, применение интенсивных способов получения композиционных материалов позволило повысить симметрию системы получить ряд материалов с пониженной анизотропией свойств, что показало эффективность комплексного подхода к технологическому процессу, как к единому целому.

Рассмотрим, исходя из принципа П. Кюри, симметрию основных видов керамических изделий и способы их производства, т. е. соответствие симметрий создаваемых изделий симметриям (направлениям) воздействующих на них сил при формовании и спекании.

Симметрия керамических изделий, отличных от тел простой геометрической формы, может быть описана в упрощенном виде, как симметрия объектов, имеющих плоскость, ось или центр симметрии в соответствии с предельными группами симметрии, предложенными П. Кюри (см. рис. 2.21). Форму сложных изделий возможно описывать как сочетание нескольких простых форм с преоб-

ладанием симметрии основной части. Например, полая посуда имеет обычно тулово шаровидной формы (симметрия шара) и приставные детали сложной формы, но имеющие обычно одну плоскость симметрии.

Формы многообразных керамических изделий можно объединить в 3 большие группы (табл. 2.11) по их основному назначению. Группы отличаются фактором формы, габаритами и степенью симметричности входящих в них изделий. Для каждой из групп характерно использование определенных способов формования.

Облицовочные керамические изделия в основном представляют собой протяженные пластины, иногда криволинейной формы назначение которых – защита поверхностей (стен, полов, крыш, дорог, емкостей, конструкций и т. п.) от воздействия внешних факторов. Изделия этой группы характеризуются наличием высшей симметрии: осевой и зеркальной (плоскостной), реже – центральной.

Фактор формы изделий подобен приведенной толщине, он определяет общую продолжительность протекания физических процессов в материале, причиной которых является воздействие на внешнюю поверхность облицовки (например, диффузия жидкости через поры керамической плитки или ее односторонний прогрев) до достижения состояния равновесия. Значения фактора формы для большинства изделий этой группы не превышает 10 мм. Габариты, т. е. базовые размеры изделий, увеличивают с целью облегчения процесса облицовки сооружений и аппаратов, при этом толщину уменьшают до допустимых значений, обеспечивающих механическую прочность.

Наиболее разнообразна форма кровельных керамических изделий – черепицы. Наборы керамических кровельных материалов включают в себя кровельную (в том числе фронтонную), коньковую и хребтовую черепицы, а также детали для оформления водостоков, слуховых окон и т. д. Несмотря на высокую конкуренцию со стороны черепицы из металла, цемента и композиционных материалов, классическая керамическая черепица до сих пор пользуется популярностью и является объектом исследования дизайнеров и технологов [270].

Таблица 2.11 – Характеристики форм основных групп керамических изделий

Назначение изделий	Простая форма	Симметрия	Типичные значения фактора формы, мм	Типичные габариты, м	Примеры			Способы формования
					Хозяйственно-бытовая и строительная	Огнеупоры	Техническая керамика	
Облицовка	Пластина (искаженный куб)	Осевая, плоскостная, центральная Преобладание плоскостной mmm	1-5	0,3-1,2	Плитка, черепица, кирпичи	Теплоизоляционные плиты	-	Прессование, штамповка
Емкости	Шар, цилиндр	Осевая, плоскостная. Реже центральная. Преобладание симметрий покоящегося конуса $\infty m$ , плоскостной симметрии $m, mm$	0,2-1	0,1-0,5	Посуда, канализационные трубы, санитарно-технические изделия	Сталеразливочные стаканы, желоба	Трубки, тигли	Раскатка, шликерное литье, экструзия
Конструкции	Куб, цилиндр	Плоскостная $m, mm, mmm$ . Реже осевая, центральная. Ассиметричные формы	0,1-15	0,01-1,0	Кирпичи	Втулки, насадки, блоки	Технические детали, изоляторы	Экструзия, горячее литье

Основные виды кровельной черепицы и характеристика их формы представлены в таблице 2.12 [271].

На рисунке 2.23 представлены различные виды современной черепицы.

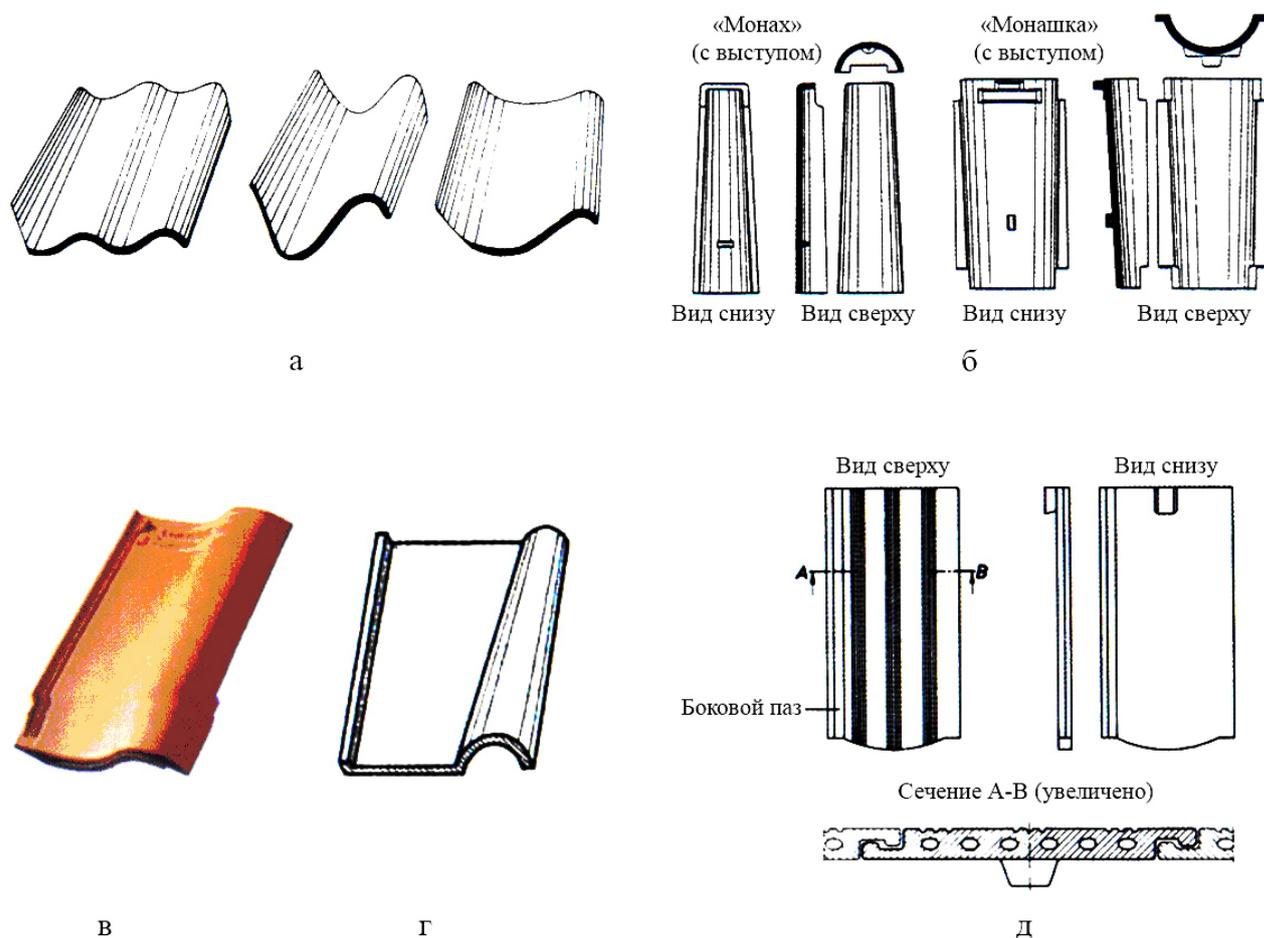


Рисунок 2.23 – Формы современной черепицы:

а – желобчатая, б – «монах-монашка»,  
 в – пазовая, г – шпунтовая,  
 д – штранговая с простым пазом [271]

Таблица 2.12 – Основные виды черепицы и характеристика их формы

Тип черепицы	Название	Особенности формы	Способ формования	Симметрия основной части
Безпазовая				
Штранговая с ровной поверхностью	«бобровый хвост»	Плоская, разные виды среза	Экструзия	Плоскостная m
Желобчатая	S-образная, «голландская», «ганноверская»	Разная глубина желоба, различный радиус закругления и изгиб, длинные или короткие косые срезы в нижнем левом и верхнем правом углу	Экструзия	Плоскостная m, покоящегося конуса ∞m. Ассиметричная
	«монах-монашка»	Желобчатая коническая форма широкой (монашка) и узкой (монах) черепиц. У широкой – приспособления (пазы или вырезы) для крепления узкой	Штамповка на револьверных прессах	Плоскостная m. Покоящегося конуса ∞m.
Шпунтовая	«Широкая», «кремпер»,	Сочетание римской (плоской) и желобчатой	Штамповка на револьверных прессах	Ассиметричная.
Пазовая				
Волновая		С небольшим радиусом закругления волнистой части, с пазами по бокам с краю, прессованная	Штамповка на револьверных прессах	Ассиметричная
Пазовая				
С 2 желобками		2 желоба по всей длине, делящие черепицу на 3 части	Штамповка на револьверных прессах	Ассиметричная
	Реформаторская «рейнская»	Почти ровная поверхность, одинарные или двойные пазы сверху и по бокам	Штамповка на револьверных прессах	
Пазовая волновая		С пазами сверху и с боку	Штамповка на револьверных прессах	
Большая пазовая		Подобно обычной пазовой с увеличенным размером	Штамповка на револьверных прессах	
Штранговая пазовая	Усовершенствованный «бобровый хвост»	С пазами по бокам (на левом краю верхний, на правом – нижний с ровной поверхностью или небольшим профилем. Бороздки по верхней или нижней стороне.	Экструзия	Плоскостная m.

Формы кровельной черепицы обусловлены несколькими факторами: стремлением увеличить полезную площадь поверхности, обеспечить надежное крепление между соседними подобными изделиями и облегчить отвод осадков с крыши здания. В древности преобладали 2 простые формы черепицы – желобчатая в виде сегмента трубы и плоская в виде прямоугольной пластины. В римской черепице они сочетались, образуя отдельный модуль с двумя плоскими черепицами, соединенными желобчатой верхней черепице меньшего размера. С усложнением конфигурации крыш, в частности, с появлением вальмовых крыш, усложнялись формы черепиц. Современные формы черепицы отличаются увеличенными габаритами, облегчающими кровлю и усложнением формы крепежных пазов, с одной стороны обеспечивающих надежное крепление, с другой достаточную подвижность черепиц между собой. Симметрия основных видов и частей черепицы – плоскостная, однако в желобчатой черепице правильной формы можно видеть симметрию покоящегося конуса. Большая часть форм черепицы ассиметричны за счет наличия в них несимметрично расположенных пазов и деталей крепления.

Особенности технологии керамической черепицы во многом определены ее формой: формование пластичной массы осуществляют способами экструзии на ленточных прессах (штранговая черепица) или штамповки на револьверных прессах. Формующие усилия в ленточных прессах описываются симметрией конуса с элементами осевой и плоскостной симметрией, в револьверных – симметрией покоящегося цилиндра, так же с осевыми и плоскостными элементами симметрии. Многие виды черепицы, не обладающие никакими из видов симметрий из-за сложных пазовых креплений, прессуются также на револьверных прессах. Прессование пластической массы под небольшим давлением позволяет придать форму без возникновения неравноплотности.

Сушка и обжиг черепицы проводят на формах в основном повторяющих формы заготовок и поэтому предотвращающих деформации за счет неравномерных усадок.

Наиболее древние керамические изделия утилитарного назначения, выпускаемые в большом количестве – предметы керамической посуды в виде различных емкостей, выполняемые сначала из терракоты, затем из каменной керамики, майолики и фаянса, наконец, из разных видов фарфора.

Формы разнообразных емкостей имеют в своей основе шар и фигуры вращения с осевой, плоскостной и, редко, центральной симметрией. Назначение емкостей – временное или постоянное хранение материалов, находящихся в различном состоянии (жидком, твердом, газообразном), поэтому основное требование к их форме – максимальный объем полости. По своей сути эти изделия – оболочки, что делает их сходными с облицовкой: их фактор формы небольшой из-за малой толщины стенки и часто усложненной конфигурации, которая оправдывается конструктивными особенностями. Например, формы полой посуды, несмотря на очевидное тяготение к шарообразной, очень разнообразны. Относительно тонкие стенки оболочек определяют малые значения их фактора формы (не более 5 мм). Габариты большинства изделий этой группы соизмеримы с кистью руки человека, так как это предметы нашего ближнего окружения. Исключение составляют большие емкости технического назначения, изготавливаемые из химически стойкой керамики, но они, как правило, редко представляют собой целые изделия, не состоящие из отдельных деталей.

В [272] представлены рисунки и фотографии более 200 керамических сосудов, классифицированных по времени, месту изготовления и назначению (функции). Каталог охватывает времена от Древнего Египта (3 тысячелетие до н. э.) до времен Римской империи (I в. н. э.). По своему назначению сосуды классифицированы на 4 категории: сосуды для хранения и смешивания (амфоры, кратеры); сосуды для зачерпывания и разливания (ойнохои, гидрии); сосуды для еды и питья (киафы, килики); сосуды для благовоний и отправления культа (лекифы, ритоны). В табл. 2.13 приведена количественная оценка числа (всего 102 типичных формы) симметричных форм сосудов в зависимости от их функции и времени изготовления. За симметричные сосуды принимали емкости, вся форма которых, включая тулово и приставные детали (ручки), имела

плоскостную и осевую (поворотную) симметрию. В расчет не принимали украшения, располагающиеся на крышках сосудов и не имеющие функционального значения.

Известно, что большинство дошедших до наших времен древних (особенно древнегреческих) сосудов являются образцами не только гончарного искусства, но технологичности и функциональности. По пропорциям амфор классического периода можно убедиться в технологичности «золотого сечения» [273], эти формы и их пропорции были отработаны веками. Неудивительно, что формы сосудов русской керамики XVIII-XIX вв. во многом (но не во всем, особенно – не в функциях) повторяют древнегреческие.

Анализ табл. 2.13 показывает, что все сосуды, предназначавшиеся для хранения и смешивания пищевых продуктов и масел, выполняли в строго симметричных формах. Это позволяло избежать неравномерностей усадки в сушке и обжиге, связанных с неравномерным распределением массы, а также облегчало хранение, транспортировку и использование сосудов.

Таблица 2.13 – Доли симметричных форм древних сосудов

№	Время изготовления	Доля (%) симметричных сосудов для			
		хранения и смешивания, (общее число типичных форм – 21)	зачерпывания и разлива (общее число типичных форм – 21)	еды и питья (общее число типичных форм – 33)	благовоний и отправления культа (общее число типичных форм – 27)
1	Бронзовый век	100	0	30	25
2	Архаический период VII–VI вв. до н. э.	100	0	70	50
3	Классический период V – IV вв. до н. э.	100	0	70	40
4	Эллинический период IV – I вв. до н. э.	100	0	100	50
5	Этрусско- римский период VI в. до н. э. – I в. н. э.	100	0	55	55

Сосуды для зачерпывания и разлива, напротив, отличаются отсутствием строгой симметрии, из 21 типичной формы 11 имеют симметричное тулово, но

ассиметричные, относительно оси формования, устье, расположение ручек (имеют, преимущественно, одну ручку).

Сосуды для еды и питья весьма разнообразны по своим формам и габаритам, но среди них преобладают симметричные формы (за исключением наиболее древних сосудов со III-II тыс. до н. э.). Из 33 типичных форм – 24 имеют либо 2 симметрично расположенные ручки, либо не имеют их вовсе.

Сосуды для благовоений и отправления культа, хотя и наименее функциональны (6 форм из 27 имеют в своей основе фигуры животного или человека, т. е. являются скорее скульптурами, чем емкостями), но среди их форм количество симметричных велико.

На рис. 2.24 представлены фотографии изделий их музеев Греции с формами, аналогичными описанным выше.

Основным способом формования этих сосудов была раскатка глиняных масс на гончарных кругах, сушка в естественных условиях и обжиг при температурах 900-1000 °С в дровяных печах. Раскатка, как разновидность пластического формования, приводила к текстурированию массы с преимущественным ориентации анизотропных глинистых частиц по образующей относительно оси вращения вала гончарного круга [105, С. 239], что выравнивала усадку изделия во время термообработки. Это было особенно важно для сосудов для хранения и смешивания, которые имели большие габариты относительно сосудов другого назначения.

Симметрия усадочных усилий задается наложением поля температур или локальным распределением влажности (внешние воздействие) на симметрию, заданную формой изделия и структурой материала (внутренние воздействия или сигналы). В древности сосуды формовали преимущественно 2 способами: ручным способом (лепкой из пласта) и с использованием так называемой жгутовой техники [101, С. 41-51, 274] и раскаткой. В первом случае при формировании пласта или глиняного жгута анизотропные частицы глинистых минералов ориентировались по образующей оси скручивания жгута или по образующей цилиндрического (шарообразного) сосуда. Вследствие такого расположе-

ния усадка имела преимущественное направление к центру каждого из жгутов, образующих тело сосуда, или к центру сосуда и была практически одинаковой по всей образующей сосуда. Использовался также способ формования стенок сосуда кольцевым или спиральным налепом [275].

Во втором случае быстрое вращение диска гончарного круга придавало с помощью руки гончара равномерную ориентацию глинистых частиц относительно оси вращения диска, создавая тело сосуда, в котором ось симметрии совпадала с осью вращения.



Рисунок 2.24 – Древние сосуды культуры Средиземноморья: а – амфора для хранения пищи (музей г. Ираклеона, 19-18 в. до н. э.); б – кувшин для разлива напитков (музей г. Ираклеона, 18 в. до н. э.); в – килик для еды и питья (музей г. Афины, 7 в. до н. э.); г – чашки для питья (музей г. Ираклеона, 17 в. до н. э.); д – сосуд для масла (музей г. Микены, 15 в. до н. э.); е – сосуд для благовоний (пиксис) (музей г. Афины, 8 в. до н. э.)

Если же посмотреть на типичный ассортимент современного завода, выпускающего наиболее популярную фарфоровую посуду, например, одного из наиболее крупных заводов, Дулевского фарфорового завода, то можно убедиться [276], что в нем также преобладают изделия симметричных форм. Так, основу современных комплектов посуды (столовых и чайных сервизов) составляют тарелки, блюда и чашки симметричных форм.

Среди способов формования посуды в древних изделиях преобладала раскатка (формовочные усилия характеризует симметрия вращающегося конуса  $\infty$ ). В современных технологиях для формования плоских изделий используют раскатку (симметрия усилий вращающегося конуса  $\infty$ ), шликерное литье под давлением (симметрия покоящегося шара  $\infty/\infty m$ ), реже – изостатическое пресование (симметрия покоящегося шара  $\infty/\infty m$ ). Для формования полых тонкостенных изделий используют шликерное литье (симметрия покоящегося шара  $\infty/\infty m$ ), для некоторых изделий – раскатку (симметрия усилий вращающегося конуса  $\infty$ ).

Таким образом, формы тонкостенных сосудов в основном обладают осевой и плоскостной симметрией, тяготеют к форме шара или цилиндра, но наличие ножки (слегка вытянутого основания) переводят симметрию их тулова в симметрию покоящегося конуса  $\infty m$ ). За счет приставных деталей значительная их часть их форм ассиметрична, что усложняет технологию. Доля такого способа формования, как шликерное литье под давлением, возрастает, в том числе и потому что, этот способ позволяет формировать изделия с приставными деталями в один прием (для тонкостенных сосудов выигрыш в многократном увеличении скорости набора массы не так существенен, как для толстостенных). Плоскую посуду, формы которой описываются пониженной осевой (только плоскостной) симметрией, или ассиметричны, формируют изостатическим пресованием, обеспечивающим сохранение любого варианта заданной симметрии изделия.

Наиболее разнообразны по форме, габаритам и отношению к симметрии конструкции из керамики, представленные в основном техническими изделиями-

ми, в которых востребованы такие свойства, как высокая механическая прочность (в том числе при повышенных температурах), огнеупорность, термостойкость, электроизоляционные и многие другие свойства. Модульные элементы таких конструкций, как здания и печи, представляют собой простейшие и, следовательно, высокосимметричные объемные фигуры – параллелепипеды (строительные и огнеупорные кирпичи), меньший ряд изделий – модули с пониженной симметрией (например, фасонные кирпичи футеровки вращающихся печей и шаровых мельниц). Другие изделия являются деталями приборов, установок и т. п. и могут иметь сложную ассиметричную конфигурацию. С усложнением формы фактор формы уменьшается, в простых по форме массивных огнеупорных блоках может достигать значений на 1-2 порядка превышающих значения фактора формы изделий для облицовки или емкостей. Габариты изделий этой группы так же разнообразны – от упомянутых блоков и огнеупорных деталей, имеющих размеры более 1 м, до миниатюрных корпусов интегральных схем с размерами менее 1 мм.

### **Анализ формы и симметрии огнеупоров**

Наиболее крупнотоннажным производством керамических деталей технического назначения отличается огнеупорная отрасль. Огнеупоры – в основном модульные изделия, образующие корпуса, облицовки и отдельные узлы высокотемпературных установок, предназначенных для процессов получения металлов, производства цементного клинкера, варки стекла, обжига керамики и т. д. Огнеупоры выделены в отдельный класс керамических материалов из-за их высокотемпературного применения, преимущественно, в металлургических производствах. Одна из особенностей огнеупоров – крупные габариты изделий, так как большинство металлургических установок (домны, электродуговые печи, конверторы и т. д.) отличаются большими размерами. Как и в случае с облицовочными материалами (черепица) формы модульных огнеупорных изделий и их симметрия подчинены форме и симметрии установки (печи). Большинство печей для выплавки металлов представляют собой цилиндрические емкости с многослойным огнеупорным корпусом, вращающиеся печи для обжига це-

ментного клинкера – трубы, ванные печи для варки стекол – бассейны прямоугольной формы, печи для обжига керамических изделий – туннели или камеры прямоугольного сечения.

Наиболее распространенные огнеупорные изделия – используемые для кладки высокотемпературных установок кирпичи и блоки прямоугольной формы, фасонные блоки (рис. 2.25 и табл. 2.14) [277].

Таблица 2.14 – Основные виды огнеупорных изделий и характеристика их формы

Название изделий	Характеристика формы	Способ формования	Симметрия
Прямоугольные	Кирпичи и блоки	Прессование, вибропрессование, литье в кокиль.	Плоскостная $m$ , $mm$ , $mmm$ .
Фасонные простой конфигурации	Изделия прямоугольной формы	Прессование, вибропрессование, шликерное литье, литье в кокиль.	Плоскостная $m$ , $mm$ .
Фасонные сложной конфигурации	Изделия с пазами, шунтами, углублениями, со сквозными отверстиями постоянного сечения.	Вибропрессование, шликерное литье	Плоскостная $m$ , $mm$ , $mmm$ . Ассиметричные изделия.
Фасонные особо сложной конфигурации	Изделия со сквозными отверстия переменного сечения, не прямые двугранные и плоские углы, криволинейные поверхности, более 6 граней.	Вибропрессование, шликерное литье	Ассиметричные изделия
Длинномерные	Длиной свыше 450 мм	Экструзия, шликерное литье	Симметрия вращающегося $\infty$ и покоящегося конуса $\infty m$ , симметрия вращающегося цилиндра $\infty/m$ . Плоскостная $m$ .

Помимо сплошных изделий простой формы широко применяются емкости (плавильные тигли, стаканы для разлива стали и т. д.), конструкционные

детали сложной формы (насадки, фильтры, детали шиберов, футеровки и т. д.) [278].

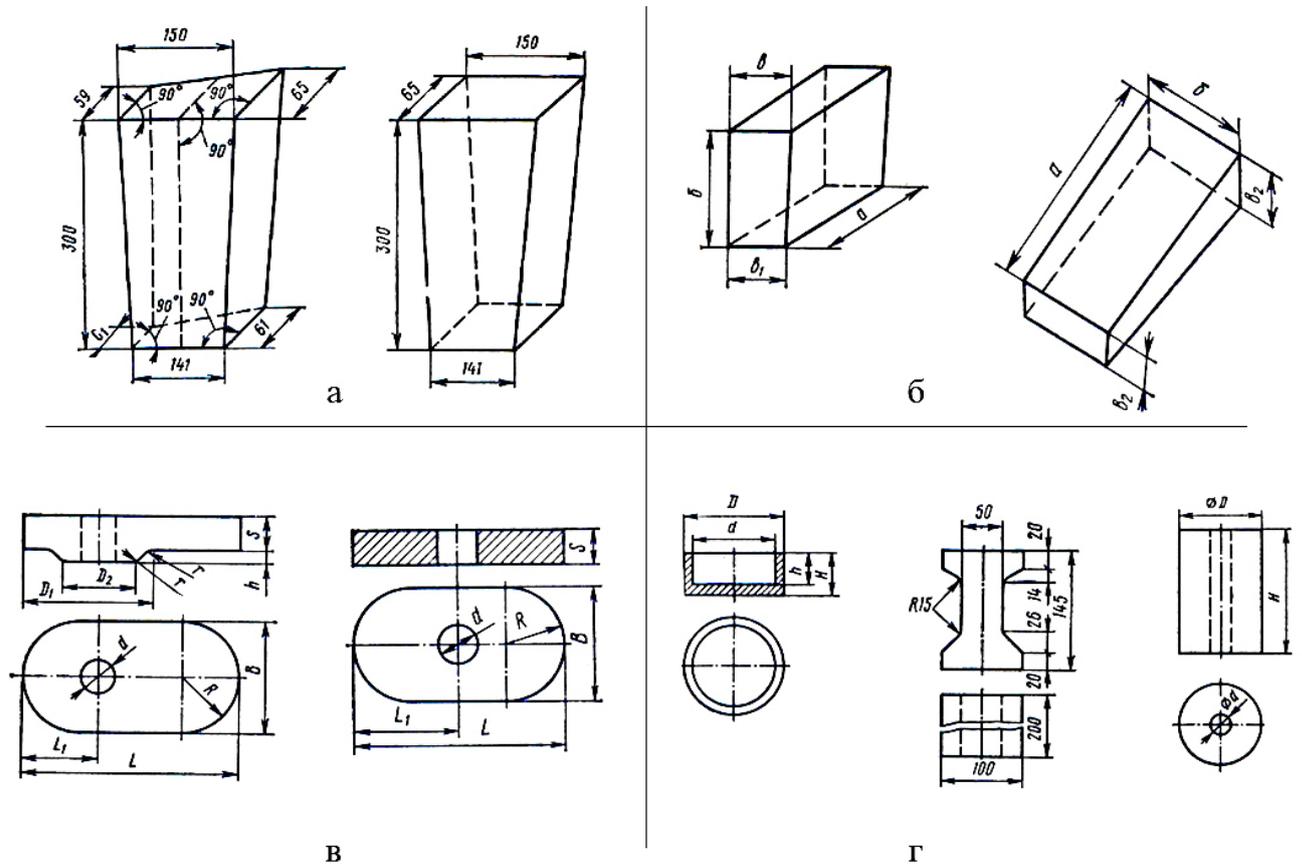


Рисунок 2.25 – Огнеупорные изделия: а – изделия динасовые для кладки сводов (клинья); б – изделия муллитокорундовые (кирпич клиновй, кирпич торцовый); в – изделия для шиберных затворов (плиты); г – изделия шамотнокарбидкремниевые (капсель, двутавр, стойка) [278]

Большая часть огнеупорных изделий представлена высокосимметричными облицовочными модулями для футеровки различных узлов установок для термообработки (плавки, обжига, синтеза и др.) либо конструктивными деталями с более низкой степенью симметрии.

Наиболее распространенные способы формования огнеупоров – полусухое и изостатическое прессование (симметрия покоящегося цилиндра  $\infty/m$  и симметрия покоящегося шара  $\infty/\infty m$ ), позволяющие формировать, соответственно, изделия плоскостной симметрии (плиты и блоки) и конструкции сложной формы. В ряде случаев, когда необходимо формировать огнеупорные емкости (тигли)

используют способы формования, обеспечивающие формовочные усилия, обладающие симметрией покоящегося шара  $\infty/\infty m$ , – шликерное литье и изостатическое прессование.

Согласно принципу П. Кюри, симметрия внешних воздействий на объект технологии (материал, полуфабрикат, изделие) должна наследоваться их структурой, включая высший уровень – форму полуфабриката и изделия. На каждой стадии технологии происходят изменения объекта под воздействием внешних и внутренних управляющих сигналов, в результате этих воздействий объект приобретает новое состояние той или иной степени стабильности. Стабильность можно характеризовать уровнем внутренней энергии объекта, которая распределена на различных уровнях его структуры. Понижение симметрии элементов структуры (дисимметризация) происходит за счет образования дефектов, включая концентраторы напряжений на высшем уровне структуры – форме. Дисимметризация структуры может происходить из следующих причин:

- несоответствия симметрии внешних воздействий симметрии формы;
- несоответствия симметрии внешних воздействий симметрии макро- и микроструктуры;
- несоответствия степени внешнего воздействия возможностям перестройки структуры с целью наследования симметрии воздействий.

В первом случае результатом воздействия могут стать дефекты (искажение) формы, которые будут наследовать направление внешних воздействий, ограниченных симметрией формы объекта. Уровень энергии внешнего воздействия в этом случае высок, но его интенсивность достаточна, чтобы происходила масштабная (в пределах объекта) перестройка формы. Примером может служить искажение формы полуфабриката, обладающей симметрией плоскости которой не совпадают с плоскостью симметрии усилий прессования (симметрия покоящегося цилиндра  $\infty/mm$ ).

Во втором случае результатом воздействия могут стать дефекты структуры в виде текстур, неоднородностей, микротрещин, распределенные в соответствии с симметрией воздействий. Уровень энергии внешнего воздействия мо-

жет быть в этом случае различен, но его интенсивность не превышает допустимой рамками технологии. Примером может служить S-образная трещина, образуемая в полуфабрикате, формуемом способом пластического формования шнековым прессом с симметрией усилий вращающегося конуса  $\infty$ .

В третьем случае результатом воздействия могут быть как дефекты структуры (микротрещины), так и дефекты формы (макротрещины). Уровень энергии внешнего воздействия может быть в этом случае различен, но его интенсивность чрезвычайно высока. Примером может служить образование трещин в изделии в процессе его быстрого нагрева или охлаждения. Несмотря на симметрию покоящегося шара, присущую большинству видов термообработки и дающую возможность наследования любого типа симметрии (любой формы изделий), интенсивность воздействия может быть недопустима для сохранения стабильности формы и структуры изделия.

На стали подготовки формующей массы (пластичной массы, шликера, пресс-порошка и т. д.) ее однородность достигают использованием различных смесителей. Несмотря на то, что подавляющая часть конструкций смесителей основана на вращательном движении рабочих органов, степень смешения в наиболее эффективных смесителях достигается сообщением массе сложных движений, созданием турбулентных потоков [279]. Задача смешивания – нарушение симметрии, т. е. упорядоченного расположения компонентов массы во избежание эффекта наследования структуры, при котором в образуемом в процессе полуфабрикате будут наблюдаться области повышенной симметрии. В свою очередь наличие в полуфабрикате таких областей приведет к направленной усадке при сушке полуфабриката и возможному образованию трещин.

На стадии формования симметрия формующих усилий определяется выбранным способом формования и особенностями формующего оборудования. Так как форма полуфабриката задается на стадии проектирования, ей соответствует конструкция формующей оснастки, которая является внутренним управляющим сигналом. Симметрия формующей оснастки должна соответствовать симметрии усилий, их сочетание накладывается на симметрию структуры ма-

териала. При несоответствии симметрии формующей оснастки симметрии формующих усилий результатом их наложения будет создание в материале дефектов структуры – уплотнений, включений газовой фазы (воздуха), микро-трещин.

Для формования керамических изделий применяют различные способы, характеризующиеся разной интенсивностью воздействия на формуемую массу, которая может представлять собой суспензию (способ шликерного литья), пластическую массу (пластическое формование), порошок (прессование). Характеристики основных способов формования, типы симметрий и представлены в табл. 2.15. Можно отметить, что вне зависимости от состояния исходной смеси формование осуществляется двумя основными способами. Во-первых, уплотнением и/или формообразованием массы механическими усилиями, передаваемыми на смесь штампами (прессование), резиновой оболочкой (изостатическое прессование), шнеком или поршнем (экструзия), шаблоном или роликом (раскатка). В этом случае упрочнение происходит в результате сближения частиц твердой фазы при неизменном соотношении порошок-связка. Во-вторых, использованием эффекта изменения агрегатного состояния смеси: переходом от суспензии к пластичной массе – при обычном шликерном литье или переходом жидкое-твердое при горячем (парафиновом) шликерном литье. В этом случае упрочнение происходит либо в результате удаления значительной части связки (холодное шликерное литье), либо в результате отверждения связки.

В [176, С. 29] способы формования разделили на формообразование под действием гравитационных (литье), центробежных (центробежное шликерное литье) и внешних сил (прессование и пластическое формование). Автор утверждал, что оптимальным является формообразование под действием гравитационных или внешних сил на жидкую систему [176, С. 33].

Таблица 2.15 – Характеристики основных параметров способов формования керамических изделий и соответствие симметрий формирующих усилий симметрии изделий

Формовочная смесь	Способ формования	Продолжительность формования, с	Давление формования, МПа	Симметрия формовочных усилий	Преобладающие виды изделий и типы их симметрии
Суспензия	Традиционное шликерное литье в пористые формы	100-1000	0,1	покоящегося шара $\infty/\infty m$	Тонкостенные емкости. Симметрия вращающегося $\infty$ и покоящегося $\infty m$ конуса, плоскостная симметрии $m$ , $mm$ , $mmm$ .
Суспензия	Шликерное литье в пористые формы под давлением	100	1-3	покоящегося шара $\infty/\infty m$	Толстостенные емкости. Симметрия вращающегося $\infty$ и покоящегося $\infty m$ конуса. Плоскостная симметрия $m$ , $mm$ .
Суспензия	Горячее шликерное литье	10	0,5	покоящегося шара $\infty/\infty m$	Конструкции малых габаритов с преобладанием плоскостной симметрии $m$ , $mm$ , $mmm$
Пластичная масса	Раскатка шаблоном или роликом	3-10	1-2	вращающегося конуса $\infty$	Емкости. Симметрия покоящегося конуса $\infty m$ .
Пластичная масса	Экструзия через мундштук	10-20	1-10	вращающегося цилиндра $\infty/m$	Емкости и конструкции с преобладанием осевой и плоскостной симметрии вращающегося $\infty/m$ и покоящегося цилиндра $\infty/mm$ , покоящегося $\infty m$ и вращающегося $\infty$ конуса.

Формовочная смесь	Способ формования	Продолжительность формования, с	Давление формования, МПа	Симметрия формовочных усилий	Преобладающие виды изделий и типы их симметрии
Пластичная масса	Штамповка в стальные открытые формы	1-5	5-20	покоящегося цилиндра $\infty/mm$	Облицовка с преобладанием плоскостной симметрии $m$ , $mm$ , $mmm$ .
Порошок	Прессование стальными штампами в закрытые стальные формы	1-5	10-300	покоящегося цилиндра $\infty/mm$	Облицовка, конструкции с преобладанием плоскостной симметрии $m$ , $mm$ , $mmm$ .
Порошок	Квазиизостатическое прессование резиновыми штампами в стальные формы	2-5	5-150	покоящегося шара $\infty/\infty m$	Конструкции малых и средних габаритов с преобладанием плоскостной симметрии $m$ , $mm$ , $mmm$ . Емкости с симметрией покоящегося конуса $\infty m$ , плоскостной симметрией $m$ , $mm$ , $mmm$ .
Порошок	Изостатическое прессование через резиновую оболочку в стальные формы	5-10	10-200	покоящегося шара $\infty/\infty m$	Толстостенные емкости с симметрией покоящегося конуса $\infty m$ , плоскостной симметрией $m$ , $mm$ , $mmm$ . Массивные конструкции с плоскостной симметрией $m$ , $mm$ , $mmm$ .

Важно также отметить, что способы формования отличаются разной интенсивностью формообразования (пластическое формование) или формообразования, совмещенного с уплотнением (прессование, шликерное литье). При быстрых способах формования (прессование) образование относительно однородных структур возможно лишь для тех изделий, у которых симметрия максимально совпадает с симметрией воздействия.

При формовании механическим способом усилия преимущественно распределяются по вертикальной (прессование) или горизонтальной (экструзия) оси, задавая в системах с частицами анизотропной формы направленную текстуру (области упорядоченно расположенных элементов структуры). Для этих способов формования характерна осевая симметрия усилий. Отклонение от осевой симметрии формуемого образца приводит к увеличению неравноплотности из-за искажения поля напряжений, создающихся в полуфабрикате во время формования. Так как в случае экструзии уплотнение формуемой массы минимально, то осевой размер формуемой заготовки практически не влияет на однородность полуфабриката. При прессовании порошков большую роль оказывает коэффициент внешнего трения массы о стенки матрицы, с увеличением которого возрастают потери давления в направлении оси, поэтому высота формуемых полуфабрикатов в целом не должна превышать максимального размера поперечного сечения (рис. 2.26, а).

Полусухое прессование (наиболее распространенный вид прессования с количеством связки до 10 %) наилучшим образом подходит для формования плоских облицовочных изделий, обладающих осевой и плоскостной симметрией  $mmm$  (форма пластины, параллелепипеда), способ экструзии – для формования изделий, обладающих осевой  $\infty mm$  и плоскостной  $mmm$  симметрией, (формы цилиндра, пластины, параллелепипеда).

При формовании квазиизостатическим и изостатическим прессованием механические усилия передаются на поверхность формуемого материала эластичным штампом или жидкостью через эластичную оболочку. При квазиизостатическом формовании усилие передается по вертикальной оси через эла-

стичные резиновые фигурные штампы на горизонтальные и боковые поверхности полуфабриката (преобладает осевая нагрузка). Таким способом удается формовать полуфабрикаты с высотой как в несколько раз превышающей максимальное сечение, так и с обратным соотношением между ними. Однако, исключить большое влияние внешнего трения и получить однородные массивные крупногабаритные полуфабрикаты удастся лишь изостатическим (гидростатическим) прессованием, при котором усилия передаются на поверхность формируемого материала через резиновую оболочку жидкостью, находящейся под давлением. Для усилий, развиваемых в этом способе формования, характерна симметрия шара, что позволяет получать однородные полуфабрикаты сложной конфигурации (рис. 2.26, б).

Способом изостатического формования возможно формование изделий с различным типом симметрии и ассиметричных, но наиболее оправдано применение этого способа для формования толстостенных оболочек и массивных конструкций.

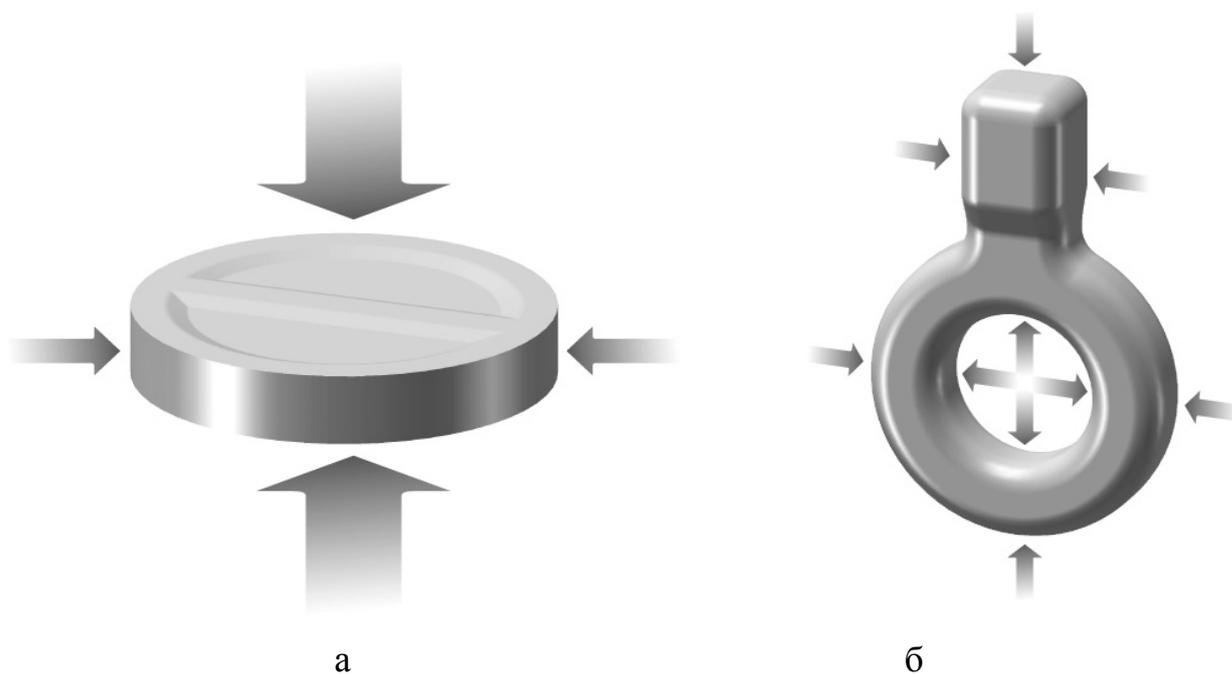


Рисунок 2.26 – Симметрия формовочных усилий при прессовании  
 а – осевая и плоскостная (симметрия покоящегося цилиндра)  
 при полусухом прессовании; б – осевая, плоскостная и центральная  
 (симметрия покоящегося шара) – при изостатическом прессовании

Способ раскатки заключается в распределении (заглаживании) слоя пластичной массы по поверхности вращающейся формы, для него характерна преобладание осевой симметрии (симметрия вращающегося конуса) при небольшом значении центральной. Этим способом формуют тонкостенные оболочки, обладающие осевой симметрией (рис. 2.27, а).

Способом экструзии с выраженной осевой симметрией (симметрия вращающегося цилиндра) усилием получают длинномерные однородные заготовки постоянного сечения (рис. 2.27, б).

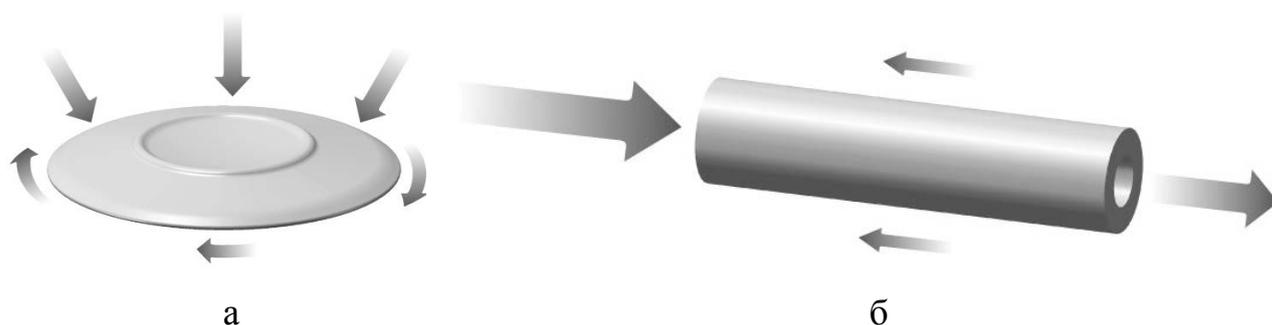


Рисунок 2.27 – Симметрия формовочных усилий при пластическом формовании: а – осевая и центральная (симметрия вращающегося конуса) – при раскатке; б – осевая (симметрия вращающегося цилиндра) – при экструзии

Симметрия формовочных усилий покоящегося шара характерна для шликерного литья (рис. 2.28), что соответствует симметрии покоящегося шара. При холодном шликерном литье из водных шликеров слой массы, набранный на поверхности внутренней полости формы, уплотняется благодаря удалению части связки через поры формы одновременно по всей площади полуфабриката, контактирующей с формой. При литье крупногабаритных полуфабрикатов из-за его длительности приходится учитывать осевую симметрию усилий, определяемую гравитационной составляющей, практически не влияющей на быстрые процессы. Для изготовления таких изделий часто используют особую разновидность холодного шликерного литья – центробежное шликерное литье и придавая вращение пористой форме [280]. При вращении пористой формы процесс формования значительно ускоряется благодаря действию центробеж-

ных сил, но начинает преобладать осевая симметрия (симметрия вращающегося цилиндра), поэтому таким способом формуют однородные изделия, обладающие подобным типом симметрии (фигуры вращения – трубы, симметричные оболочки).



Рисунок 2.28 – Осевая симметрия (симметрия покоящегося шара) формовочных усилий при шликерном литье в пористые формы

При горячем шликерном литье фиксация формы полуфабриката происходит в результате застывания расплава парафинового шликера, заполнившего металлическую форму (одновременно на всей площади полуфабриката, соприкасающейся с формой). Для данных способов формования практически нет ограничения в сложности конфигурации формуемых изделий, ограничения касаются их толщины, из-за значительных объемных изменений материала, происходящих при удалении связки (усадки). Поэтому способом холодного шликерного литья формуют тонкостенные оболочки сложной формы, способом горячего литья – малогабаритные конструкции сложной формы.

Активно разрабатывают способы формования, в которых формование и уплотнение полуфабриката происходит без участия его поверхности с образованием непосредственных связей между коллоидными частицами материала. Это, так называемые коллоидные способы формования [193, С. 2341, 136, С. 2].

В технологии высококонцентрированных керамических суспензий коллоидные частицы, полученные в результате интенсивного измельчения, образуют гель связки [281]. В других способах (наиболее распространенный – золь-

гель) коллоидные частицы, полученные в результате химических реакций или введенные в систему, концентрируют под действием сил различного рода [114, С. 2351, 282, 283]. Одновременное образование контактов во всем объеме полуфабриката дает возможность регулировать структуру материала и его усадку, что крайне важно для формования изделий сложных форм, в том числе пористых и миниатюрных.

Отдельно необходимо рассматривать аддитивные способы формования керамических изделий, представляющие собой новый этап развития таких известных ранее коллоидных способов, как шликерное литье и «инжектинг моулдинг». Формование в большинстве случаев ведется суспензиями или пастами. Внедрение аддитивных способов в технологию керамики означает новый этап в формообразовании керамических изделий, избавляющий его от сильного влияния на однородность материала конфигурации изделия и его габаритов. Послойное формование изделия позволяет разбить любую форму изделия на «элементарные объемы», подобным конечным элементам, используемым при компьютерном моделировании [284]. Формование происходит последовательно в каждом из объемов, примыкающем к соседям по слою, при этом элементарные объемы формируемого материала отличаются высокой долей симметрии, формовочные усилия, связанные с процессами отверждения или испарения связки, минимальны, что позволяет минимизировать усадочные напряжения и добиться их равномерности по всему объему формируемого полуфабриката. Однако, в этом случае возможны явления слоистости структуры (текстурирования) из-за невысокой межслоевой адгезии.

Серьезные проблемы возникают при совмещении формования со спеканием (метод селективного лазерного спекания), когда в материале развиваются большие температурные градиенты, вызывающие значительные усадочные напряжения между соседними объемами и слоями. Резкое усиление неравновесности процесса влечет за собой образование дефектов в виде трещин, связанных с недостаточным временем для рассеяния (диссипации) переданной материалу энергии.

Следующий за формированием этап удаления из полуфабриката технологической связки, приводящий к его уплотнению и упрочнению, и сопровождающийся усадкой, называют сушкой в случае, когда связкой является вода или водные растворы полимеров. Сушку можно проводить несколькими способами, отличающимися видом воздействия на полуфабрикат. Наиболее распространенные в промышленности способы сушки – конвективный (теплоносителем) и радиационный (излучением). Также сушку проводят контактным нагревом, СВЧ-нагревом, нагревом при пропускании через полуфабрикат электрического тока. Последние 2 способа обеспечивают более равномерный прогрев полуфабриката, избегая термодиффузии – эффекта противоположно направленных градиентов температуры и влажности полуфабриката. При сушке другими способами нагрев полуфабриката осуществляется через его свободную поверхность, через нее же происходит и удаление связки (воды). Искажения равномерности усадочных усилий, как и при формировании, связано с градиентом влажности в толщине высыхающего материала, и наличием внешнего трения полуфабриката о подставку, тормозящего усадку нижних слоев. Таким образом, условия удаления связки характеризуются симметрией покоящегося шара и долей осевой симметрией, связанной с гравитационной составляющей (симметрия покоящегося конуса), доля которой возрастает с увеличением массы полуфабриката.

На основании предложенной П. Кюри классификации предельных групп симметрии можно охарактеризовать технологические процессы производства керамики следующим образом (табл. 2.16).

Необходимо также отметить, что фактор формы полуфабриката играет важнейшую роль: при увеличении приведенной толщины возрастает вероятность достижения запрещенной (недопустимой) усадки или критического градиента влажности, что приводит к образованию трещин [166, С. 255-258, 209, С. 51-52]. Однако, помимо массивности (общего фактора формы) полуфабриката, необходимо учитывать равномерность распределения массы по объему, образуемому внешним контуром простой фигуры, в которую можно вписать изделие, что может быть охарактеризовано степенью симметричности его формы.

Речь идет о соответствии симметричности поля напряжений, связанного с полем температуры и механических нагрузок под собственным весом в сохнувшем полуфабрикате, и симметричности его формы. Недопустимые напряжения возникают в участках полуфабриката, располагающихся между частями, резко отличающимися по значениям локальных факторов формы. Например, между массивным основанием и быстро сохнувшем выступом. Симметричное расположение подобных выступов может выровнять возникающие напряжения.

Таблица 2.16 – Характеристики основных способов термообработки керамических изделий

Стадия	Разновидность способа термообработки	Тип симметрии	Преобладающие изделия и тип их симметрии
Сушка	Конвективная сушка	покоящегося конуса $\infty m$	Облицовка, емкости, конструкции со всеми наблюдаемыми типами симметрии
	Радиационная сушка	покоящегося конуса $\infty m$	Облицовка с преобладанием плоскостной симметрии $m, mm, mmm$ , емкости со всеми наблюдаемыми типами симметрии
	Контактная сушка	покоящегося конуса $\infty m$	Конструкции с преобладанием плоскостной симметрии $m, mm, mmm$ , с симметрией покоящегося цилиндра $\infty/mm$
	СВЧ-сушка	покоящегося шара $\infty/\infty m$	Облицовка, емкости, конструкции со всеми наблюдаемыми типами симметрии
Обжиг		покоящегося шара $\infty/\infty m$	Облицовка, емкости, конструкции со всеми наблюдаемыми типами симметрии

В промышленных способах обжига керамических изделий в газовых и электрических печах тепло передается изделию конвекцией и радиацией, связи между симметрией температурных и гравитационных полей и симметрией изделия подобны рассмотренным ранее при сушке. Известно влияние толщины обжигаемых изделий на скорость их нагрева и охлаждения, что характеризуется критерием Био. Нагрев термически массивных тел (с критерием Био  $Bi > 0,5$ ) лимитируется внутренней теплопередачей, но, практически, допустимая скорость и нагрева, и охлаждения определяется разницей температур (градиентом) поверхности и середины изделия, которая зависит его формы. Известно также влияние торможения усадки в нижнем слое обжигаемого массивного изделия, что необходимо учитывать при проектировании. Очевидно, что центральная и

осевая симметрия термического воздействия накладывает определенные условия на симметрию обжигаемого изделия, – при большем отклонении от типов симметрии изделия и поля возрастает вероятность образования дефектов. Так, при обжиге длинномерных изделий их располагают вертикально, избегая деформаций.

Эффективные способы обжига, благодаря которым удастся быстро спекать материал до максимальной плотности – горячее прессование и горячее изостатическое прессование используют для небольших партий дорогостоящих деталей. Горячее прессование совмещает процессы обжига с прессования графитовыми штампами, таким способом изготавливают высокосимметричные изделия простой формы (пластины, втулки). Горячее изостатическое прессование, при котором обжиг совмещен с изостатическим прессованием (обжатие изделия газом высокого давления через ставшие пластичными в результате нагрева металлические или стеклянные оболочки), позволяет максимально уплотнить изделия сложной формы, в том числе ассиметричные.

Электроимпульсное спекание (Spark Plasma Sintering, SPS) [285] – один из новых способов обжига керамических изделий с пропусканием через прессуемый в графитовой форме полуфабрикат электрических импульсов большой мощности. Осевая симметрия, заданная таким способом обжига, не дает возможности использовать такой способ для формования и спекания изделий сложных форм, для которых условия интенсивного обжига будут крайне неравномерные.

Краткий обзор способов формования, сушки и обжига керамических изделий показал их соответствие основным положениям, вытекающим из общей формулировки принципа П. Кюри о соответствии симметрии следствия симметрии причин. При проектировании изделия, оптимизации его формы и конструкции, разработке технологии его производства необходимо делать оптимальный выбор между возможными техническими решениями, стремясь к соответствию симметричности формы изделия условиям симметрии напряжений,

возникающих на разных стадиях технологии, по возможности уменьшая фактор формы изделия.

Важно также помнить, что симметрия изделия должна соответствовать симметрии воздействия окружающей среды его эксплуатации. Изделие при взаимодействии с окружающей средой испытывает механические, термические и другие виды нагрузок, оказывающих влияние на его поверхность и объем (структуру). Нагрузки, неравномерно распределенные в изделии из-за несоответствия с симметрией изделия, будут быстрее дестабилизировать структуру материала за счет появления разноуровневых дефектов. Например, места коррозии облицовочных изделий строительного назначения соответствуют векторам действия осадков и ветровой нагрузки.

Следует также учитывать степень интенсивности воздействия. Так, при эксплуатации огнеупорные изделия подвергаются комплексному воздействию термических и химических нагрузок. Стремление продлить срок эксплуатации без ремонта (компанию установки) не позволяет уменьшать толщину огнеупорных блоков, не допуская потери прочности из-за быстрого разъедания агрессивными расплавами или газами. Массивные блоки, несмотря на высокую симметричность их формы, нередко испытывают разрушения из-за термических ударов (резкого нагрева), особенно, если содержат концентраторы напряжений (в углах отверстий, пазов и т. д.) [286].

Общие тенденции в дизайне и технологии связаны с уменьшением фактора формы изделий и диссимметризацией (снижением симметрии) их форм, что связано с минимизацией энергозатрат на их производство и сокращением общего жизненного цикла изделий. Помимо уменьшения общего количества материала, снижение фактора формы изделий означает усиление роли поверхности изделий, которая становится все более функциональной. Развитие наноиндустрии создает новый уровень предметной среды, в целом характеризующийся преобладанием неравновесных процессов, происходящих на поверхности изделий. Многофункциональные покрытия обеспечивают активное взаимодействие с окружающей средой. Однако, для придания стабильности при эксплуатации

изделий и уменьшении затрат при их производстве требуется максимально использовать оправдавшие себя в процессе эволюции механизмы создания стабильных структур. Именно поэтому технологии формования и обжига керамических изделий приближаются к ростовым (технологиям выращивания монокристаллов и биотехнологиям) [117, С. 13-14], обеспечивающим минимизацию влияния условий образования керамического изделия на его форму.

### **Выводы по разделу 2.3:**

1. Симметрия керамических изделий отвечает принципам функциональности, стабильности (устойчивости к внешним воздействиям) и наследует симметрию внешних усилий, согласно принципу суперпозиции симметрий П. Кюри.

2. По конструкционным и функциональным признакам керамические изделия можно разделить на 3 группы: облицовочные изделия, описываемые плоскостной симметрией, емкости (осевая, плоскостная и центральная симметрия) и конструкции (плоскостная симметрия и ассиметричные).

3. Для получения бездефектных изделий необходимо стремиться к соответствию симметрии внешних усилий (симметрии формирующих усилий, температурного поля сушильного агрегата и температурного поля печи).

4. Для получения однородных бездефектных изделий сложной асимметричной формы рационально использовать способы формования, основанные на коллоидных (образование прочных контактов в объеме заготовки за счет процессов агрегации) или ростовых (аддитивных) технологиях. В этих случаях влияние внешних воздействий на структуру материала минимально.

**Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Теоретические предпосылки создания морозостойкой керамики [Текст] / Беляков А. В., **Захаров А. И.** // Стекло и керамика. 1996. № 10. С. 13-16.

2. **Захаров А. И.** Формообразование керамических изделий: принцип П. Кюри и тенденции развития [Текст] // Труды Академии технической эстетики и дизайна. 2014. № 3. С. 9-15.

3. **Захаров А. И.** Форма керамических изделий: философия, дизайн, технология [Текст] / **Захаров А. И.**, Кухта М. С. Томск: СТТ, 2015. 224 с. (сер. Дизайн и общество).

## Выводы по разделу 2

1. Форма керамического изделия определяет выбор способа формования и особенности других технологических стадий производственного процесса.

2. Степень сложности формы изделия, определяющая как его технологичность, так и устойчивость при эксплуатации, зависит от геометрической сложности формы и приведенной толщины изделия (фактора формы).

3. Мерой устойчивости изделия в процессе изготовления и эксплуатации служат реакции изделия и материала на внешние воздействия, которые зависят от соответствия симметрии изделия и физических полей, выраженного принципом П. Кюри.

Научные результаты, изложенные в разделе 2, были использованы при разработке принципов создания Системы добровольной сертификации (Порядка и правил сертификации предприятий промышленности строительных материалов, регистрационный номер № DS.NOS-16.0-2012), которая используется российскими предприятиями и органами по сертификации в добровольном порядке (письмо Общероссийской негосударственной некоммерческой организации «Национальное объединение саморегулируемых организаций, основанных на членстве лиц, осуществляющих строительство» (НОСТРОЙ) от 01.08.2014 № 03-1640/14, приложение 1.2).

### 3 Экспериментальная часть

#### 3.1 Объекты и инструмент исследования

##### 3.1.1 Исходные материалы

Эксперименты проводили с использованием глин и каолинов различных месторождений, а также формовочных масс разных производителей (для получения майолики, гончарной керамики и керамической плитки, фаянса, полуфарфора, мягкого и твердого фарфора). Химические и минеральные составы масс приведены в табл. 3.1 и табл. 3.2. Для уточнения состава некоторых масс проводили рентгенофазовый и петрографический анализы.

**Глина Левженского месторождения.** Основными глинообразующими минералами являются монтмориллонит и каолинит с размерами частиц до 2 мкм. Содержание каолинита не превышает 7 %. Количество кварцевых и полевошпатных пород (альбит), содержащихся в глине составляет 35-40 %. Известняковая составляющая (7-8 %) с агрегатами размером до 60 мкм представлена кальцито-доломитовыми зернами. Присутствуют гидраты окиси железа, а также углистое вещество. Результаты рентгенофазового анализа показали, что примеси, присутствующие в данной массе – это минералы альбита и кварца. Методом ситового анализа определили, что содержание механических примесей, составляет 10,2 %, причем более половины частиц представлено наибольшей фракцией с размером 0,063-0,5 мм. Содержание крупных карбонатных включений не обнаружено.

**Глина марки Веско.** Относится к аргиллитовым породам. Основным глинообразующим минералом (алевритом) является каолинит. Частицы каолинита имеют пластинчатое строение и в данном материале имеют хаотичное наложение в породе. Размеры частиц каолинита составляют сотые доли микрона.

Таблица 3.1 – Химические составы и потери при прокаливании некоторых материалов, использованных в работе

Название	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ППП
Часов-Ярская глина	51,66	32,06	0,81		0,85	0,61	2,44	1,57	9,39
Каолин Глуховецкий	66,7	22,34	1,5		0,60	0,74	-	-	8,7
Масса на основе веселовской глины	53,7	31,26	0,73	1,25	0,92	1,04	0,42	1,88	9,2
Твердый хозяйственный фарфор	62,2-65,67	22,70-23,67	0,2-0,43	0,30	0,71-1,4	0,38-0,5	2,1-2,56	0,25-2,1	6,03-6,7
Электротехнический фарфор	72,02	21,83	0,55	0,42	0,89	0,38	2,81	1,20	-
Санитарно-технический фарфор	66,83	26,46	0,29	0,06	1,64	0,53	2,81	1,38	-
Полуфарфор марки ПФЛ	66,5-67	21,5-21,8	0,47-0,5	0,5-0,6	0,45-0,5	0,3	1,6-1,7	0,9-1,0	6,5-6,8
Фаянс	59,22	27,66	0,79	1,01	0,35	0,28	2,22	0,51	7,96
Майоликовая масса ПГ- 100	57,69	17,67	6,73	0,85	3,16	1,72	6,12	0,36	5,43

Таблица 3.2 – Вещественные составы использованных в работе фарфоровых, полуфарфоровых, фаянсовых и майоликовых масс некоторых производителей

Вид массы	пластичные (глина, каолин)	кварцевые	Плавни (полевые шпаты, пегматит, для майоликовых масс – нефлин-сиенит, мел, доломит)
Твердый хозяйственный фарфор	55-60	12,5-23	20-30,5
Электротехнический фарфор	47	27	26
Санитарно-технический	57	16	27*
«Париан»	34-40	-	60-67
«Бона-чайна»	25-30	-	70-75
Полуфарфор ПФЛ	65	10-25	10-25
Фаянс	95	5	-
Масса на основе веселовской глины	82		18*
Майоликовая плиточная масса	55	14	31*

\* в состав входят добавки шамота (боя).

Второстепенным глинообразующим минералом является монтмориллонит. Содержание этого минерала составляет не более 5-7 %. Монтмориллонит имеет слоисто-пластинчатое строение. Однако, отмечается направленность пластинчатых частиц в параллельном наложении в породе. Размер частиц монтмориллонита много меньше сотых долей микрона.

Аргиллитовый осадок имеет в своем строении  $\beta$ -форму крупнокристаллического кварца, который имеет угловатую форму. Размер кварцевых зерен составляет от 40 до 100 мкм. Количество крупнокристаллического кварца до 3 %.

Аутогенными примесями в алевролите являются в данном осадке циркон, доломит, рутил. Их общее содержание составляет 3 %. Присутствует и черное органическое вещество, которое в данном осадке представлено в виде вытянутых линз. Количество органического вещества – до 1 %.

Содержит мелкокристаллический дисперсный низкотемпературный  $\beta$ -кварц, который рассеян в виде округлых шаровидных образований. Размер дисперсного кварца – 1-1,5 мкм, его количество – 3 %.

**Масса марки ПГ-100.** Смешанно-осадочная порода аргиллитового осадка. Глинообразующим минералом является монтмориллонит с листообразным строением, который в данной породе имеет направленное наложение частиц относительно друг друга. Каолинитовый минерал присутствует, но в подчиненном соотношении, его содержание не более 3-4 %.

В данном осадке в большом количестве, практически равносильном глинистому минералу, содержится шамозит (алюмосиликат, обогащенный окислами железа и магния). Соотношение монтмориллонита и шамозита составляет 1:1. Частицы шамозита размером гораздо менее 1 мкм не имеют слоистого строения, их форма ближе к правильной изометрической. Низкотемпературный  $\beta$ -кварц в аргиллитовом осадке – крупнокристаллический, с частицами неправильной угловатой формы с размером 80-200 мкм. Аутогенные примеси – это циркон, доломит, рутил и опал. Их общее содержание – 3 %. Органическое вещество в виде черных плотных скоплений имеет форму шариков и линз, содер-

жание которых – 3 %. Включением является сидерит ( $\text{FeCO}_3$ ), который образует самостоятельные агломераты размером 60-120 мкм. Размер частиц в агломератах составляет 3-6 мкм.

В экспериментах по реакционному спеканию использовали нитрид кремния, полученный методом плазмохимического синтеза, содержащий смесь  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз с удельной поверхностью порошка –  $20 \text{ м}^2/\text{г}$ , средним размером частиц, не превышающим 0,1 мкм. Химический состав порошка представлен в таблице 3.3.

Использовали также нитрид кремния двух партий, полученных в ИСМАН методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС): содержащий смесь  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз, с удельной поверхностью порошка –  $3-8 \text{ м}^2/\text{г}$ . Примерно 30 % составляли частицы размером до 1 мкм (преимущественно 0,5-1,0 мкм) и 70 % – частицы размером от 1 до 6 мкм (преимущественно 1,5-4 мкм).

Вторая партия нитрида кремния, полученного в ИСМАН методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-2), содержала смесь  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз, удельная поверхность порошка –  $7,4 \text{ м}^2/\text{г}$ , средний размер частиц 1-2 мкм.

Результаты петрографического анализа порошков нитрида кремния представлены ниже.

100 %  $\beta$ -модификация  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (высокотемпературная форма) кристаллизованная в виде нитевидных и столбчатых зёрен. Средний размер зёрен – 3-6 мкм. Изредка встречаются столбчатые кристаллы средним размером 8-10 мкм, содержанием менее 3-5 %. Длина нитевидных и столбчатых кристаллов примерно 12-25 мкм.

Примесной фазой в данном материале является  $\text{SiO}_2$  в виде кристобалита. Количество вторичной примесной фазы до 3 %. В данном материале отмечается наличие фазы углерода, которая не является механической примесью. Углерод в материале в виде тонких плёнок покрывает поверхность зёрен. В отдельных областях материала отмечается частичная карбонизация  $\text{Si}_3\text{N}_4$  твёрдого раство-

ра с образованием карбонитрида кремния (SiCN). Общее содержание углерода до 1,5 %.

$\alpha$ - и  $\beta$ - модификации  $\text{Si}_3\text{N}_4$

$\alpha$ - формы содержится 20-25 %. Размер кристаллов 2-3 мкм. По границам  $\alpha$ - формы отмечается оплавленность и снижение показателя преломления до 1,754, что свидетельствует о вероятности кристаллизации оксинитрида кремния. Соотношение фаз оксинитрид:  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4 = 8:25$ .

Основная матрица порошка –  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ , которая кристаллизована в виде волокнистых кристаллов с размером по длине оси от 4 до 6 мкм. По границам кристаллов  $\beta$ -формы кристаллизуется фаза кристобалита в виде чешуек размером гораздо 1 мкм. Количество чешуйчатого кристобалита в объеме примерно 3 %.

Химический состав порошков представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Условия получения и химический состав порошков нитрида кремния

Метод получения нитрида кремния	Siсвяз., %	Siсвоб., %	N <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %	Fe, %
Плазмохимический синтез	59,0	1,0	37,0	4,4	0,4
Самораспространяющийся высокотемпературного синтеза (СВС-1)	59,1	0,3	38,5	1,0-1,5	0,6
Самораспространяющийся высокотемпературного синтеза (СВС-2)	58,4	0,8	38,5	1,8	0,5

Использовали также карбид кремния марки КЧ (фракция 63-80 мкм).

Иттрий хлорид 6-водный  $\text{YCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  марка Ч, ТУ 6-09-4773-84.

Поливиниловый спирт, марка 8/2, ГОСТ 10749-69.

Хлорид алюминия 6-водный  $\text{AlCl}_3$ , марка ХЧ, ГОСТ 3759-85.

Парафин ТУ 6-09-3637-74.

Спекание образцов осуществляли с применением газообразного азота технической чистоты с содержанием кислорода до 0,5 об. % (ГОСТ 9293-74).

Для разжижения глинистых шликеров использовали электролит марки DOLAPIX PC – 67, а также жидкое стекло (раствор силиката натрия) и соду.

Химическое соединение основы DOLAPIX PC – 67 – натриевая соль поликарбоновых кислот.

Характеристика электролита DOLAPIX PC – 67 представлена в табл. 3.4 [287].

Таблица 3.4 – Характеристика электролита DOLAPIX PC-67

Характеристика	Значение
Внешний вид	Желто-коричневая жидкость
Содержание активного вещества	Около 43 %
Растворимость	Смешивается с водой
Плотность (20 °С)	Около 1,30 г/см <sup>3</sup>
рН (1%-ного раствора)	Около 8
Остаток при прокаливании	Около 15%

### 3.1.2 Методики, используемые в работе

#### 3.1.2.1 Методики исследования минерального, фазового и зернового состава

Минеральный и фазовый состав исследовали методами петрографии и рентгенофазового анализа.

##### 3.1.2.1.1 Петрографический анализ

Для исследования образцов под микроскопом применяли следующие методики микроскопического анализа:

1. При изучении порошков применяли методику иммерсионного анализа в проходящем свете на поляризационном микроскопе марки «Полам-211», которая включала определение фазового состава, равномерность распределения компонентов в твердом растворе, определение показателя преломления, формы и размера частиц, агрегированность.

2. Образцы после окончательного обжига и заключительной термической обработки изучали на аншлифах в отраженном свете (микроскопом марки «Полам-211»), определяли взаимное расположение фаз, распределение твердых растворов, формы и размеры кристаллов, а также пористость образцов и ее характер. определение фазового состава, равномерности распределения компонентов, формы и размера частиц, а также степени их агрегированности, то есть микро- и макроанализ [288].

Для выявления структуры на аншлифах применяли химическое и термическое травление. Последнее осуществляли путем нагрева аншлифа в ортофосфорной кислоте. Травление проводили при кипячении в течение 30 с, контролируя качество травления под микроскопом.

Снимки микроструктуры спеченных образцов получали с помощью инвертированного металлографического микроскопа отраженного света Carl Zeiss Axiovert 40 MAT [289].

### 3.1.2.1.2 Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ исследуемых материалов проводили с использованием рентгенограмм, снятых на дифрактометре ДРОН-3.0 согласно принятой для поликристаллических материалов методике [290, 291]. В качестве источника рентгеновских лучей применяли монохроматическое излучение  $\text{CuK}_\alpha$  или  $\text{CoK}_\alpha$ . Рентгенограммы снимали при угловой скорости вращения счетчика 2 град/мин с вращением образца в собственной плоскости. Напряжение рентгеновской трубки – 35 кВ, сила тока – 10 мкА. Относительная погрешность определения межплоскостных расстояний  $\pm 5\%$ .

Идентификацию фаз осуществляли с использованием таблиц межплоскостных расстояний и интенсивностей линий индивидуальных веществ, содержащихся в базе данных дифракционных стандартов 2002 JCPDS (PCPDFWIN).

Для фазового и дисперсионного анализа использовали оптическую и электронную микроскопию [292], лазерную гранулометрию [293], а также при-

меняли ситовой анализ с набором сит от 2,5 до 0,04 мм. Определяли также удельную поверхность порошков по методу БЭТ [293, С. 104-110].

### **3.1.2.1.3 Электронная микроскопия**

Исследование особенностей микроструктуры образцов керамики проводили на электронном микроскопах JEOL LV Tesla BS 340, Vega Tescan при ускоряющем напряжении до 60 кВ. На исследуемые поверхности образцов керамики предварительно в вакууме напыляли слой меди или углерода толщиной 5-10 нм с целью предотвращения скопления поверхностного заряда [292].

Спеченные образцы изучали на травленных аншлифах на растровом электронном микроскопе (LEO 1420 фирмы Zeiss), оснащённом системой энергодисперсионного микроанализа.

### **3.1.2.1.4 Лазерная гранулометрия**

Лазерную гранулометрию проводили на приборе Fritsch Analysette 22, предназначенном для оценки размеров частиц и функций распределения частиц по размерам суспензий, эмульсий и порошкообразных материалов. Измерение производили при постоянной циркуляции пробы через измерительную ячейку с использованием ультразвукового диспергирования анализируемых образцов в жидкости [293, С. 95-97].

Анализ проводили также на лазерном гранулометре марки «Mastersizer» фирмы Malvern Instruments Ltd.

### **3.1.2.1.5 Определение удельной поверхности (метод БЭТ)**

Для измерения удельной поверхности методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) использован прибор Sorbi-M, представляющий собой автоматизированный комплекс для получения изотерм адсорбции с использованием статического объёмного метода измерения количества адсорбированного вещества

на поверхности адсорбента [293, С. 104-110]. В качестве адсорбата использовали азот газообразный осч по ГОСТ 9293–74.

Перед экспериментами образцы подвергали дегазации при температуре  $100 \pm 5$  °С и давлении  $\sim 0,1$  Па в течение 2,5-3,0 часов. Условия адсорбционных экспериментов: температура – 77 К (жидкий азот), максимальное равновесное давление – 300 мм. рт. ст. Азот адсорбируется на образце таким образом, чтобы его молекулы покрывали поверхность монослоем. По параметрам кривой адсорбции рассчитывают удельную поверхность по уравнению БЭТ.

### **3.1.2.2 Методики исследования технологических, в том числе термических, свойств используемых масс**

#### **3.1.2.2.1 Определение усадки, термического коэффициента линейного расширения и непрерывной усадки**

Линейную непрерывную усадку определяли методом дилатометрии. Определение проводили на дилатометре марки NETZSCH DIL 402 PC. температура – 1300 °С; скорость охлаждения и нагревания – 2 град/мин; держатель образца –  $Al_2O_3$ ; измеряемый диапазон – 0/500 мкм; длина образца – 19 мм;  $\Delta l$  разрешение – 8 нм [294].

Линейную усадку определяли с помощью штангенциркуля, замеряя им размеры образцов до и после термообработки по известной формуле [293, С. 145-152].

#### **3.1.2.2.2 Определение числа пластичности и оптимальной формовочной влажности**

Число пластичности, пластическую прочность и оптимальную формовочную влажность глин и масс на их основе определяли с использованием конуса Ребиндера по методикам, изложенным в [293, С. 43-46].

Верхний предел пластичности (границу текучести) определили на приборе Васильева. После установления предела текучести оставшуюся часть массы использовали для определения границы раскатывания.

#### **3.1.2.2.3 Определение реологического поведения шликера с помощью ротационного вискозиметра «Реотест»**

Реологическое поведение шликеров (зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига, предел текучести) определяли на вискозиметре «Реотест». ПКГ «Гранат» [293, С. 123-126, 295].

#### **3.1.2.2.4 Разжижение шликера электролитом**

Разжижение литейных шликеров добавками электролитов определяли по методике, изложенной в [293, С. 122-123], получая зависимость времени истечения шликера через отверстие вискозиметра Энглера.

#### **3.1.2.2.5 Определение скорости набора массы**

Скорость набора массы оценивали по методу стерженьков, изложенному [293, С. 129-131], строя кривые зависимости набора и скорости набора 2 массы от времени.

#### **3.1.2.2.6 Определение коэффициента чувствительности к сушке**

Измерение коэффициента чувствительности глин и масс на их основе к сушке проводили по методу А. Ф. Чижского, основанного на определении влажности глин в условиях нормальной формовочной консистенции и в момент прекращения усадки [293, С. 62-63].

### **3.1.2.2.7 Дифференциально-термический и термогравиметрический анализы**

Для изучения процесса термического разложения и синтеза различных соединений, а также выявления температур фазовых переходов применяли методы дифференциально-термического и термогравиметрического анализов [296], для чего использовали дериватограф QD-1500 системы F. Paulik, I. Paulik и L. Erdey фирмы MOM с одновременной записью кривых нагревания исследуемых образцов (Т), изменения массы (TG), скорости изменения массы (DTG) и разности температур между эталонным и анализируемым веществами. Измерения проводили в интервале температур 25-1000 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин, в интервале 25-1500 °С со скоростью 7,5 °С/мин. В качестве эталона использовали порошок  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, прокаленный до температуры 1600 °С.

### **3.1.2.2.8 Методика определения керамических свойств (водопоглощения, открытой пористости, кажущейся плотности) образцов**

Керамические свойства образцов – открытую пористость, водопоглощение и среднюю плотность определяли методом гидростатического взвешивания по методике изложенной в [293, С. 165-168].

### **3.1.2.2.9 Методика определения механической прочности образцов**

Предел прочности при трехточечном изгибе образцов керамики в виде балочек определяли на разрывной машине FM-500 по методике, изложенной в [293, С. 185-191]. Расстояние между опорами  $l$  для образцов всех видов составляло 25 мм.

### **3.1.2.2.10 Определение однородности поверхности методом капиллярного всасывания**

Для определения однородности поверхности полуфабрикатов и спеченных образцов был разработан специальный метод оценки местной (локальной)

пористости по капиллярному всасыванию жидкости исследуемым участком поверхности.

Известны [297] данные о связи скорости всасывания жидкости поверхностью керамического материала с его физическими свойствами и микроструктурой. Используемый нами метод исследования основан на определении коэффициента всасывания жидкости поверхностью керамического образца, определяемого из графика зависимости количества впитавшейся жидкости от корня из времени всасывания (рис. 3.1). Было установлено, что коэффициент всасывания  $K_s$  (формула 14) прямо пропорционален доли активно всасывающих жидкость открытых пор.

$$K_s = m^{1/t^1} \quad (14)$$

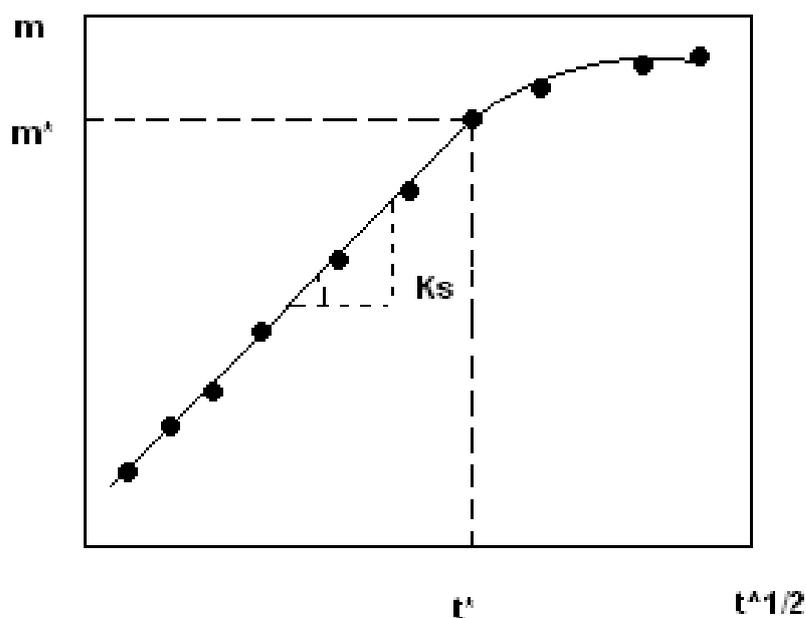


Рисунок 3.1 – Зависимости количества впитавшейся жидкости ( $m$ ) от продолжительности всасывания ( $t^{1/2}$ ),  $K_s$  – коэффициент всасывания

Описанный в статье [297] метод был нами модифицирован с целью получения информации об однородности поверхности отдельных участков полуфабриката и керамического образца. Для этого капилляры с жидкостью (окрашенной дистиллированной водой) подводились к центру и краю трех сторон образца (к его верхней, нижней и боковой поверхности). Количество погло-

щенной жидкости измеряли каждые 3 минуты в течение 15 минут, после чего определяли коэффициенты всасывания.

Измерение проводили на установке, изображенной на рисунке 3.2.

Установка для капиллярной пропитки состоит из трех стеклянных капилляров (3), расположенных параллельно друг другу, диаметром 1 мм. Капилляры закреплены в держатель (2), из листа резины, с помощью которого они закреплены на штативе (1). В каждый капилляр вставлен фитиль (4). Для снятия показаний за капиллярами крепится линейка (6). Образец (7) помещается на подставку (5).

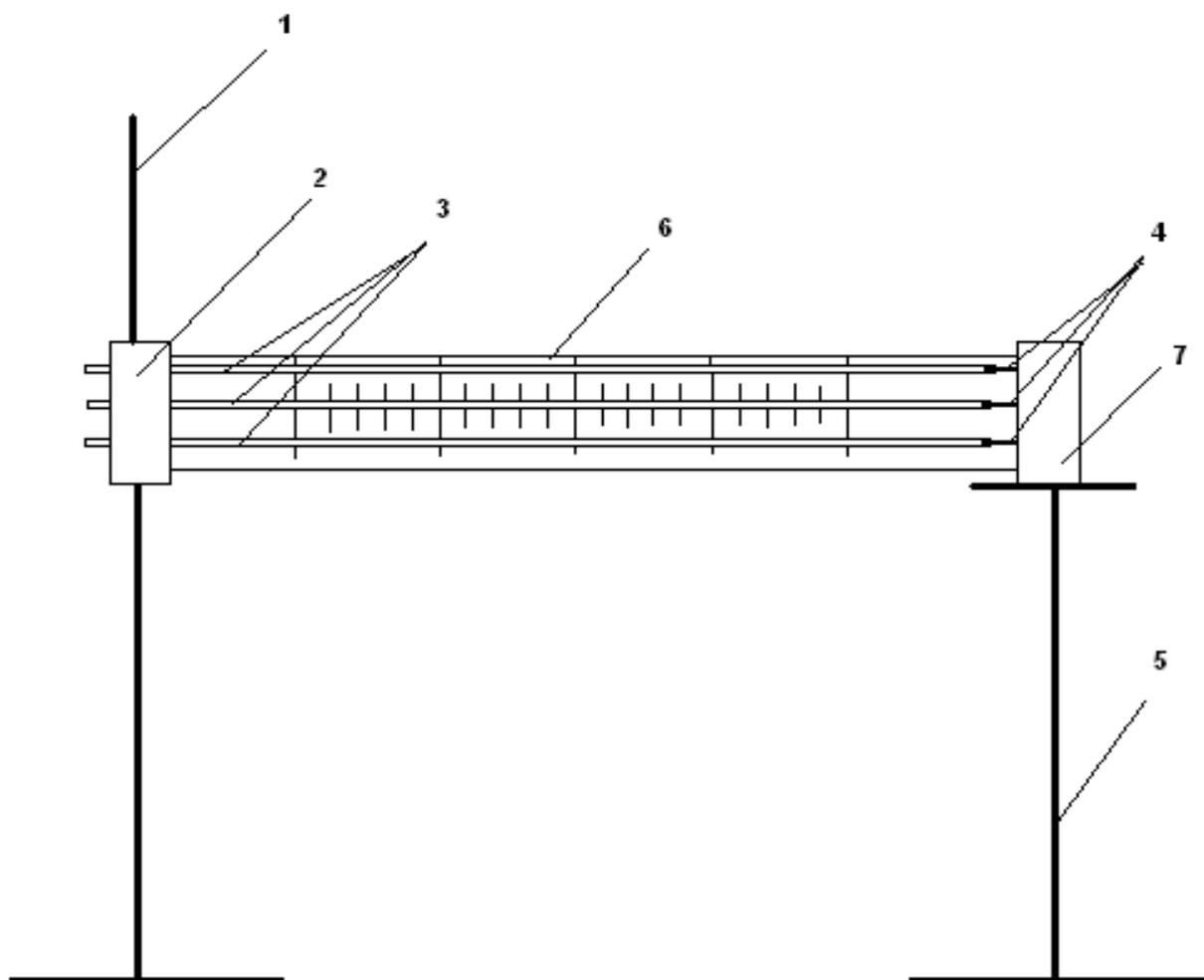


Рисунок 3.2 – Схема установки для капиллярного всасывания

Капилляры заполняются подкрашенным раствором с помощью шприца. Образец с помощью подставки (5) подводится к трем фитилям (4) капилляров

(3) и включают секундомер. Положение мениска жидкости записывали каждые 3 минуты. После окончания измерений построили графики зависимости количества впитавшейся жидкости от времени всасывания в степени  $1/2$ .

### 3.1.2.2.11 Установка для испытания образцов на высокотемпературную деформацию

Для определения вязкости керамического материала в условиях высоких температур была сконструирована и изготовлена оригинальная установка, позволяющая определить деформацию материала в условиях чистого сдвига. Принципиальная схема установки, а также форма и способ крепления образцов показаны на рис. 3.3.

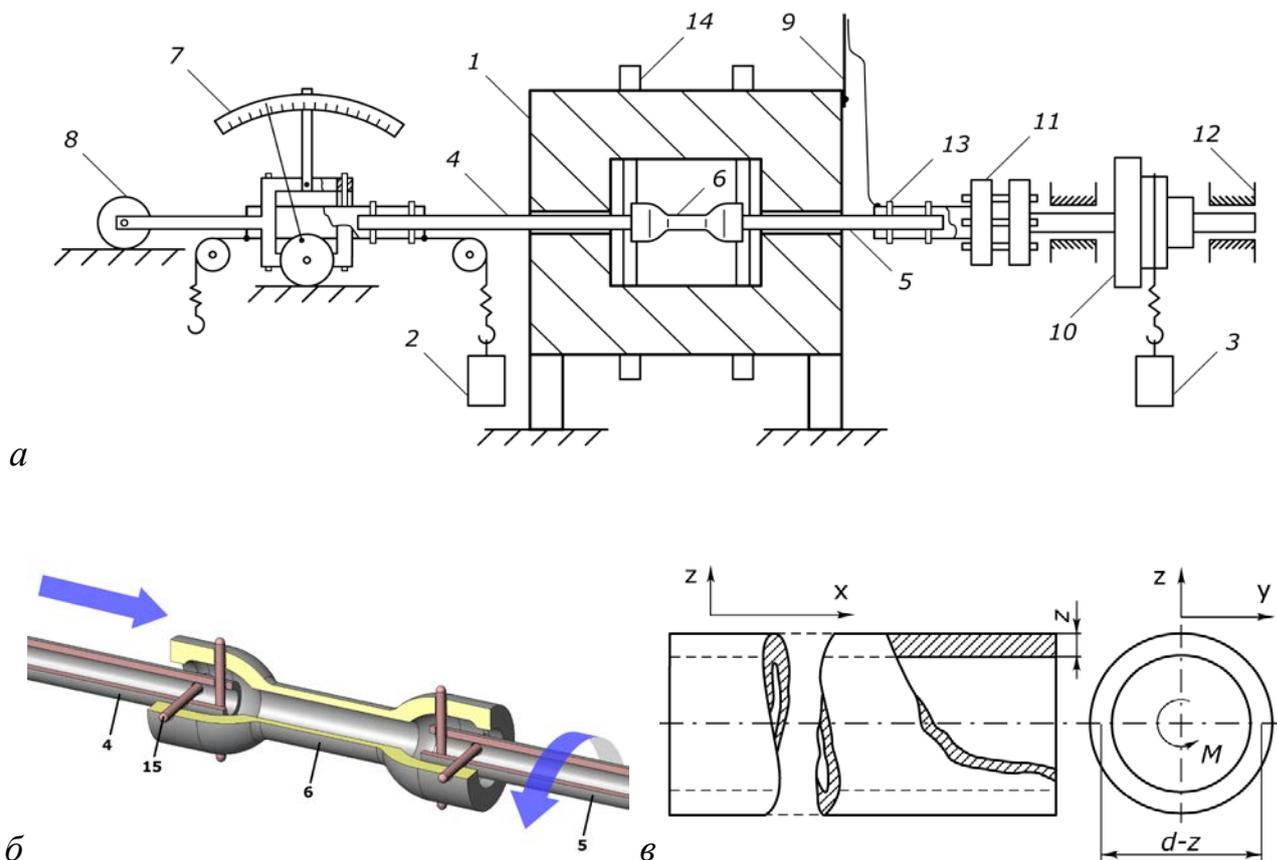


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема установки для определения деформации методом кручения (а), форма и способ крепления образца (б), обозначение размеров рабочей части образца (в)

Основные функциональные элементы установки – два механизма фиксации образца и соответствующие им системы измерения деформации, монтажный стол, электропечь и регулятор температуры печи.

Механизм фиксации, предназначенный для нагружения образца *1* кручением, включает установленный на подшипники качения *2* вал с дисками *3*, задающими радиус-вектор *R* приложения силы нагрузки *4*; керамическую трубку (держатель) *5*, соединенную с валом *3* посредством фланцевого регулировочного узла *6*, который позволяет настраивать противоположный конец трубки *5* на соосное вращение. Механизм фиксации образца, ограничивающий свободу перемещения поступательным движением, установлен на направляющих рельсах посредством колес *7*. Керамическая трубка (держатель) *8* передает образцу напряжения сжатия или растяжения, задаваемые грузом *9* с помощью лебедок. В двух стенах печи камерного типа *10* находятся отверстия для подвода трубок *5*, *8*. Нагрев печи осуществляется карбидкремниевыми нагревателями *11*. Деформация считывается относительно шкал *12*, *13* по углу поворота стрелок, закрепленных на соответствующих элементах держателей. Рабочая часть образца *1* представлена круглой трубкой (рис. 3.3 б), плавно переходящей в утолщенные концы большего диаметра для предотвращения их деформации. Концы имеют отверстия под огнеупорные керамические штифты *14*, расположенные крест-накрест. При работе печи сделанные из металла регулировочный узел *6* и крепежные винты *15* практически не нагреваются, материал держателей *4*, *8* и штифтов *14* – плотно спеченная корундовая керамика.

Использование установки предполагает регистрацию данных о деформациях как функциях задаваемых напряжений. Установка рассчитана на статический характер приложения напряжений. При этом деформации кручения соответствует напряжение сдвига (касательное напряжение  $\sigma_{12}$ ), развиваемое моментом силы *M* в рабочем сечении образца (рис. 3.3 в). Деформациям растяжения и сжатия соответствует осевое напряжение  $\sigma_{11}$ . Таким образом, в случае одновременного задания касательного и осевого напряжений в образце реализуется плоское напряженное состояние.

## **3.2 Эффективность способов формования полуфабрикатов различных форм с позиции однородности материала**

### **3.2.1 Исследование однородности образцов методом петрографии**

В разделе 2 работы описаны шкалы сложности изделий из металлов, пластмасс и керамики. В соответствии с ними сложность изделий определяется, прежде всего, сложностью формования. В свою очередь, сложность формования зависит от габаритов изделия, фактора формы и особенностей конфигурации (в том числе, от симметрии).

Для того чтобы убедиться в определяющем влиянии способа формования на однородность структуры материала, изучали образцы изделий из твердого и электротехнического фарфора разных производителей, но подобных составов, которые описаны в разделе 3.1. Образцы были формованы разными способами: изостатического прессования (фрагменты проходного электроизолятора), раскатки (блюдца, бокалы, чашки), сливного и наливного традиционного шликерного литья в гипсовые формы (чашки, миски, разделочные доски и др.), сливного шликерного литья с использованием вакуумного отсоса (чашки, бульонницы), шликерного литья под давлением в пластиковые формы (салатники, блюда, миски).

Толщина стенки полых и плоских фарфоровых изделий и, соответственно, вырезанных из них образцов, составляла 2-9 мм, толщина фрагмента электроизолятора составляла 100 мм.

Основные параметры формования изделий приведены в табл. 3.5.

Однородность изделий оценивали по распределению пор и зерен кварца на образцах в виде шлифов и аншлифов поперечных срезов стенок обожженных изделий. Исследование проводили методом оптической микроскопии, описанным в разделе 3.1. Так как для структуры фарфоровых изделий характерна осколочная удлиненная форма кварцевых зерен [298], связанная с раскалыванием частиц кварца при ударных способах измельчения (помол в шаровых мельницах), распределение этих зерен оказывается чувствительным к анизотропии

формовочных усилий. В отличие от гораздо более мелких глинистых частиц частицы кварца хорошо заметны на снимках микроструктуры образцов, особенно полученных в поляризованном свете (при скрещенных призмах Николя).

Полученные результаты исследования приведены в табл. 3.6 и на рис. 3.4.

Таблица 3.5 – Основные параметры формования исследованных изделий

Формуемое изделие	Симметрия изделий	Способ формования	Примерное время процесса формования, с
Миска	покоящегося конуса $\infty m$	Сливное шликерное литье	300
Чашка	покоящегося конуса $\infty m$	Сливное шликерное литье с вакуумным отсосом	60
Разделочная доска	плоскостная, $m$	Наливное шликерное литье	420
Блюдо	покоящегося конуса $\infty m$	Наливное шликерное литье под давлением	30
Бокал	покоящегося конуса $\infty m$	Раскатка	5
Блюдце	покоящегося конуса $\infty m$	Раскатка	5
Изолятор	покоящегося конуса $\infty m$	Изостатическое прессование	15

Таблица 3.6 – Характеристика микроструктуры образцов различного способа формования

Способ формования	Характеристики микроструктуры слоев материала		
	Слой, прилегающий к форме	Основной слой	Слой вблизи внутренней поверхности
Сливное шликерное литье	Образование текстуры: слой обогащен глинистыми частицами	Однороден	Образование текстуры: слой обогащен кварцевыми частицами
Сливное шликерное литье с вакуумным отсосом	То же	Микро-неоднородности	Слабо выраженное текстурирование
Наливное шликерное литье	То же	Образование текстуры: центральная зона в виде полосы обогащенной зернами кварца	Образование текстуры: слой обогащен глинистыми частицами
Наливное шликерное литье под давлением	То же с образованием следов каналов удаления воды	То же, менее выражено	Аналогично слою вблизи внешней поверхности
Пластическое формование способом раскатки*	Однороден, с преимущественной ориентацией частиц кварца вдоль поверхности	Однороден	Уплотнение слоя материала, формуемого инструментом
Изостатическое прессование	Однороден, со следами структуры гранул	Однороден, со следами структуры гранул	Однороден, со следами структуры гранул

На рисунке показаны фотографии микроструктуры края образцов, полученные с помощью электронного микроскопа. Наиболее заметны скопления пор вблизи поверхности образцов, и создание текстур, связанное с потоками шликера (рис. 3.4).

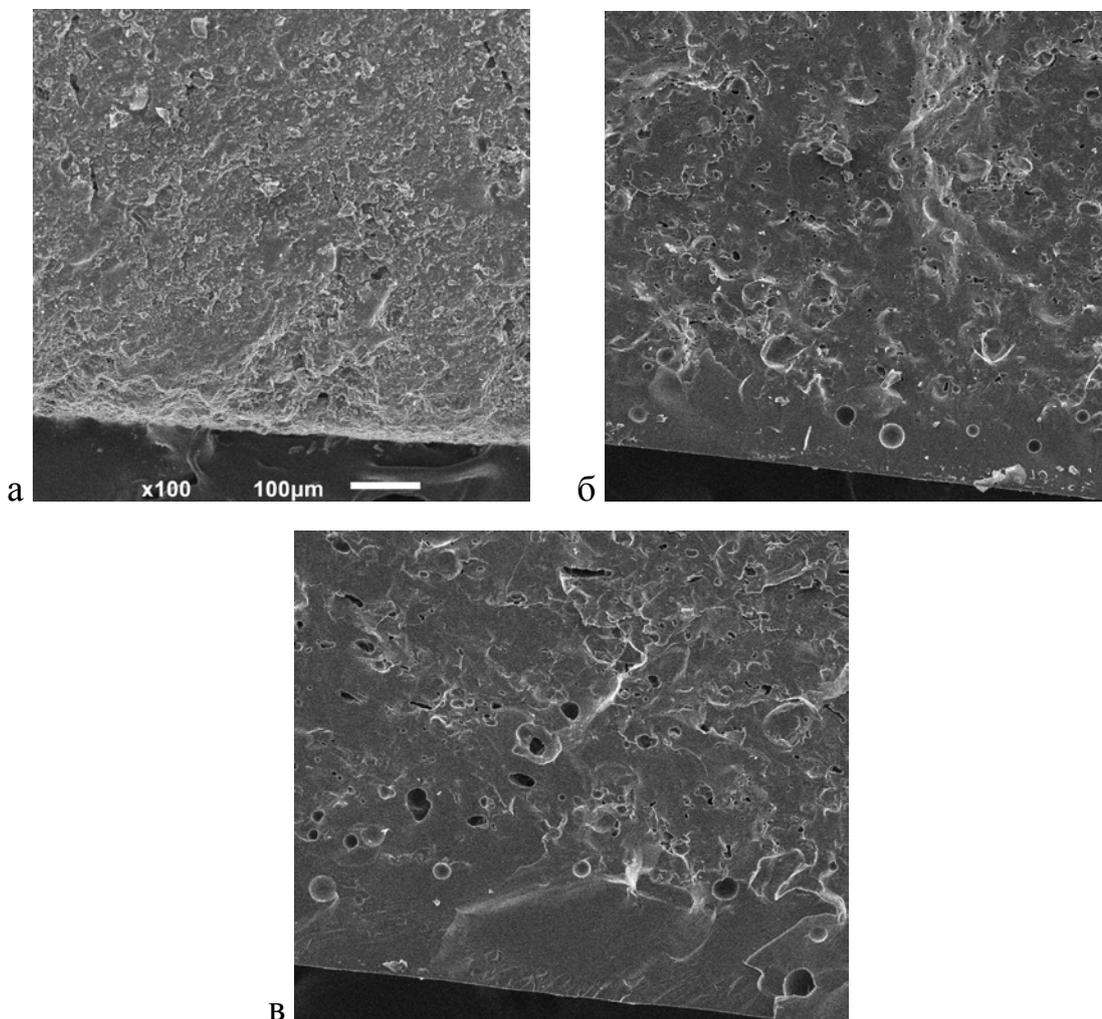


Рисунок 3.4 – Фотографии участков микроструктуры фарфоровых образцов, полученные с помощью электронного микроскопа: а – изолятора, формованного изостатическим прессованием, б – салатника, формованного литьем под давлением; в – чашки, формованной сливным литьем (x100)

При анализе структуры образцов изделий, формованных способом сливного шликерного литья, заметна разница в распределении глинистых частиц и частиц кварца и полевошпатовых минералов, которая объясняется большей подвижностью в шликере гораздо более дисперсных глинистых частиц. Они первыми занимают положение вблизи стенки пористой гипсовой формы, после

слива избытка шликера они частично уходят с фильтрующей через материал жидкостью, обнажая малоподвижные крупные частицы каменистых минералов на поверхности, противоположной гипсовой формы.

Такое распределение глинистых частиц оказывает существенное влияние на пористость материала, которая оказывается различна на разных поверхностях образцов (рис. 3.5).

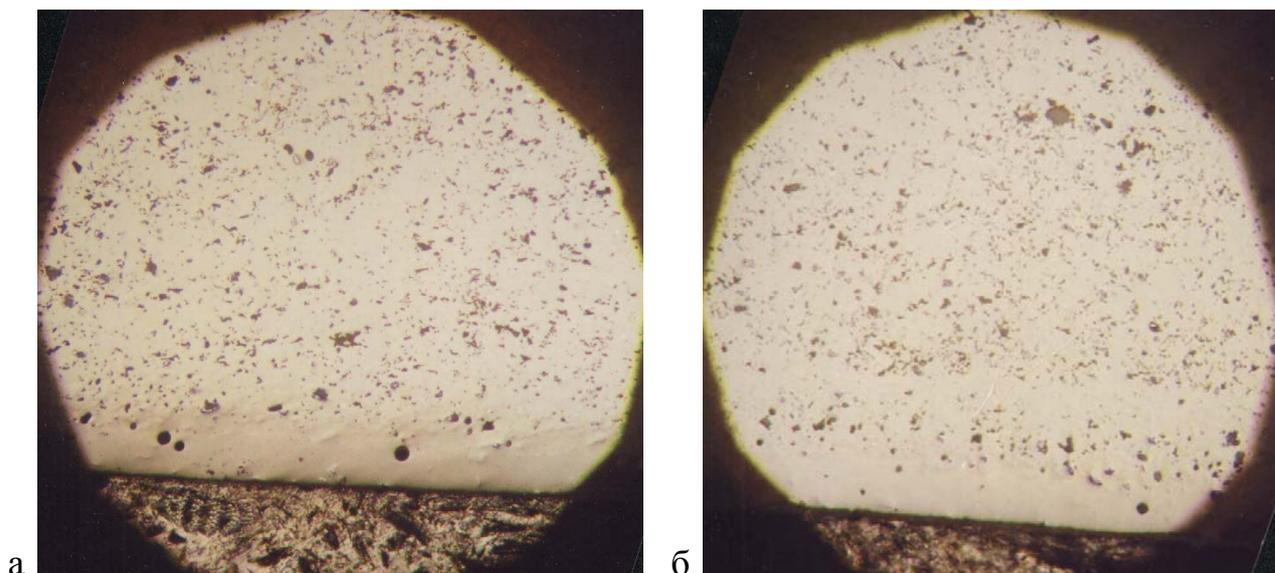


Рисунок 3.5 – Распределение пор в слоях материала вблизи поверхности образца. Показаны участки материала вблизи поверхности гипсовой формы (а) и противоположной стороны (б). Аншлифы в отраженном свете (x110)

Необходимо также отметить преимущественное расположение (ориентацию) частиц обломочной формы параллельно поверхностям изделия.

Применение отсоса избытка шликера при сливном шликерном литье приводит к уменьшению разницы в структуре внешних и внутренних слоев изделий (прилегающих в форме и противоположных ей). Этот эффект проиллюстрирован фотографиями шлифов (рис. 3.6 а, б) и объясняется перемещением подвижных глинистых частиц к внутренней поверхности изделия при сливе шликера, что делает прилегающий к поверхности слой материала более однородным по сравнению со слоем, образуемым в процессе шликерного литья без применения отсоса.

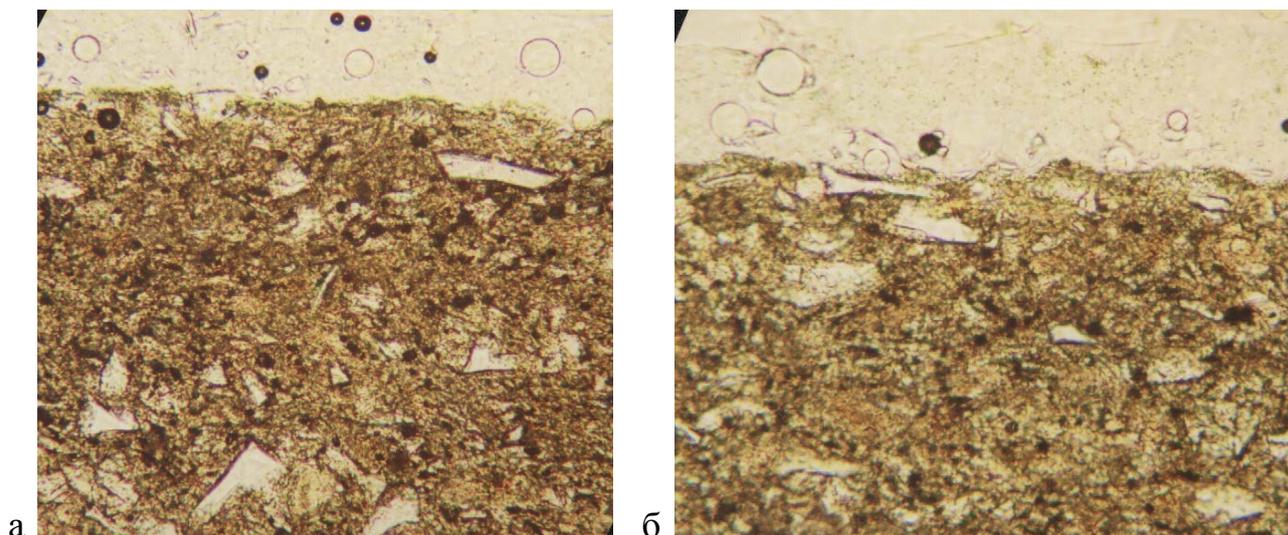


Рисунок 3.6 – Микроструктура образцов (щлифы), полученных шликерным литьем с применением вакуумного отсоса. Показаны участки материала вблизи поверхности гипсовой формы (а) и противоположной стороны (б) (x550)

Особенности структуры изделий, полученных наливным литьем, объясняются эффектом одновременного набора массы двумя стенками гипсовой формы. При этом в середине изделия, за счет активного перемещения частиц в противоположные стороны, образуется своеобразное разряжение, проводящее определенному дефициту дисперсных глинистых частиц, а нередко и к дефектам [298, С. 19].

На рис. 3.7 показана микроструктура края (а) и середины (б) образца. В середине образца заметна протяженная зона с крупными агрегатами зерен.

Образование текстур в виде направленных под углом к поверхности потоков в образцах, полученных литьем под давлением в пластиковые формы (рис. 3.8, а), объясняется высокой скоростью удаления фильтрата через отверстия в форме (более чем в 10 раз, табл. 3.5), которые из-за особенностей ее конструкции, не могут обеспечивать равномерное всасывание (как в случае традиционного литья). В результате потоки образуются в тех местах формы, где расположены отводные каналы, которые собирают фильтрат, попадающий через микропористую поверхность формы.

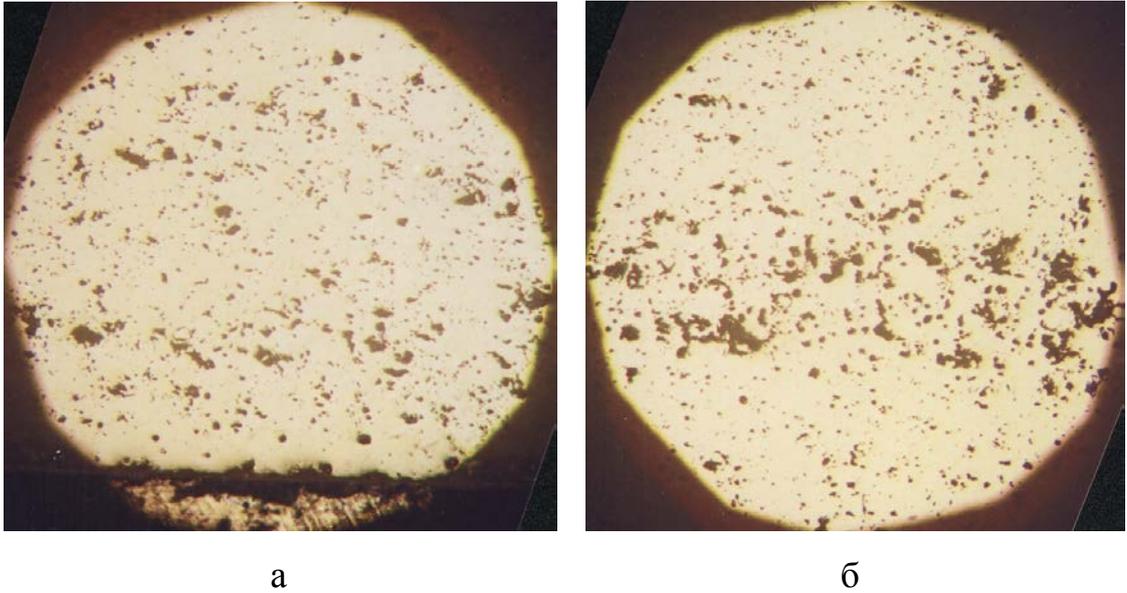


Рисунок 3.7 – Микроструктура образцов (аншлифы), полученных наливным шликерным литьем. Показаны участки материала вблизи поверхности гипсовой формы (а) и противоположной стороны (б) (x110)

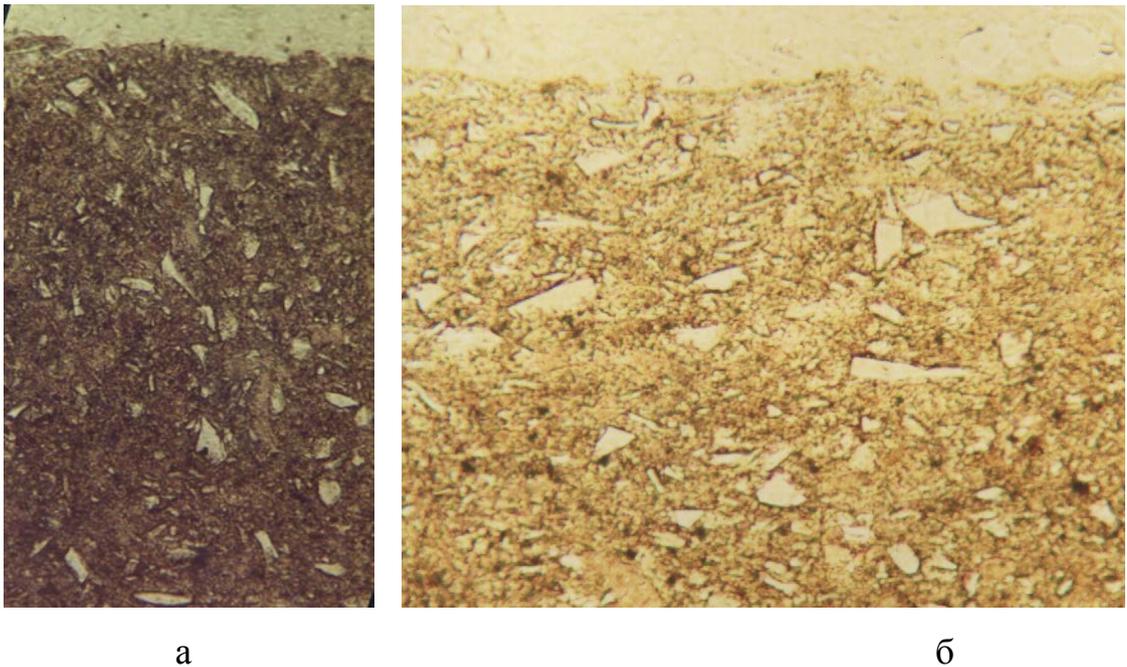


Рисунок 3.8 – Микроструктура образца материала вблизи поверхности изделия (шлиф), полученного: а – шликерным литьем под давлением, б – раскаткой (x252)

При формировании способом раскатки шаблоном однородность структуры материала в целом соблюдается во всем объеме образцов. Преимущественная

ориентация вытянутых кварцевых зерен вблизи поверхности формы и шаблона (рис. 3.8, б) объясняется значительными сдвиговыми деформациями, возникающими во всей массе при формовании и особенно выраженными в граничных слоях.

Напротив, разупорядоченное расположение кварцевых зерен может свидетельствовать об аномалии, т. е. нарушении однородности структуры, т. к. участки с хаотичным расположением зерен встречаются вблизи резкого изменения формы изделия (например, ножки блюда) или в местах дефектов (жмотины, замины).

Структура изделий, формованных способом изостатического прессования, отличается высокой степенью однородности. Ее особенностью является наследование микроструктуры гранул пресс-порошка, в которых базовые грани кварцевых частиц располагаются параллельно поверхности, занимая такое положение в процессе высыхания капли шликера в камере распылительной сушилки.

Из проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- структура фарфоровых образцов зависит от способа их формования;
- наибольшее различие в структуре образцов проявляется их в поверхностном слое, на который действуют максимальные формовочные усилия;
- способы подготовки массы и формования в значительной степени влияют на образование дефектов.

### **3.2.2 Исследование однородности образцов методом меток и капиллярного всасывания**

В данном разделе работы приводятся экспериментальные данные по исследованию однородности полуфабрикатов, формованных типичными способами формования (прессованием, пластическим формованием и шликерным литьем). В качестве материала были выбраны массы из фаянса, полуфарфора и фарфора, из которых производят широкую гамму изделий как бытового, так и технического назначения. Однородность полуфабрикатов различной формы

оценивали по различию в плотности, открытой пористости (по способности к капиллярному всасыванию жидкости, методика которого описана в разделе 3.1) разных частей, а также по изменению распределения меток, вводимых в массу. Отдельно оценивали распределение открытой пористости в высушенном и предварительно обожженном полуфабрикate.

Известно, что производство керамических изделий осложняется изменением их размеров (усадкой), которая происходит неравномерно по объему изделия. Только относительная однородность структуры материала (распределения элементов структуры), сохраняющаяся всех стадиях производства, может обеспечить однородность свойств и, соответственно, обеспечить получение изделия без искажения заданной формы (деформации) и нарушений сплошности (микро- и макротрещин).

На стадии подготовки формовочной массы, при дозировании и смешивании компонентов, стремятся достигнуть достаточной степени ее однородности, однако это необходимое, но не достаточное условие получения однородного полуфабриката. В процессе формования к полуфабрикату прикладывают разнонаправленные усилия, симметрия которых может наследоваться структурой материала, наследуя те виды симметрии, которые совпадают у поля формовочных усилий и формы полуфабриката (см. раздел 2). Даже при хорошей степени перемешивания компонентов анизотропная форма частиц компонентов (например, глинистых минералов или осколочных вытянутых частиц отошающих компонентов) может служить причиной образования в процессе формования преимущественного расположения частиц в полуфабрикate по определенным направлениям (возникновения текстуры).

Известно, что способ формования во многом определяет свойства материала из-за различий в образуемых структурах, прежде всего, в распределении пористости [299].

Способы формования различаются по величине, площади и интенсивности прилагаемых к материалу усилий. При всех способах формования приложенное давление распределяется по объему заготовки неравномерно вследствие

наличия внешнего трения о материал формы (формование под влиянием внешних усилий – прессованием, пластическое формование) и из-за внутреннего трения между частицами формуемой массы (формование способами шликерного литья). Даже при практически одновременном образовании связей между частицами в объеме материала (горячее шликерное литье, литье высококонцентрированных суспензий, золь-гель процессы и т. п.) формуемая заготовка испытывает влияние заданной симметрии формы из-за искажения внешними границами и границами формующей оснастки равномерного температурного, влажностного и др. полей.

Степень однородности полуфабриката и керамики можно определять различными способами: взаимодействием структуры с различными типами исследований, микроскопическим исследованием структуры, определением ее цветовых характеристик [300-304].

Большинство исследователей связывают однородность заготовки с ее равноплотностью и подобием свойств различных частей.

В работах [204, С. 73-97, 305] была изучена неравноплотность полуфабрикатов и изделий, полученных способами прессования и шликерного литья, сопоставлены известные способы формования в отношении достижения однородности. В [306] исследовали распределение давления по толщине отливки во время процесса шликерного литья. В этих работах основное внимание уделяется толщине формуемого материала, от которой зависит однородность полуфабриката.

В работе [307] утверждается, что из-за сложного многофазного состава керамических материалов необходимо отдельно рассматривать роль масштабного фактора.

Для исследования степени однородности заготовок, полученных разными способами формования, использовали шихту для производства фарфора, представленную сырьевыми компонентами различной природы (отощающими и пластичными). Наиболее дисперсными частицами исходной смеси были глинистые компоненты фарфоровой массы, размер которых не превышал 5-7 мкм.

Размер частицы отошающих компонентов (кварцевого песка, полевого шпата, пегматита) не превышал 50-60 мкм.

Для оценки однородности полуфабрикатов в состав шихты вводили метки – частицы карбида кремния марки КЧ, размеры которых были подобны размерам частиц отошающих компонентов шихты (фракция 63-80 мкм), но отличались от других компонентов массы цветом (черный цвет частиц карбида кремния марки КЧ на белом фоне, создающимся частицами других компонентов).

Для исследования влияния способа формования были выбраны следующие способы формования:

- пластическое формование набивкой из пласта в гипсовую форму;
- осевое двустороннее полусухое прессование в металлической форме;
- изостатическое прессование методом мокрого чехла заранее оформленных подпрессовкой полуфабрикатов;
- наливное шликерное литье в гипсовую форму.

Пластичную формовочную массу, пресс-порошок и шликер рабочих консистенций готовили, тщательно смешивая 90 % порошка фарфоровой массы и 10 % порошка карбида кремния, увлажняя до необходимой влажности общепринятыми в лабораторной практике методами, включая гранулирование протиркой через сито, вылеживание массы и выстаивание шликера.

Параллельно с приготовлением массы с добавкой карбида кремния, готовили контрольную массу без добавки.

Степень неоднородности  $\sigma$  полученной смеси, полуфабриката и керамического образца оценивали визуально с использованием бинокулярной лупы МБС-2 по значениям среднеквадратичного отклонения [308]:

$$\sigma = ((\sum (x_i - x_{cp})^2 / (N - 1))^{1/2}, \quad (15)$$

где  $x_i$  – концентрация меток в пробе (значение свойства в отдельной части образца);  $x_{cp}$  – среднее арифметическое значение концентрации меток (значение свойства для всего образца);  $N$  – количество проб.

Определив степень неоднородности пластичной массы (пресс-порошка, шликера) из них формовали образцы в виде дисков диаметров 30 мм и пластин размерами 40 x 30 мм. Толщина образцов не превышала 20 мм.

После формования часть образцов в виде дисков разрезали на четыре части, часть образцов в форме пластин – на шесть частей и определяли влажность каждой части, а с помощью бинокулярной лупы - концентрацию меток на срезах.

Высушенные и обожженные неразрезанные образцы распиливали на такие же части алмазным инструментом и пористость отдельных частей. Определяли также механическую прочность образцов (предел прочности при изгибе), но полученный значительный разброс значений, связанный с неправильной геометрией частей образцов, привел к исключению этого показателя из рассмотрения.

Каждая серия состояла не менее чем из 5 образцов.

Результаты измерения свойств полуфабрикатов и спеченных образцов представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Некоторые свойства формованных полуфабрикатов

Метод формования	Среднее значение свойства	
	Влажность полуфабриката, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Полусухое прессование:		
Пластины	4,69 ± 0,05	2,18 ± 0,01
Диски	3,51 ± 0,06	2,24 ± 0,01
Изостатическое прессование:		
Пластины	3,62 ± 0,06	2,22 ± 0,01
Диски	3,85 ± 0,04	2,24 ± 0,01
Пластическое прессование:		
Пластины	18,23 ± 0,14	2,29 ± 0,01
Диски	17,61 ± 0,11	2,28 ± 0,01
Шликерное литье, пластины	-	2,24 ± 0,01

Отклонения в плотности образцов, влажности полуфабрикатов и концентрации меток в различных частях образцов определяли по формуле 15. Степень неоднородности, рассчитанная по каждому свойству, была представлена в относительных единицах (табл. 3.8).

Данные табл. 3.8 в целом подтверждают известные факты: высокая степень однородности образцов (наименьшие значения среднеквадратичного отклонения) достигается при формировании методами изостатического прессования и шликерного литья.

Таблица 3.8 – Степень неоднородности образцов

Метод формования	Среднее значение степени неоднородности по свойствам		
	Концентрация меток, отн. ед.	Влажность полуфабриката, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Полусухое прессование: Пластины	-	0,23	0,024
Диски	38	0,19	0,020
Изостатическое прессование: Пластины	-	0,20	0,007
Диски	27	0,07	0,011
Пластическое прессование: Пластины	-	0,42	0,017
Диски	34	0,21	0,018
Шликерное литье: Пластины	-	-	0,011
Диски	23	-	-

Рассматривая неоднородность по плотности образцов, прошедших сушку и обжиг, мы учитывали тот факт, что значительный вклад в уплотнение материала образца оказывает именно формирование, так как обжиг образцов проводили в одинаковых условиях по одному режиму.

Следует отметить, что при рассмотрении зависимости однородности свойств полуфабриката от способа формования, из рассмотрения были исключены показатели влажности образцов. Влажность различных частей образцов оказалась параметром, который слишком сильно зависит от условий проведения эксперимента (извлечения из формы или оболочки, точности среза и т. п.)

Полученные численные значения степени неоднородности образцов дали возможность установить их зависимость от геометрических характеристик образца и способа его формирования.

При анализе распределения меток по сечению образцов, прежде всего, нас интересовало возможное смещение элементарного объема материала, происходящее при его уплотнении в результате сдвиговых явлений из-за неравно-

мерного распределения формирующих усилий, часть из которых расходуется на преодоление трения о формирующую оснастку.

Известно уравнение Баландина для распределения давления по высоте прессовки:

$$p_h = p_0 e^{-k(h/R_r)}, \quad (16)$$

где  $p_h$  – давление на уровне  $h$ ;  $p_0$  – давление у поверхности формирующего пуансона;  $k$  – коэффициент (удвоенное произведение коэффициентов бокового распора и внешнего трения);  $h$  – расстояние от формирующего пуансона;  $R_r$  – гидравлический радиус, принятый как отношение площади сечения к периметру.

Из уравнения (16) можно вывести выражение для степени неоднородности ( $\beta < 1$ ) полуфабриката по его высоте [309]:

$$\beta = e^{-k(h/R_r)}, \quad (17)$$

Выражение (17) говорит об отсутствии зависимости неоднородности полуфабриката от давления прессования и определяющем влиянии коэффициента внешнего трения. Фактор формы в уравнении выражен отношением высоты прессовки к гидравлическому радиусу, рассчитанному через периметр, что также подчеркивает значительное влияние внешнего трения.

В работе [305, С. 28] отмечается линейный характер изменения плотности по высоте прессовки (уравнение Попильского-Смоля) и приводятся данные о весьма сложной зависимости распределения плотности по сечению, перпендикулярному направлению прессования. Таким образом, нельзя говорить об однозначно установленной зависимости неоднородности полуфабриката от его геометрических характеристик и условий формования. Кроме того, в таких способах формования, как шликерное литье и изостатическое прессование, влияние фактора внешнего трения значительно меньше, поэтому и роль давления формования, и фактор формы могут быть представлены иначе.

Наличие в формовочной массе анизотропных частиц (глинистых минералов, осколочных форм кварца) усиливает неравномерность структуры. Это явление известно для таких интенсивных способов формования, как прессование в закрытой форме [310], анизотропия частиц приводит к образованию текстур при шликерном литье [106, С. 144]. В процессе пластического формования сдвиговые деформации протекают легче, когда анизотропные частицы массы ориентируются по направлению перпендикулярному усилию формования и создают текстуры, направление которых обычно параллельно поверхности формуемого инструмента и оснастки (штампа, формы, мундштука).

Геометрические характеристики образца наиболее просто описать либо отношением его объема к поверхности, либо характеристической толщиной, которая в этом случае будет равна высоте образца в направлении формования. Примем геометрический фактор в виде критерия  $f_f$  (приведенного фактора формы), в отличие от рассмотренного во 2 части работы (формула 2) фактор формы рассчитывается с учетом площади образца, на которую прикладывается усилие формования:

$$f_f = V / S_p, \quad (18)$$

где  $V$  – объем образца;  $S_p$  – площадь образца, к которой прикладывается усилие формования.

Данный фактор формы может трактоваться как высота формуемого слоя материала. Чем больше  $f_f$ , тем, вероятно, сложнее получить однородный материал формуемого полуфабриката, прикладывая формующие усилие к ограниченной площади поверхности (обычно одной из сторон полуфабриката) и преодолевая внешнее трение о поверхности формы. Поверхности формы, которые строго перпендикулярны направлению формования, оказывают меньшее сопротивление перемещению слоев массы и ее отдельных частиц, однако при увеличении давления на массу ее структурные элементы могут перемещаться вдоль поверхности. Особенно велико влияние внешнего трения о поверхности формы, расположенные вдоль направления формования: вблизи них перемещение эле-

ментов структуры массы максимально. Размерность фактора формы – единицы длины.

Усилие формования и вязкость формуемой системы объединяют в уравнения, показывающие зависимость возможной величины деформации от прикладываемого усилия: от уравнения Гука для твердых тел и уравнения Ньютона для идеальных жидкостей, до степенных выражений для так называемых неньютоновских жидкостей (тело Бингама, тело Шведова и т. д.), которыми описывают поведение под нагрузкой пластических масс. В разделе 2 диссертационной работы были приведены диаграммы, характеризующие связь между формирующими усилиями и вязкостью формуемой системы для изделий различной степени сложности (рис. 2.12 и рис. 2.13). Согласно им для формования однородных полуфабрикатов необходимо соответствие прилагаемых к системе (шликеру, пластической массе, порошку) усилий ее эффективной вязкости.

Для единой оценки условий формования образцов примем фактор  $G$ , характеризующий условия формования и характеристику системы.

$$G = P / \eta_{\text{отн}}, \quad (19)$$

где  $P$  – максимальное давление формования;  $\eta_{\text{отн}}$  – относительная вязкость системы, рассчитанная из объемного содержания твердой фазы по выражению Ю. Е. Пивинского для высоконаполненных керамических шликеров [309, С. 60].

$$\eta_{\text{отн}} = \eta / \eta_0 = (1 + K_s C_v / (1 - C_v / C_{\text{вкр}}))^2, \quad (20)$$

где  $\eta_0$  – вязкость дисперсионной среды (в нашем случае  $\eta_0 = 1$ );  $C_v$  и  $C_{\text{вкр}}$  – объемная доля твердого вещества в суспензии и ее критическое значение (в нашем случае  $C_{\text{вкр}} = 0,74$ );  $K_s$  – коэффициент, равный 0,3.

Так как вязкость является коэффициентом, характеризующим способность системы к деформации под влиянием внешних усилий (или, иначе, способность сопротивляться перемещению отдельных фрагментов относительно друг друга), то предлагаемый фактор может трактоваться, как относительное смещение под влиянием внешней силы. Для пластичной массы подобное соот-

ношение с пределом текучести в числителе характеризует пластичность  $\Pi$  (формула 21), для шликеров – скорость течения  $\varepsilon^n$  (формула 22):

$$\Pi = p_k / \eta_0, \quad (21)$$

где  $p_k$  – предел текучести,  $\eta_0$  – вязкость неразрушенной системы.

$$\varepsilon^n = p / \eta_{эф.}, \quad (22)$$

где  $p$  – приложенное напряжение сдвига,  $\eta_{эф.}$  – эффективная вязкость.

Фактор  $G$ , помимо характеристики формуемой системы (материала) и процесса (усилия формования) содержит характеристику формуемого образца (площадь поверхности образца к которой прикладывается усилие формования). Учитывая безразмерность относительных единиц вязкости, размерность фактора будет выражена в  $\text{Н/м}^2$  или Па.

Выбор уравнения (20) для характеристики вязкости различных систем (от шликера до пресс-порошка) объясняется следующим. Во-первых, данное уравнение выведено для тиксотропных высоконаполненных систем, которые занимают промежуточное положение между пластическими массами и шликерами, т. е. для систем с промежуточным типом контактов – между коагуляционными дальнего порядка и коагуляционными ближнего порядка, последние характерны и для прессуемых масс. Пресс-порошок фарфоровой массы, содержащей большое количество глинистых компонентов, находящийся в состоянии уплотнения под действием внешних сил, может также рассматриваться как система с промежуточным типом контактов.

Во-вторых, выражение (20) охватывает максимальный диапазон сочетания твердых и жидкой фаз.

Объемные содержания твердой фазы для связанных, т. е. ведущих себя согласованно и, соответственно, характеризующихся определенным реологическим поведением, систем разной консистенции колеблются в широких пределах. Для шликерного литья в начальном состоянии – от 0,3 до 0,4, для пластических масс – 0,5-0,6. Для пресс-порошка сплошность массы достигается в процессе прессования при развитии ближних коагуляционных контактов и частичном образовании конденсационных контактов между отдельными частицами

твердой фазы. В этот период в прессовке присутствует значительное количество газовой фазы (воздуха), что позволяет оценить объемную долю твердой фазы как 0,6-0,65.

Рассчитывая по данному уравнению относительную вязкость системы, мы получили следующие пределы значений относительной вязкости: для процесса шликерного литья – 3-5, для пластического формования – 11-35, для прессования – 35-60.

Рассчитав значения факторов, характеризующих условия формования, характеристику системы ( $G$ ) и геометрические характеристики образца ( $f_f$ ), установили зависимости (рис. 3.9) между произведением этих факторов и величиной неоднородности образцов, рассчитанной по уравнению (15).

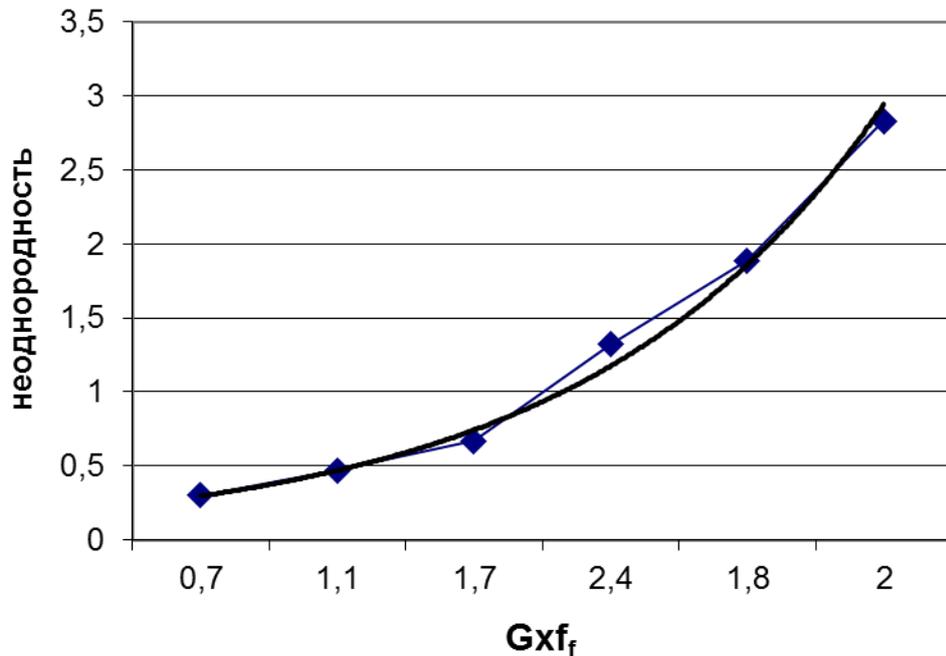


Рисунок 3.9 – Зависимость степени неоднородности образцов, рассчитанной по концентрации меток в различных частях полуфабриката от произведения факторов  $f_f$  и  $G$

Размерность произведения факторов  $G$  и  $f_f$  – н/м, что может трактоваться как градиент усилий в образце, появляющийся в результате неоднородного распределения усилий формования по объему образца из-за внешнего и внутреннего трения. Чем больше градиент усилий, тем больше неоднородность ма-

териала, возникающая в процессе формования и выраженная в различиях плотности.

Зависимость степени неоднородности, рассчитанной по концентрации меток в различных частях полуфабрикатов (в форме дисков), плотности различных частей образцов (дисков и пластин), формованных разными методами, высушенных и обожженных, от произведения факторов  $S$  и  $G$  может быть аппроксимирована логарифмической кривой (рис. 3.10) с достаточной достоверностью.

Уравнения и степень достоверности аппроксимации:  $a - y = 30,987 + 6,1593 \ln(x)$ ,  $R^2 = 0,9871$ ;  $b - y = 0,0151 + 0,0055 \ln(x)$ ,  $R^2 = 0,9145$

Выражение для степени неоднородности, полученное в результате обработки приведенных экспериментальных данных, можно представить как

$$\sigma = C + k \ln(f_f \cdot G) \quad (23)$$

или, если  $f_f$  представить как  $h$  в выражении (23), т. е. как высоту формуемого слоя материала,

$$\sigma = C + k \ln(V/S_{\phi} \cdot P/\eta_{отн}) = C + k \ln(h/S_{\phi} \cdot T/\eta_{отн}), \quad (24)$$

где  $C$ ,  $k$  – коэффициенты;  $T$  – усилие формования.

Полученное уравнение показывает нелинейное увеличение степени неоднородности формуемой смеси с увеличением приведенного фактора формы образца или высоты слоя формуемого материала и с повышением отношения прилагаемого давления к относительной вязкости системы. Вероятно, фактор  $G$  имеет область оптимальных значений, выход из границы которой делает формование неэффективным или невозможным (получение полуфабриката недостаточной связанности и, соответственно, прочности или образование дефектов, аккумулирующих избыточную энергию формования).

Связь энергии внешних воздействий на структуру материала и образование так называемых диссипативных структур, как реакции на внешние воздействия, было рассмотрено выше (в разделе 2).

Решающее влияние на неоднородность вносит геометрический фактор, характеризующий способ приложения давления к образцу определенной формы

– его значение изменялось примерно от 0,5 до 4,8, тогда как значения фактора формования изменялись незначительно – от 0,3 до 0,7. Для таких методов формования, как изостатическое формование и шликерное литье, значения логарифма произведения факторов оказывались отрицательными, для прессования и пластического формования – положительными.

Стремление приведенных зависимостей степени неоднородности к определенному пределу можно объяснить существованием физических границ (стенок формы) перемещения элементарных объемов материала (в том числе мекток) в системе связанных частиц.

Полученное выражение позволило сравнить различные способы формования образцов неодинаковой формы в отношении достижения определенной степени однородности. Показано, что объем формируемого образца не является столь важной характеристикой, как площадь приложения давления формования.

Как показано ранее (см. раздел 2.2), способ формования оказывает наибольшее влияние на структуру поверхностного слоя полуфабриката, поэтому отдельно изучали однородность поверхности образцов различной формы, полученных различными способами формования.

В разделе 2.2 работы показано, что значительную долю дефектов сушки и обжига можно трактовать, как проявление неоднородностей, возникших при формировании полуфабриката. Исследование однородности поверхности высушенного и обожженного полуфабриката должно было показать, как меняется эта характеристика в процессе термообработки и как это влияет на технологию.

В качестве исходных материалов для изготовления образцов, были взяты: фарфоровая, фаянсовая массы и фарфоровая масса с наполнителем (зернами фарфорового шамота средним размером 0,6 мм). Образцы различной формы (пластины, цилиндры и цилиндры с полукруглой выемкой со стороны одной из торцевых поверхностей) формовали полусухим прессованием, пластическим формованием и литьем в гипсовые формы (рис. 3.10).

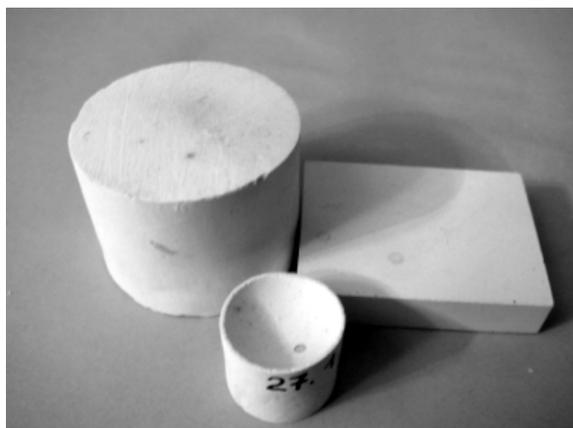


Рисунок 3.10 – Образцы различной формы, на которых проводили измерения

Для каждой формы образцов рассчитали не только общий фактор формы  $f$ , но и приведенный  $f_{\text{д}}$  (формула 18) факторы формы, т. е. отношение объема образца к площади поверхности, к которой прикладывают формующие усилия (табл. 3.9).

Таблица 3.9 – Рассчитанные факторы формы образцов

Форма образца	Средний (общий / приведенный) фактор формы, мм	Общий / приведенный фактор формы образцов, формованных:		
		пластическим формованием, мм	полусухим прессованием, мм	литьем в гипсовые формы, мм
Цилиндр	4,8 / 16,0	5,0 / 22,0	4,8 / 10,0	4,5 / 6,0
Пластины	2,9 / 7,0	3,0 / 9,0	2,7 / 4,0	3,0 / 4,1
Цилиндр с выемкой	2,2 / 5,8	2,1 / 7,2	2,1 / 3,6	2,5 / 3,1

Для изучения неоднородности образцов определяли неоднородность структуры их поверхности (распределения открытой пористости) методом локального капиллярного всасывания.

Известен капиллярный метод неразрушающего контроля, основанный на капиллярном проникновении внутрь дефекта индикаторной жидкости и предназначенный для выявления дефектов, имеющих выход на поверхность объекта контроля [311]. Данный метод пригоден для выявления трещин и пор с поперечными размерами 0,1-500 мкм, в том числе сквозных, на поверхности черных и цветных металлов, сплавов, керамики, стекла и т. п. Подобный метод фукси-

нового контроля широко распространен на фарфоро-фаянсовых производствах для выявления сушильных трещин. Для оценки капиллярного подсоса цементного камня применяют метод пропитки [312, 313].

Мы применяли специально разработанную методику, описанную в разделе 3.1. Скорость всасывания определяли в точках базовых и торцевых поверхностей каждого образца. Для цилиндра и пластинки были выбраны по две точки (центр и край) с верхней стороны и две точки с нижней стороны (центр и край), и одна с боковой. Для вогнутого цилиндра – по одной точке с каждой стороны: в центре вогнутости, с нижней стороны и на боковой поверхности (рис. 3.11).

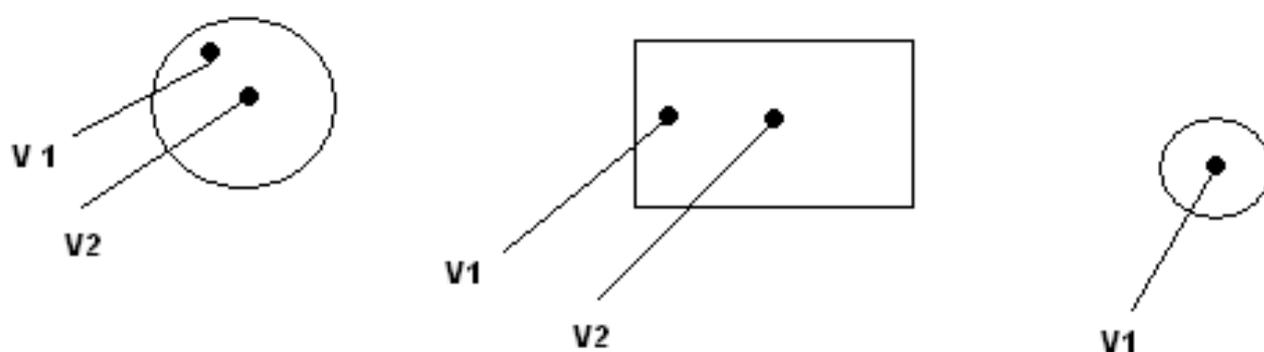


Рисунок 3.11 – Расположение точек контакта капилляров с образцом на верхней (нижней) стороне образцов

Проведенные измерения показали хорошее согласование между коэффициентом всасывания материала и его водопоглощением (рис. 3.12).

Полученные в экспериментах типичные кривые всасывания показаны на рисунке 3.13.

Для выбора характеристических температур обжига образцов, при которых наиболее заметно меняется их структура (интервал спекания), провели dilatометрический анализ. Анализ показал, что при температурах, превышающих 950 °С, как у фарфоровых, так и у фаянсовых образцов начинается и активно проходит процесс спекания. Наиболее интенсивно у фаянсовых образцов спекание протекает до температуры 1200 °С. Фарфоровые образцы спекали при этой же температуре для сохранения в них достаточной пористости. Образцы

каждой партии обожгли при температурах: 1000 °С, 1100 °С, 1200 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение одного часа.

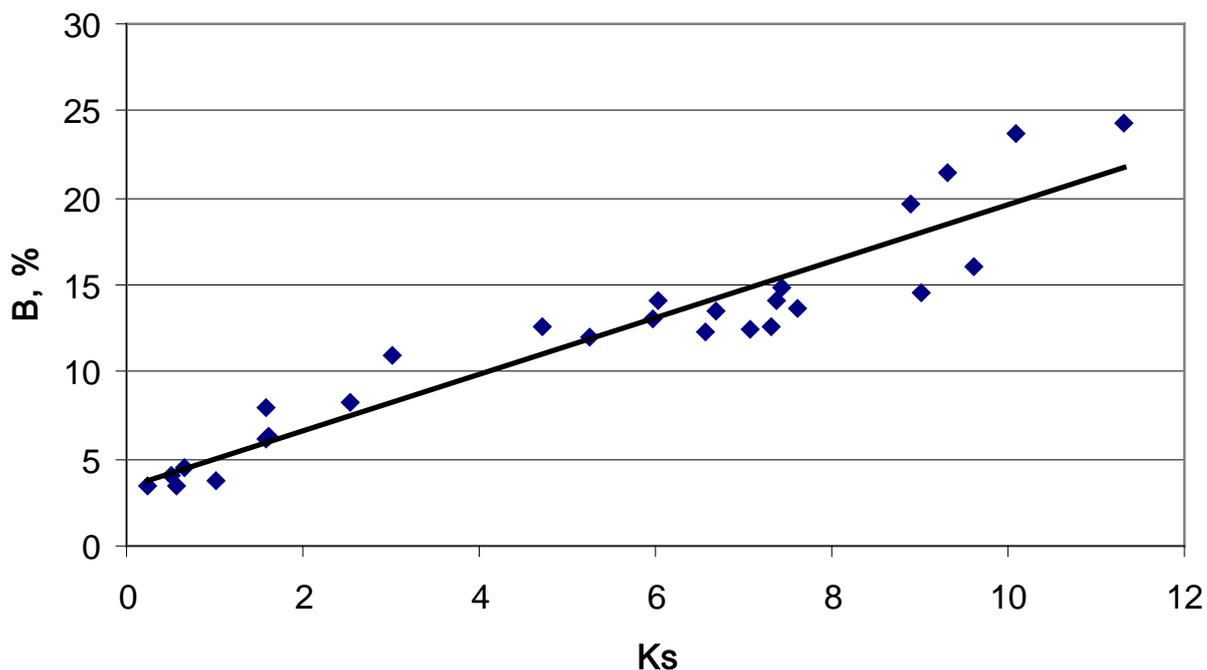


Рисунок 3.12 – Зависимость между водопоглощением материала  $V$  и его коэффициентом впитывания  $K_s$

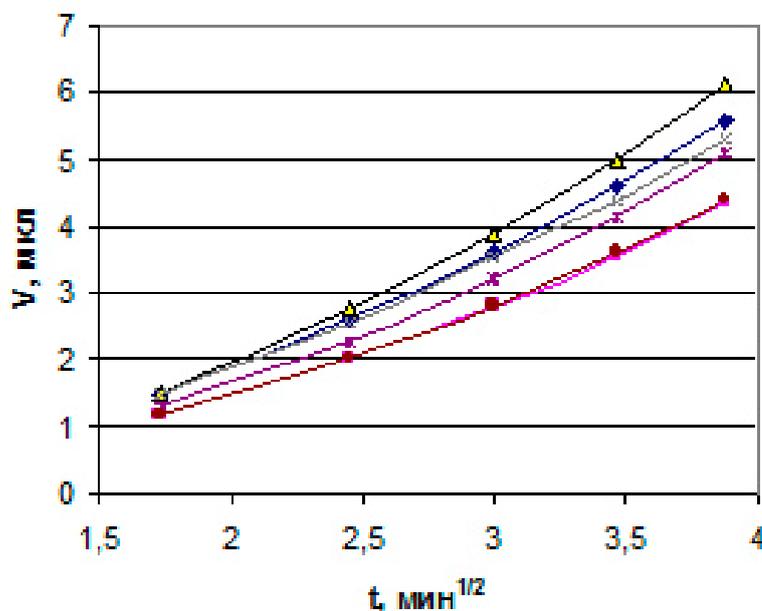


Рисунок 3.13 – Капиллярное впитывание верхней стороны (верхние кривые – край образца, нижние – центральная часть) цилиндров до обжига, изготовленных методом литья в гипсовые формы фаянсового шликера.  $V$  – объем впитанной жидкости, мкл;  $\tau$  – время впитывания

Образцы из фарфоровой и фаянсовой масс в виде пластин различной плотности получили прессованием при разных давлениях. Была установлена практически линейная зависимость между пористостью ( $\Pi$ ) полуфабриката и открытой пористостью ( $\Pi_0$ ) обожженных образцов и коэффициентом всасывания ( $K_s$ ) (рис. 3.14).

После обжига при температуре 1200 °С коэффициент всасывания фарфоровых образцов, несмотря на их меньшую открытую пористость, имел несколько большее значение, чем  $K_s$  фаянсовых образцов. Объяснить это можно наличием в фарфоровых образцах большого количества мелких пор, образовавшихся в результате обжига при температуре недостаточной для полного спекания (созревания) фарфора данного состава. Из-за усиленного эффекта капиллярного всасывания порами меньшего диаметра у фарфоровых образцов скорость всасывания жидкости единицей поверхности больше, чем у пор гораздо большего радиуса, но меньшего количества в фаянсовых образцах (рис. 3.15).

Для оценки степени неоднородности поверхности образцов был рассчитан коэффициент неоднородности, который определяли по отношению разницы коэффициентов всасывания к разнице расстояний между точками всасывания:

$$H = dK_s / dx, \quad (25)$$

где  $dK_s$  – разность коэффициентов всасывания жидкости между двумя соседними точками соответствующей стороны;  $dx$  – расстояние между этими точками.

За коэффициент неоднородности образца принимали максимальное значение, выбранное из всех рассчитанных коэффициентов для данного образца.

При сравнении однородности поверхности полуфабрикатов и обожженных образцов по открытой пористости (рис. 3.16) наиболее однородными оказались образцы в форме пластинки, для которых коэффициент неоднородности имеет минимальное значение. Наименьшей однородностью поверхности обладали образцы в форме цилиндров с выемкой, т. е. неоднородность поверхности образцов увеличивалась с усложнением формы изделия, уменьшением ее симметрии.

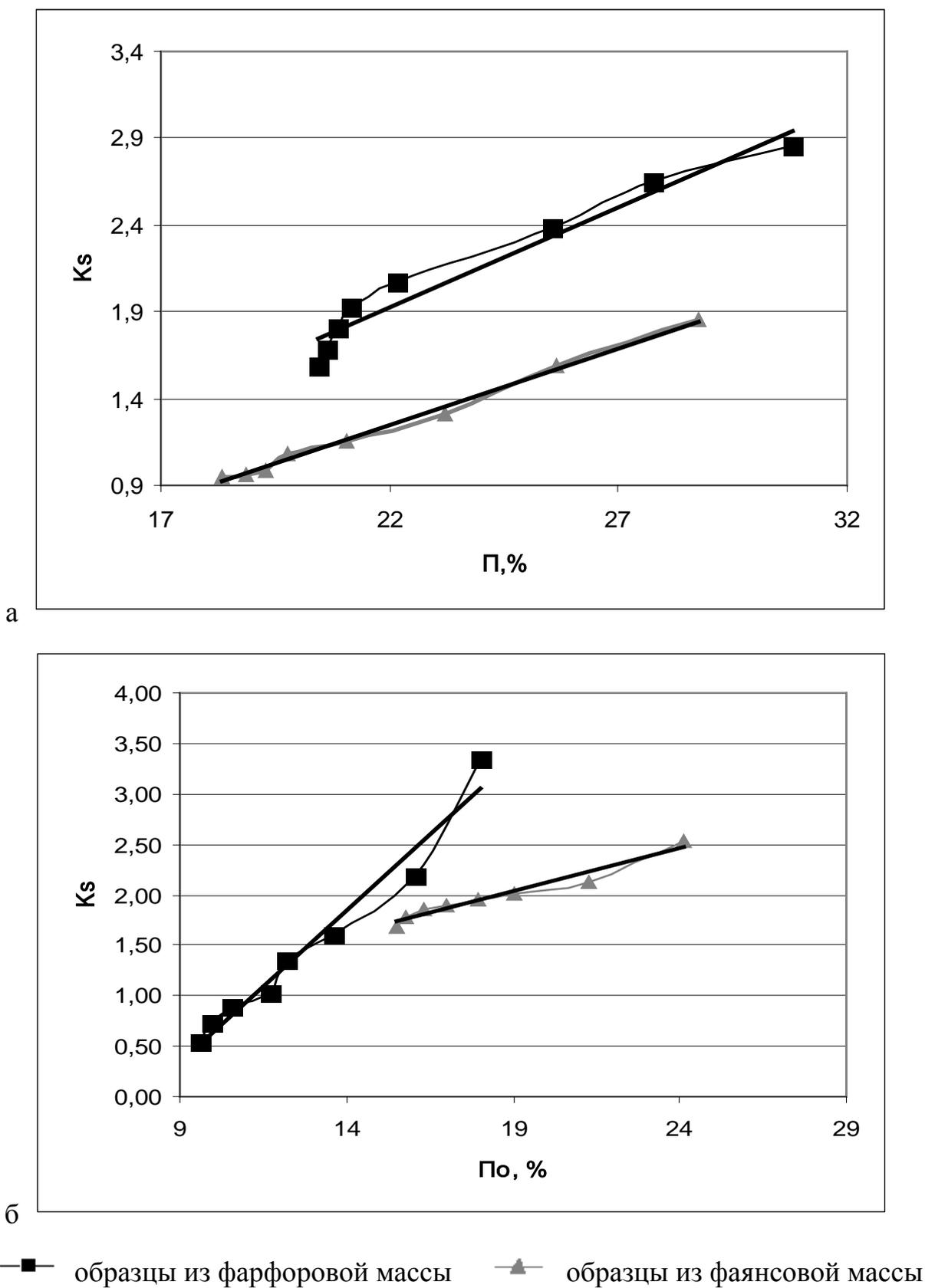


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента всасывания ( $K_s$ ) от общей ( $\Pi$ ) и открытой пористости ( $\Pi_o$ ) образцов из фарфоровой и фаянсовой массы до (а) после обжига при 1200 °С (б)

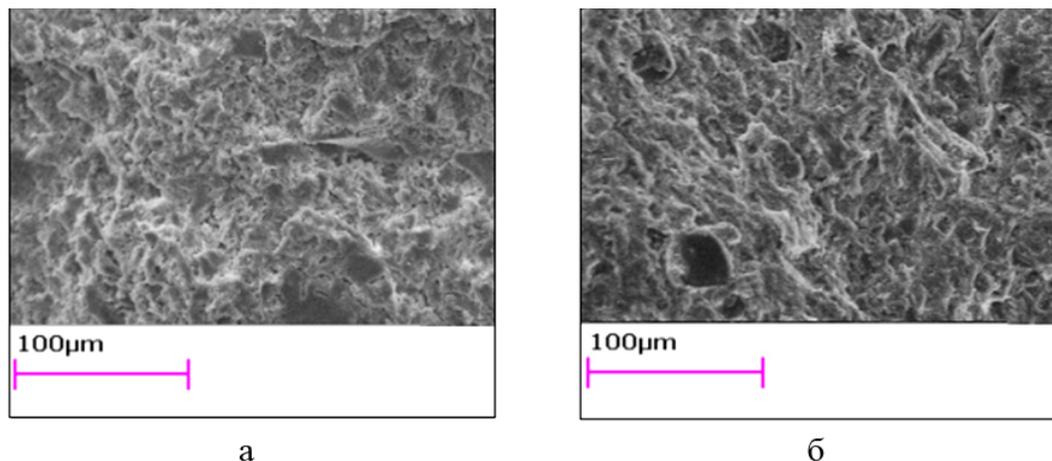


Рисунок 3.15 – Микроструктура фарфоровых (а) и фаянсовых образцов (б), обожженных при 1200 °С

При уменьшении фактора формы для образцов одной формы, но разного способа формования, степень неоднородности образцов, определенная по открытой пористости их поверхности, уменьшалась, что совпадает с результатами определения однородности образцов по меткам, описанным ранее. По уменьшению степени неоднородности поверхности образцов способы формования расположились в следующем порядке: пластическое формование (для образцов всех форм), полусухое прессование для образцов в форме пластинки и шликерное литье для образцов в форме цилиндра.

При рассмотрении влияния способа формования на степень неоднородности поверхности образцов различной формы, можно отметить, что наиболее однородную поверхность на торцах и образующей цилиндров можно получить, используя литье в гипсовые формы. Образцы, полученные полусухим прессованием, характеризовались большой неоднородностью поверхности, как на торцах, так и на образующей цилиндров (рис. 3.16, а). Определили также большую неоднородность базовой поверхности пластинок, изготовленных способом шликерного литья (рис. 3.16, б). Цилиндры с выемкой, формованные способом полусухого прессования, отличались наиболее неоднородной поверхностью, тогда как самый низкий коэффициент неоднородности был определен у образцов, полученных способом шликерного литья (рис. 3.16, в).

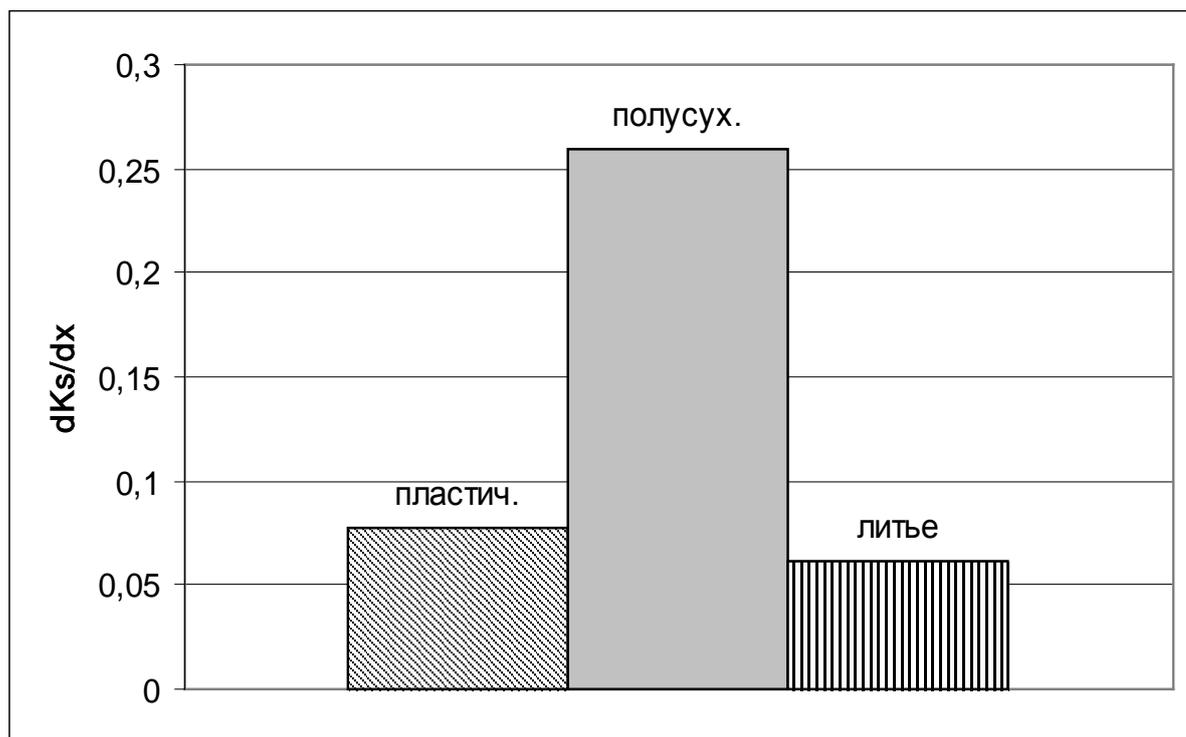
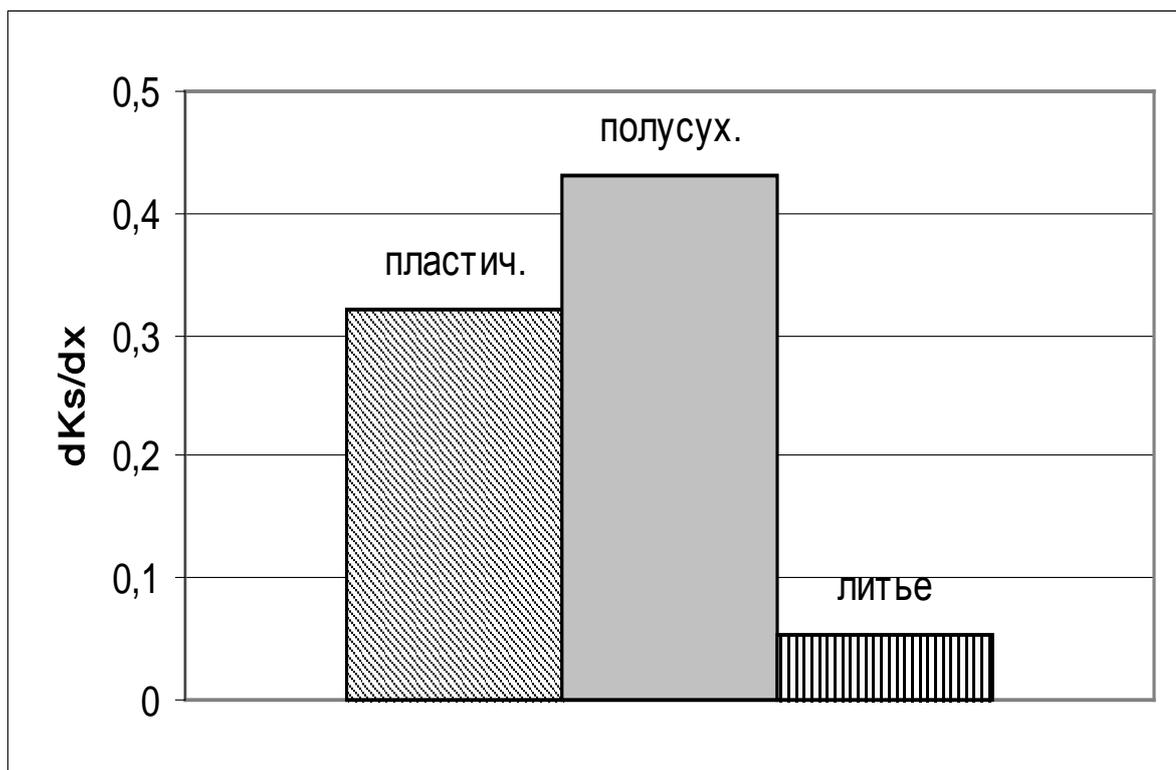


Рисунок 3.16, а – Коэффициент неоднородности поверхности для образцов из фарфора (вверху) и фаянса (внизу) в форме цилиндра, обожженных при 1000 °С

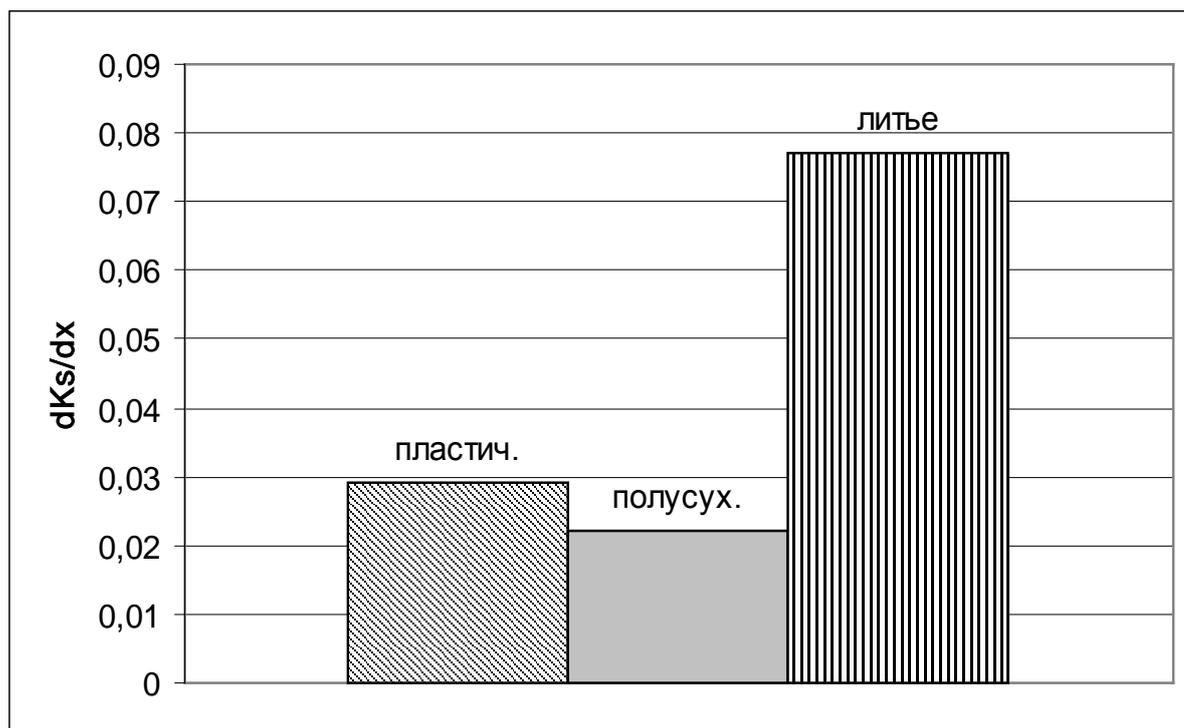
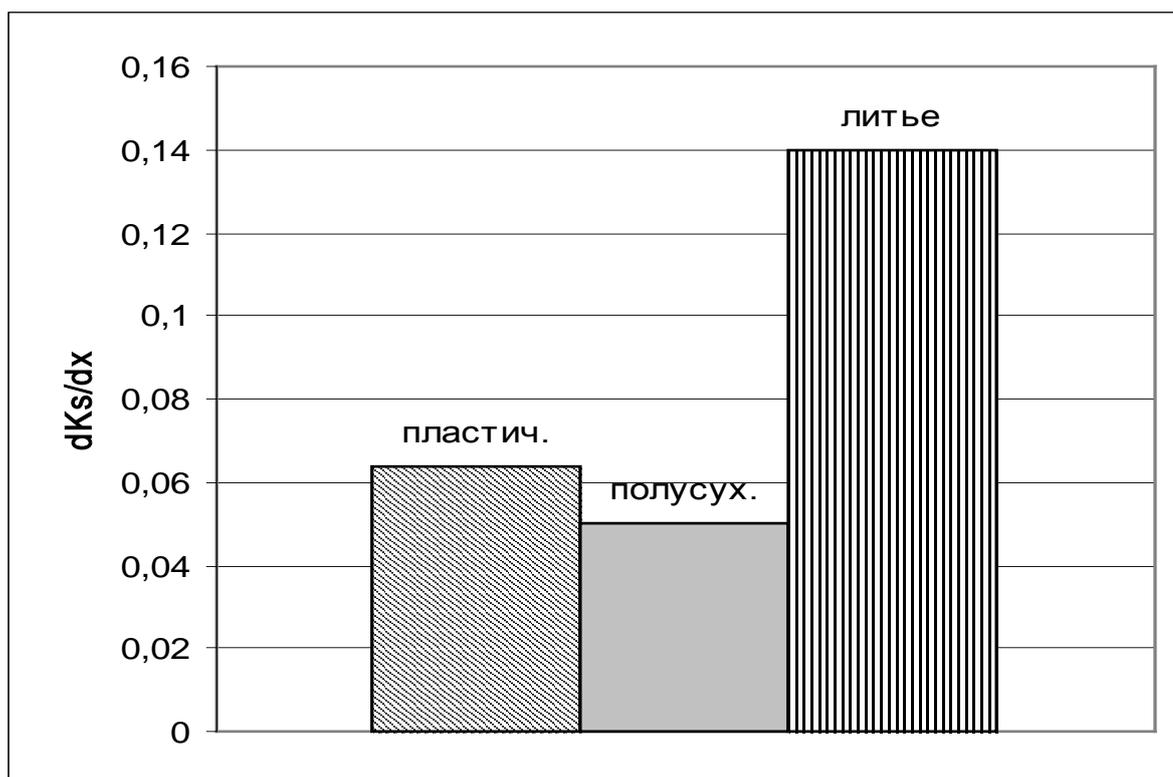


Рисунок 3.16, б – Коэффициент неоднородности поверхности для образцов из фарфора (вверху) и фаянса (внизу) в форме пластинки, обожженных при 1000 °С

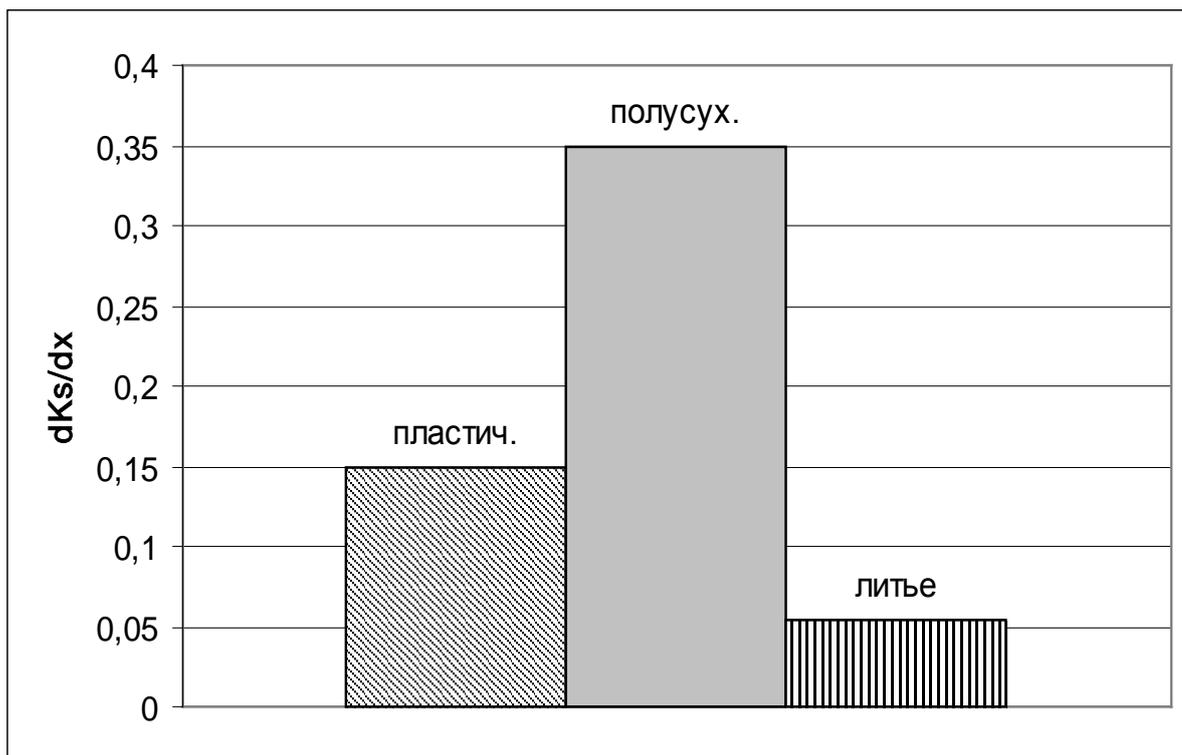
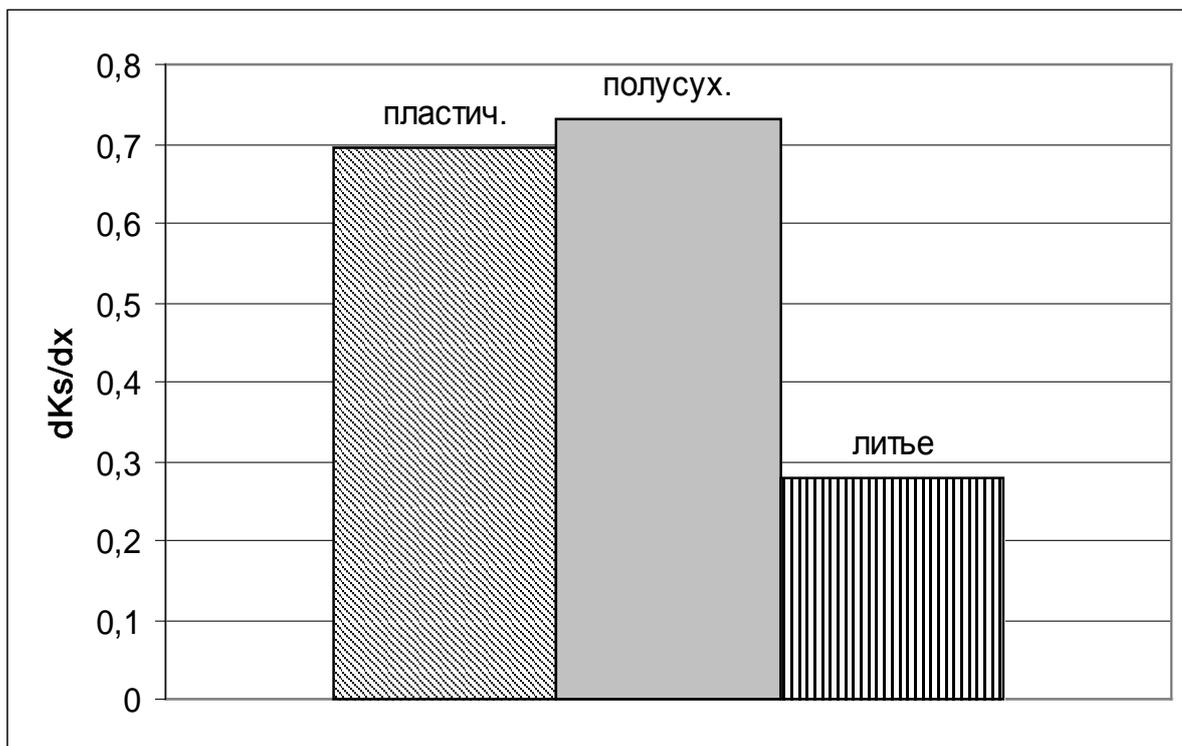


Рисунок 3.16, в – Коэффициент неоднородности поверхности для образцов из фарфора (вверху) и фаянса (внизу) в форме цилиндра с полукруглой выемкой, обожженных при 1000 °С

Образцы, изготовленные из фаянса, сырьевая шихта для производства которого содержит большее количество тонкодисперсной глинистой фракции по сравнению с образцами из фарфора, независимо от их формы, показали наиболее однородную открытую пористость (рис. 3.16). Самую неоднородную пористость поверхности, независимо от способа формования, имели образцы, изготовленные из смеси фарфоровой массы с наполнителем.

Результаты экспериментов показали, что однородность поверхности образцов до обжига выше, чем после обжига, независимо от формы и материала, а также способа формования образцов. Образцы полусухого и пластичного формования, обожженные при 1100 °С, имели резко увеличенные, по сравнению с сырцом, коэффициенты неоднородности поверхности. С повышением температуры обжига образцов степень поверхности неоднородности уменьшилась (рис. 3.17-3.21). Однако, для образцов, формованных способом литья в гипсовые формы и затем обожженных при различных температурах, коэффициент неоднородности поверхности изменялся незначительно.

При полусухом и пластичном формовании наблюдается плавное увеличение неоднородности, а при достижении температуры 1100 °С происходит резкое увеличение коэффициента неоднородности при полусухом прессовании. Затем неоднородность резко уменьшается и при 1200 °С коэффициент неоднородности достигает 0,6. При литье в гипсовые формы коэффициент неоднородности практически не изменяется.

Образцы, полученные методом литья в гипсовые формы, характеризуются наиболее однородной структурой, как до обжига, так и при обжиге на различные температуры.

С увеличением фактора формы, а также высоты образца, происходит увеличение степени неоднородности.

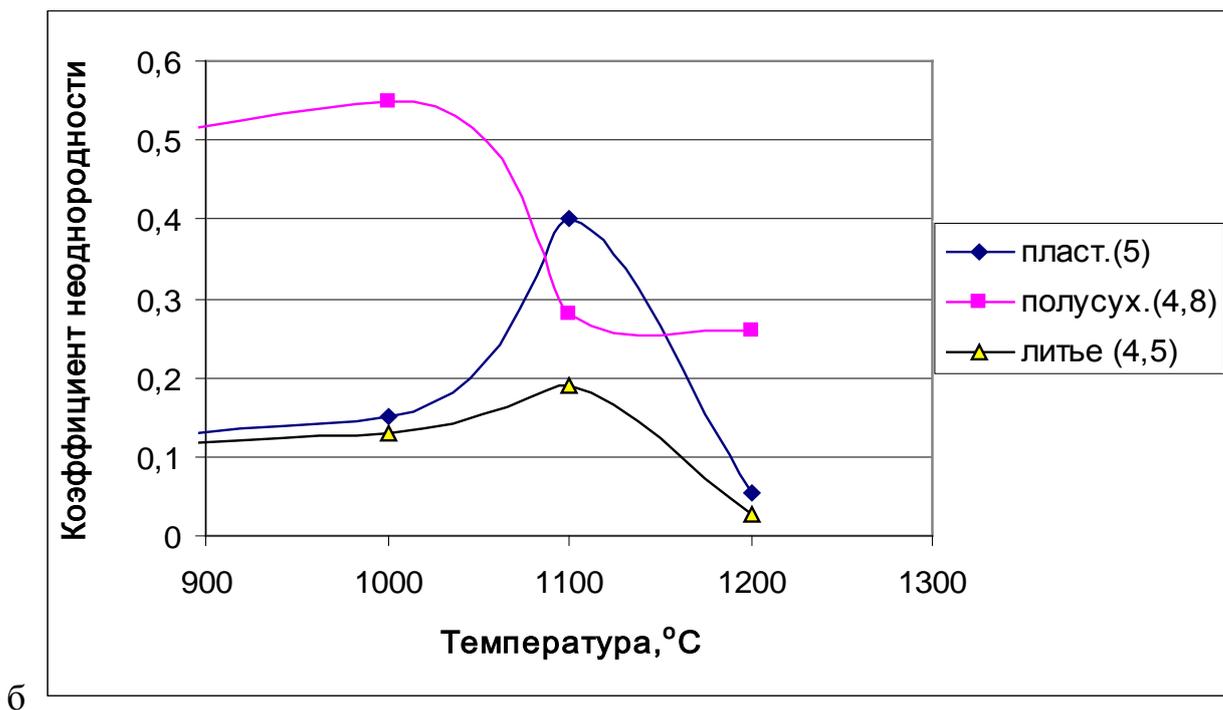
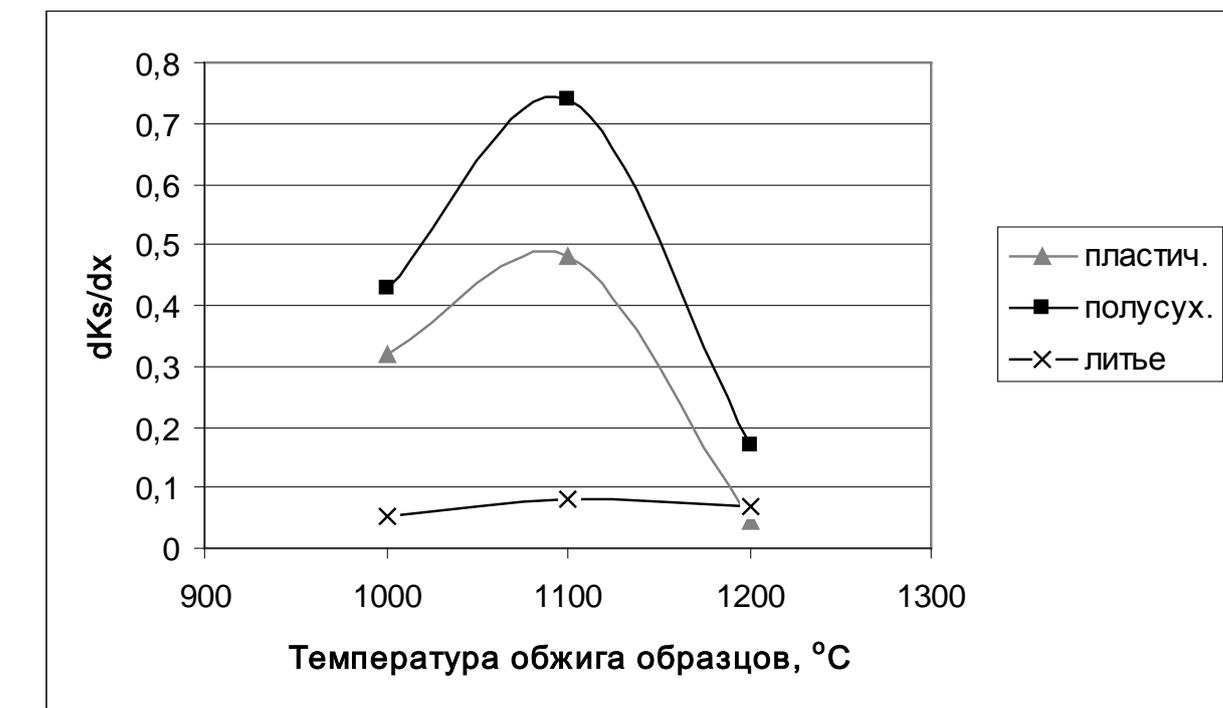


Рисунок 3.17 – Изменение коэффициента неоднородности поверхности по высоте (а) и по диаметру (б) для образцов из фарфора в форме цилиндра с увеличением температуры обжига. Указаны способы формования и фактор формы образцов

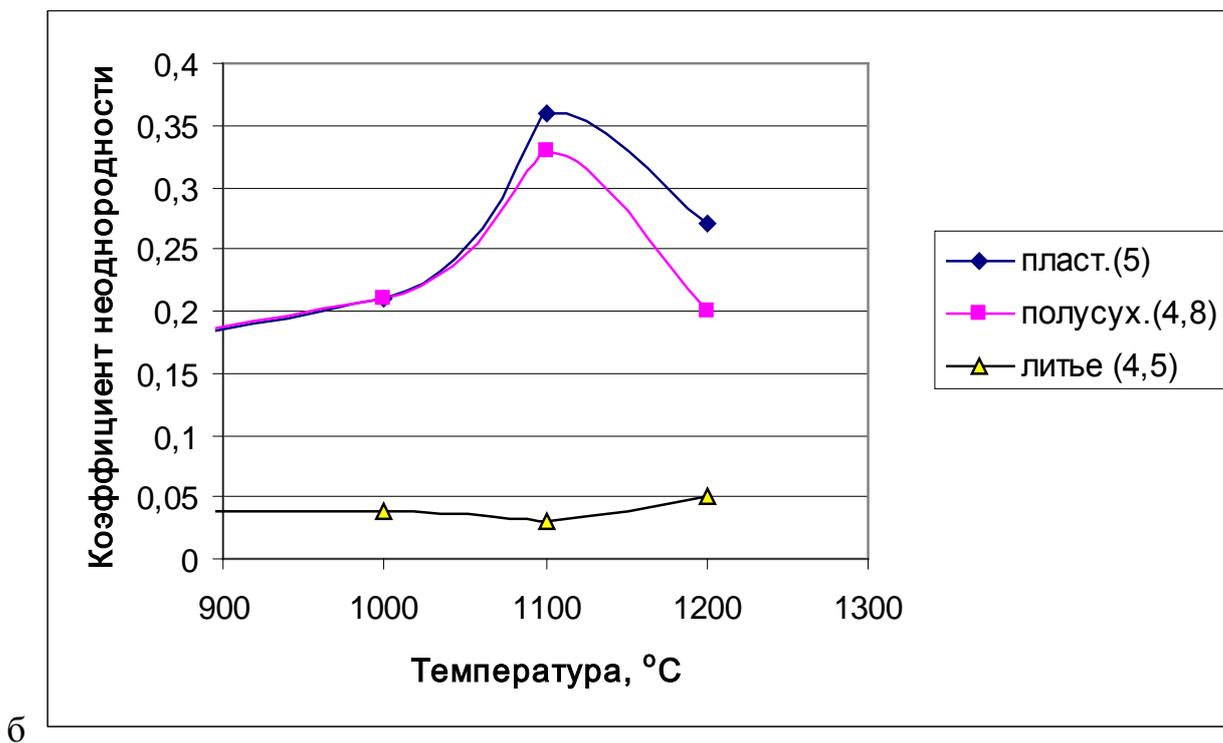
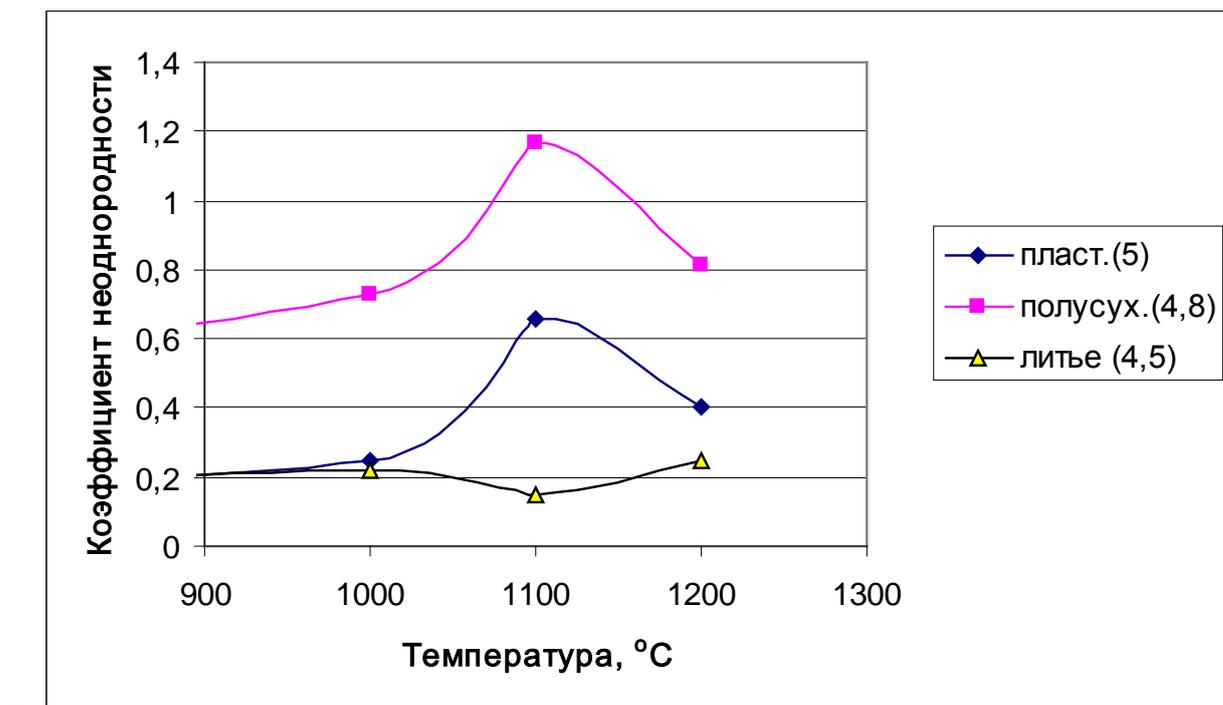
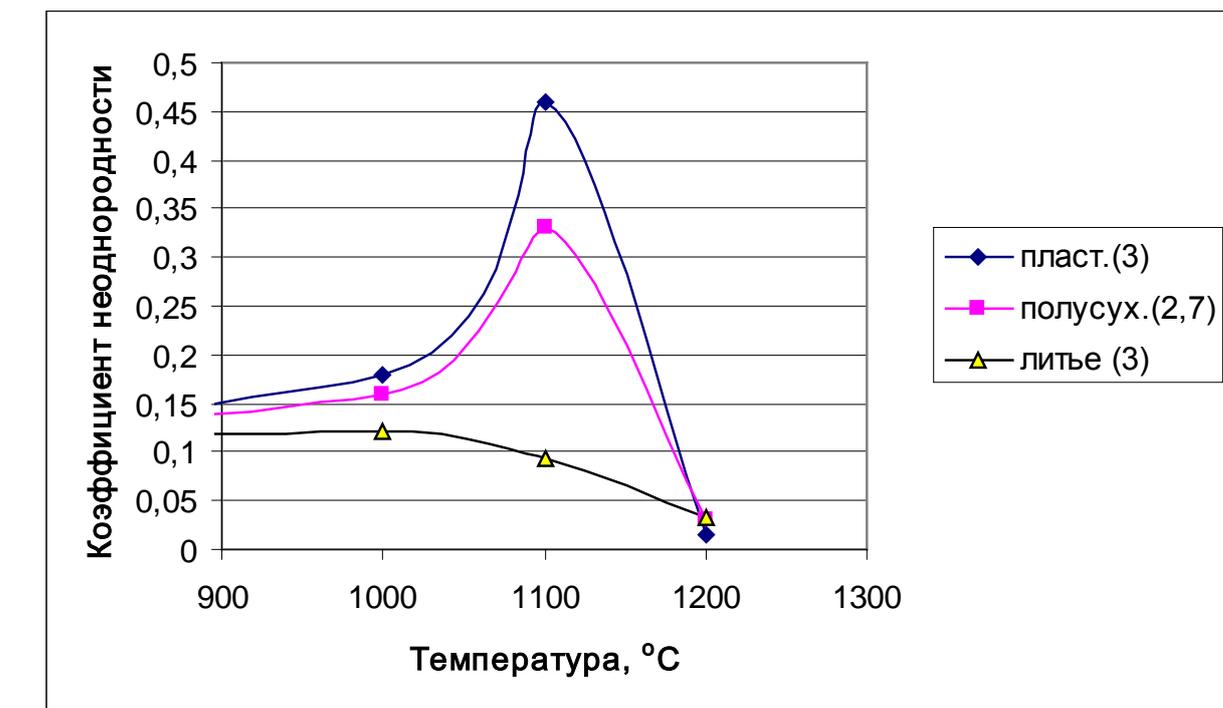
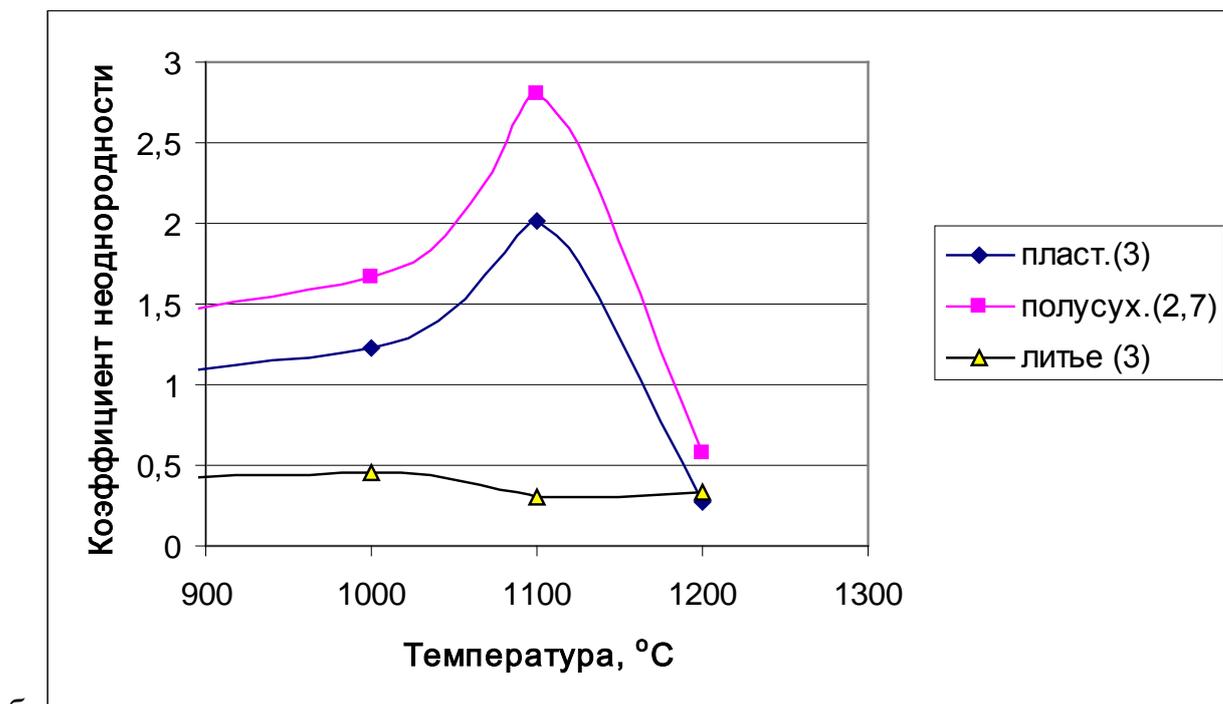


Рисунок 3.18 – Изменение коэффициента неоднородности поверхности по высоте (а) и по диаметру (б) для образцов из фаянса в форме цилиндра с увеличением температуры обжига. Указаны способы формования и фактор формы образцов



а



б

Рисунок 3.19 – Изменение коэффициента неоднородности поверхности по длине (а) и по высоте (б) для образцов из фарфора в форме пластинки с увеличением температуры обжига. Указаны способы формования и фактор формы образцов

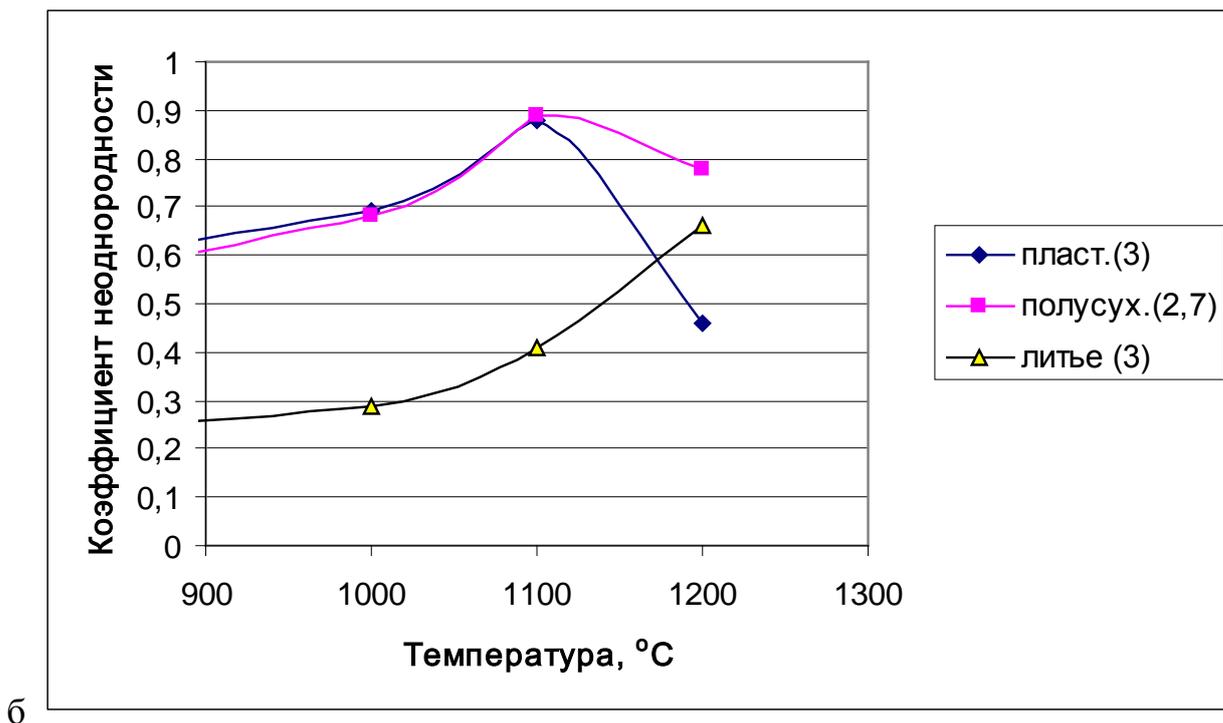
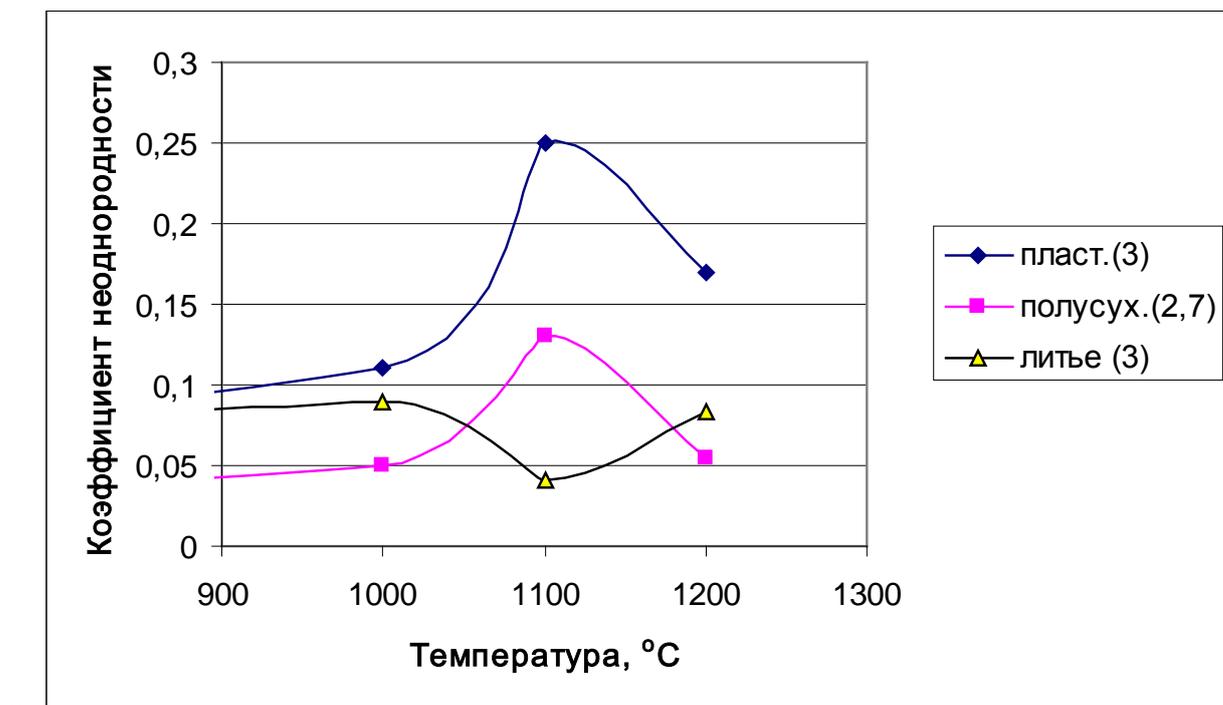


Рисунок 3.20 – Изменение коэффициента неоднородности поверхности по длине (а) и по высоте (б) для образцов из фаянса в форме пластинки с увеличением температуры обжига. Указаны способы формования и фактор формы образцов

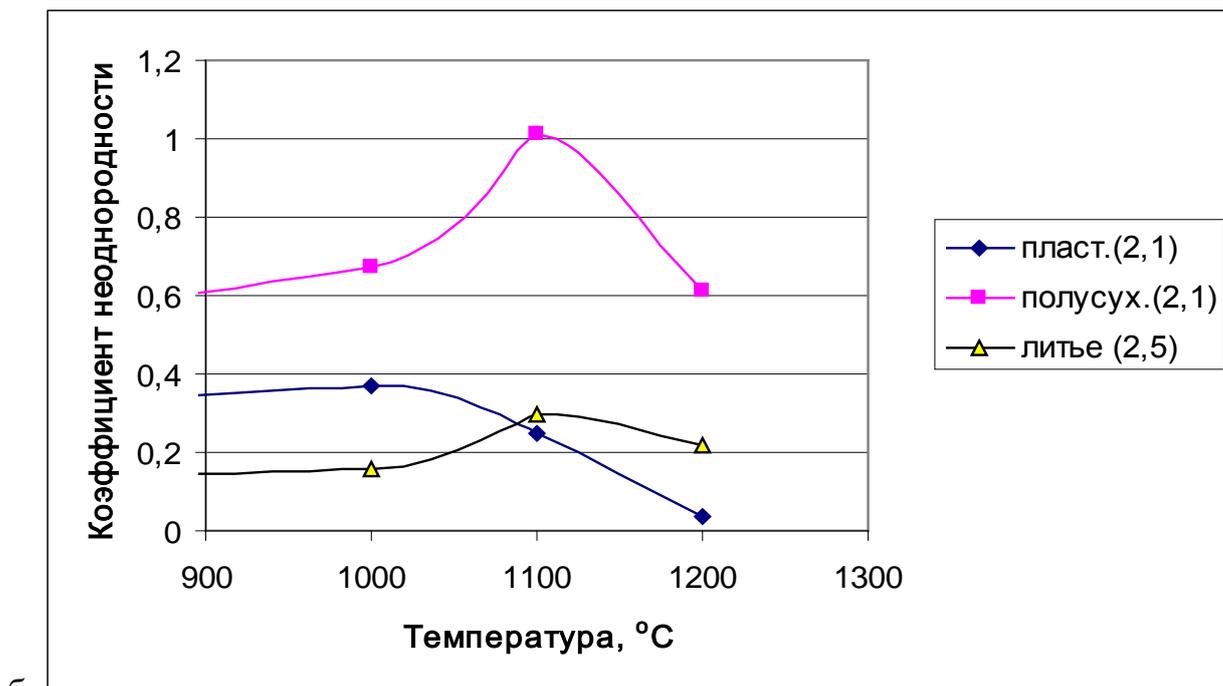
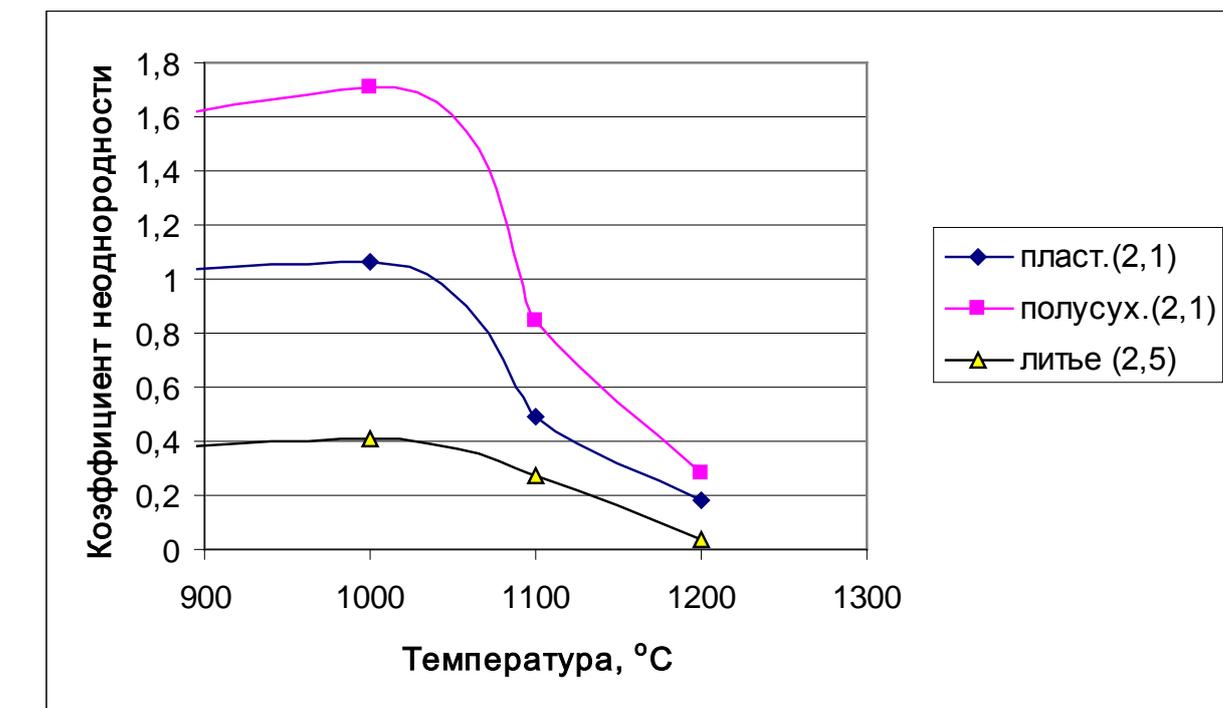


Рисунок 3.21 – Изменение коэффициента неоднородности поверхности по высоте образцов в форме цилиндра с выемкой, изготовленных из фарфора (а) и фаянса (б) с увеличением температуры обжига.

Указаны способы формования и фактор формы образцов

Для каждого метода формования и материала определили значения воздушной и огневой усадок. Для построения диаграмм взяли средние значения отношений изменения длины образца  $l$  или диаметра  $d$  к его высоте  $h$  (формула 26, 27). Таким образом, наибольшую анизотропию усадок характеризовало максимальное отклонение значения ординаты ( $\Delta d/\Delta h$  или  $\Delta l/\Delta h$ ) от 1. И, наоборот, приближение значения к 1 показывало более равномерную усадку по высоте и длине (диаметру) образца.

$$d / l = \sum(\Delta l/\Delta h) / n, \quad (26)$$

$$d / h = \sum(\Delta d/\Delta h) / n, \quad (27)$$

где  $l$ ,  $h$ ,  $d$  – длина, высота и диаметр образцов,  $\Delta l$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta d$  – их усадки, рассчитанные по выражению.

$$\Delta l = (l_n - l_k) / l_n, \quad (28)$$

где  $l_n$  – начальная длина образца,  $l_k$  – конечная длина образца.

Для высоты  $h$  и диаметра  $d$  усадки рассчитывали аналогично.

Результаты измерений приведены на рис. 3.22, рис. 3.23 и рис. 3.24.

Исследования привели к следующим выводам: изотропию усадки для изделий в виде цилиндров обеспечивает шликерное литье (фарфор и фаянс), пластическое формование (фаянс), для пластин – пластическое формование (фарфор), шликерное литье (фаянс), для цилиндра с выемкой – пластическое формование и шликерное литье (фаянс). Таким образом, подтвердилось решающее значение способа формования, оказываемое на однородность образцов разной формы, выражаемую в изотропной усадке. Также необходимо отметить, что несмотря на преобладание в составе анизотропных глинистых частиц в массах для производства фаянса, образцы из них обладали более равномерной усадкой.

Полученные ранее результаты по однородности материала, достигаемой при формовании, проверяли на образцах, формованных способами прессования, пластического формования и шликерного литья в виде пластин размерами 70x70x7 мм и втулок внешним диаметром 35 мм, внутренним диаметром 20 мм и высотой 35 мм из масс для получения фарфоровых и полуфарфоровых изделий.

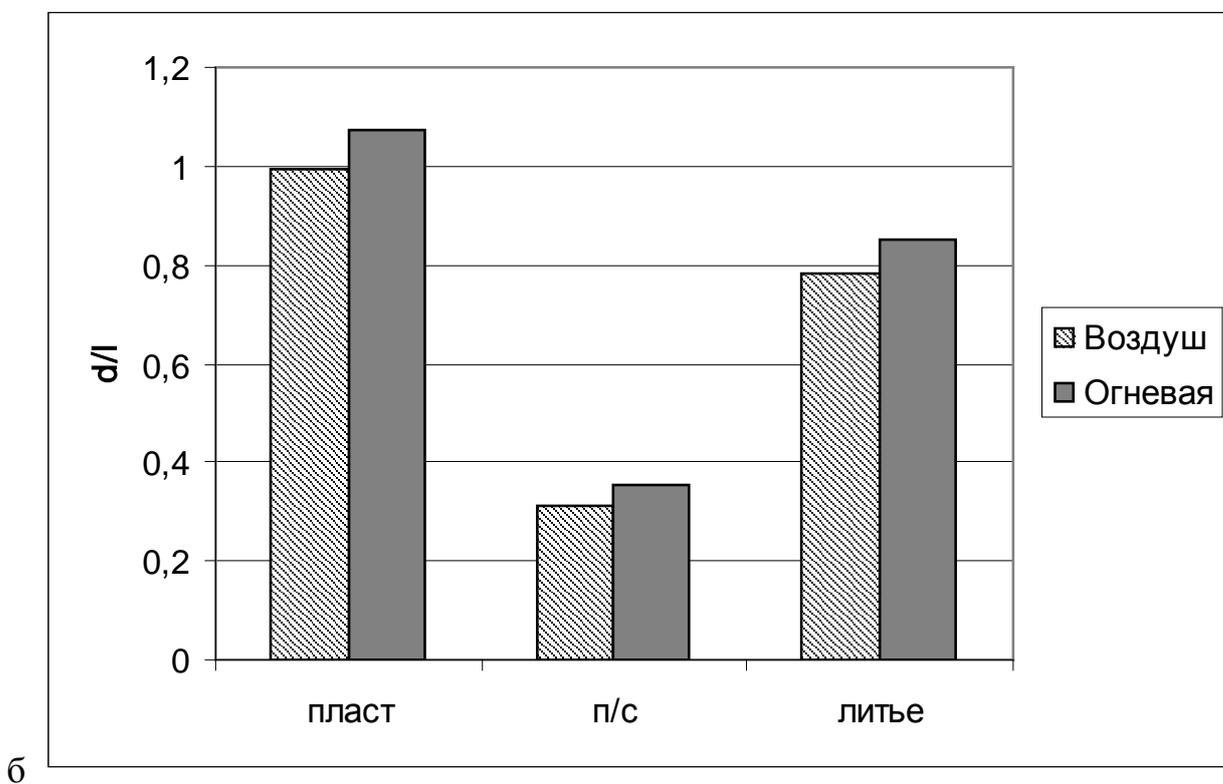
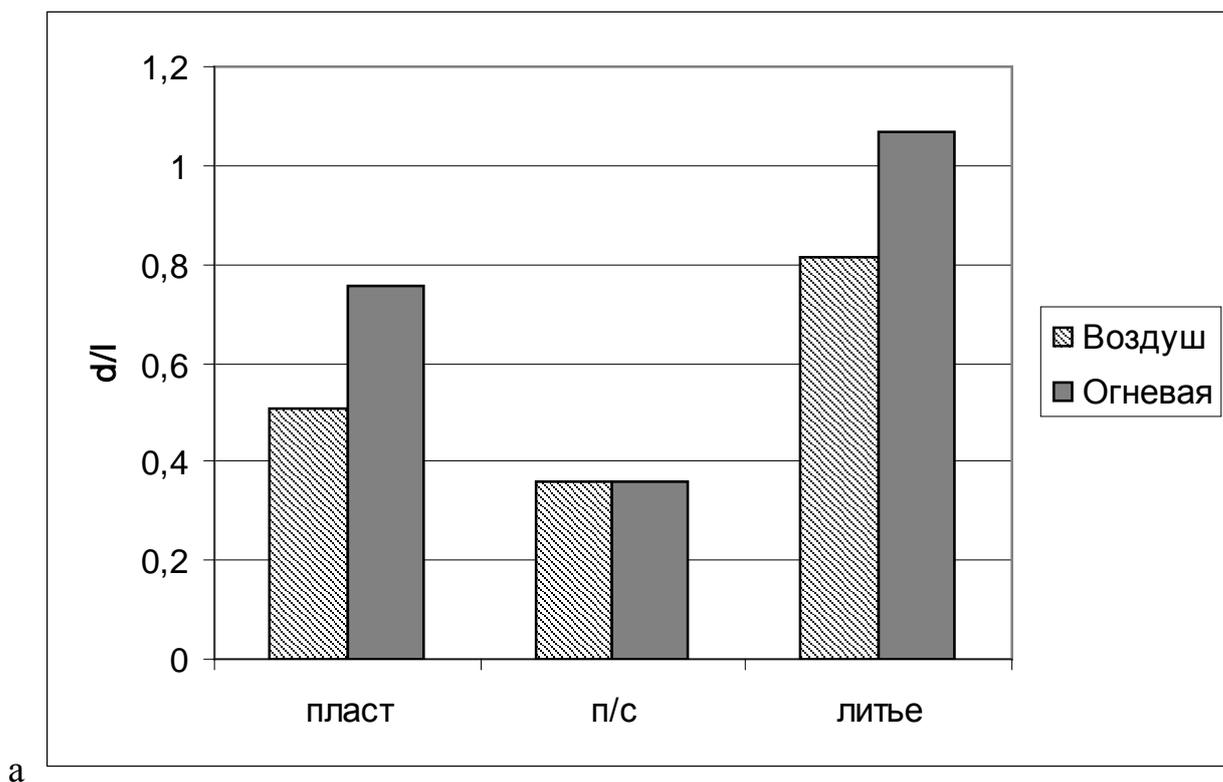


Рисунок 3.22 – Анизотропия усадок (воздушной и огневой) образцов в виде цилиндра из фарфора (а) и фаянса (б), формованных способами пластического формования (пласт), полусухого прессования (п/с), шликерного литья (литье)

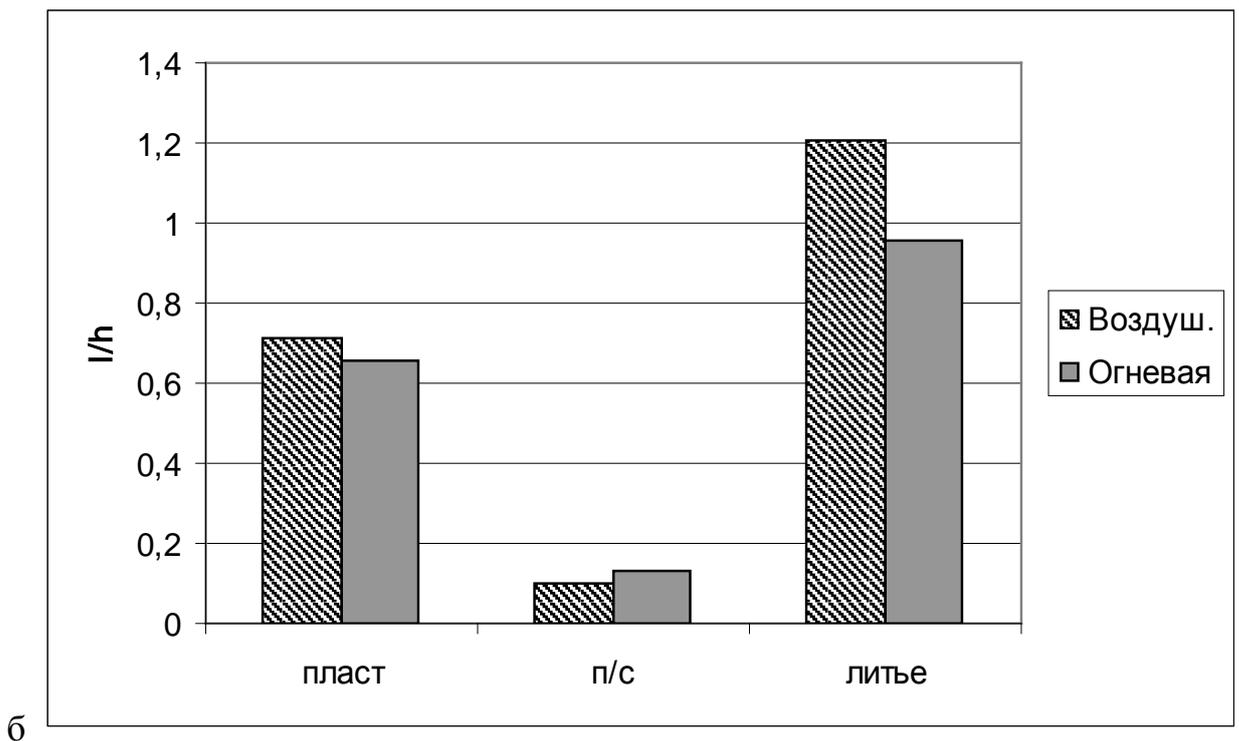
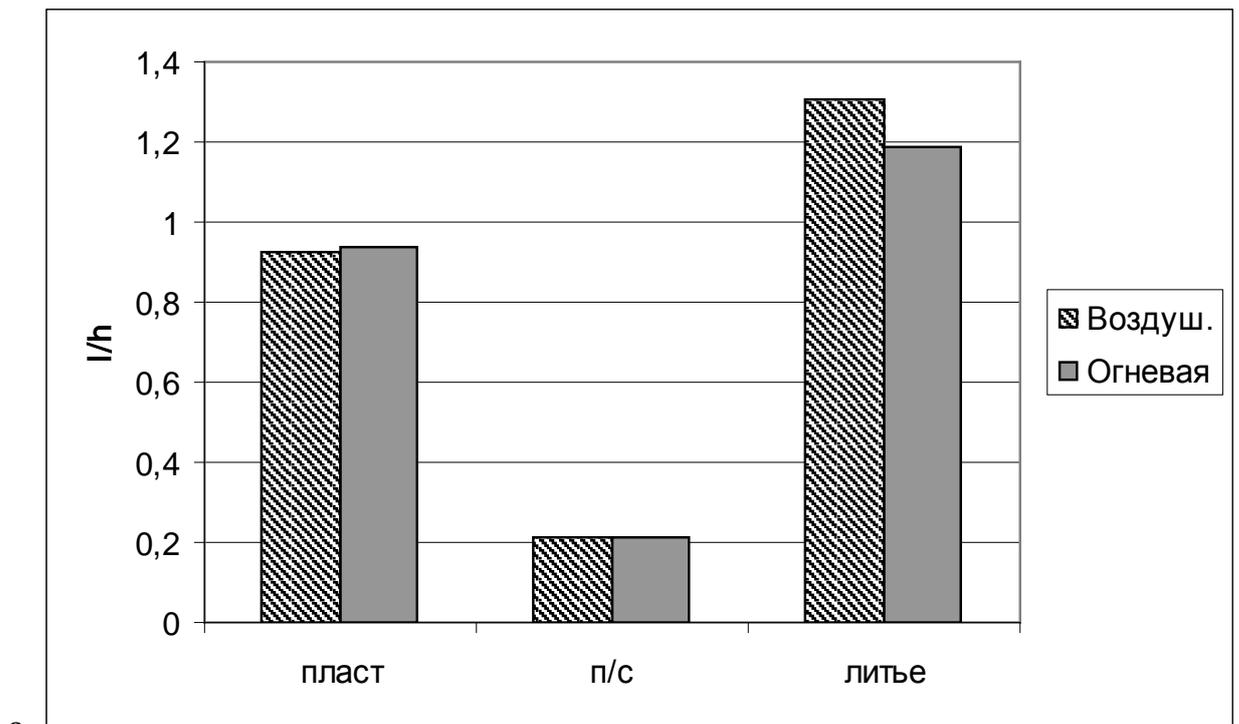


Рисунок 3.23 – Анизотропия усадок образцов в виде пластинок из фарфора (а) и фаянса (б). См. примечания к рис. 3.22

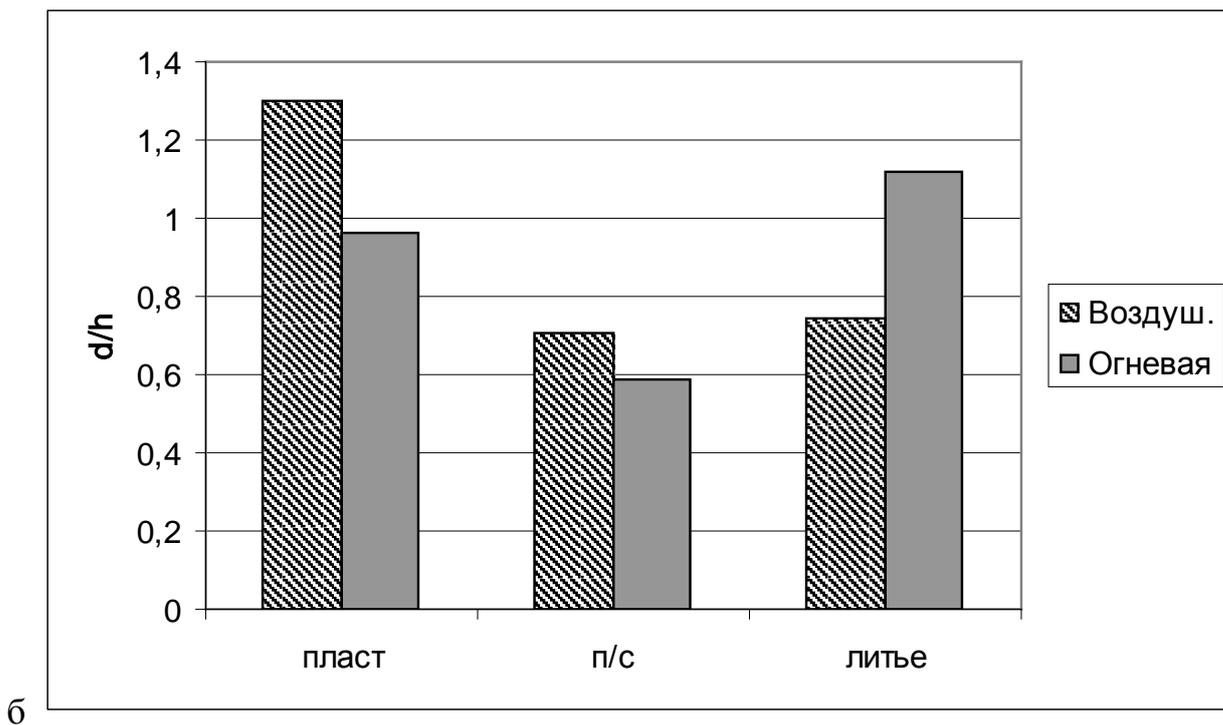
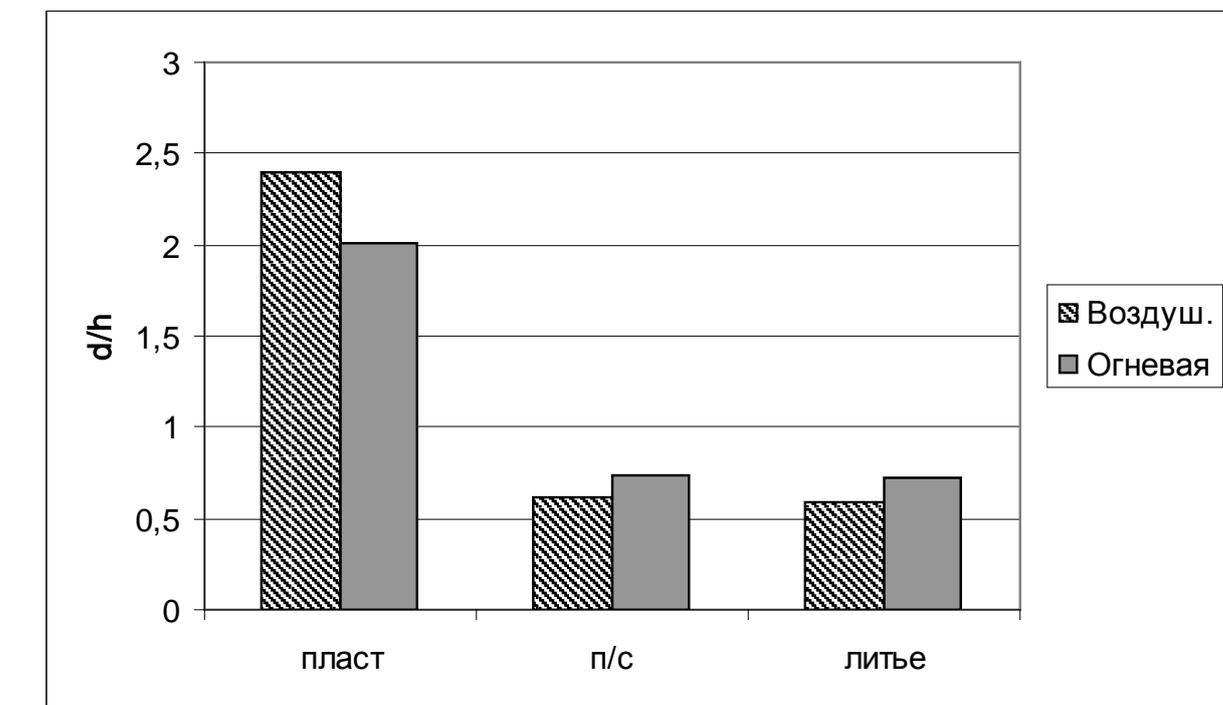


Рисунок 3.24 – Анизотропия усадок образцов в виде цилиндра с выемкой из фарфора (а) и фаянса (б). См. примечания к рис. 3.22

Прессование проводили из гранулированного порошка влажностью 7 % под давлением 20 МПа. Пластическое формование – вырезанием из пластов, выполненных способом набивки в гипсовые формы из масс влажностью 18 %. Сливное шликерное литье осуществляли в гипсовые формы из шликеров с добавками электролитов (жидкое стекло и сода).

Формованные полуфабрикаты сушили при 100 °С до постоянной влажности, после чего определяли равномерность распределения открытой пористости по поверхности образцов. Измерение проводили одновременно 3 капиллярами, подведенными к поверхности образца. Точками измерения были базовые и боковые поверхности.

После определения коэффициента всасывания в трех точках образца и расчета коэффициент неоднородности по формуле 25, рассчитывали относительный коэффициент неоднородности распределения открытой пористости, представляющий собой отношение коэффициент неоднородности к среднему коэффициенту всасывания для всего образца.

Результаты расчета коэффициентов неоднородности открытой пористости показали следующее (табл. 3.10 и табл. 3.11).

Таблица 3.10 – Относительная неоднородность распределения открытой пористости на поверхности пластинок, формованных различными способами

Материал	Исследуемая поверхность	Неоднородность распределения открытой пористости (отн. ед.) по поверхности образца, формованного		
		прессованием	пластическим формованием	шликерным литьем
Фарфор	Базовая	0,05	0,05	0,07
	Боковая	0,37	0,3	0,12
Полуфарфор	Базовая	0,06	0,19	0,04
	Боковая	0,01	0,04	0,01

Определили, что, как и в проведенных ранее экспериментах, материал, а именно содержание пластичных компонентов массы, оказывает решающее воздействие на неоднородность распределения открытой пористости. Наиболее однородной открытой пористостью характеризуются образцы, изготовленные

из полуфарфора, независимо от их формы. Более неоднородной структурой обладают фарфоровые образцы. Пластичные глинистые компоненты массы способствуют быстрому перераспределению частиц под действием формирующих нагрузок, что особенно проявляется в уменьшении неоднородности в направлении формования.

Таблица 3.11 – Относительная неоднородность распределения открытой пористости на поверхности втулок, формованных различными способами

Материал	Исследуемая поверхность	Неоднородность распределения открытой пористости (отн. ед.) по поверхности образца, формованного		
		прессованием	пластическим формованием	шликерным литьем
Фарфор	Базовая	0,08	0,09	0,05
	Боковая	0,22	0,06	0,11
Полуфарфор	Базовая	0,09	0,05	0,07
	Боковая	0,04	0,04	0,03

Форма образцов характеризовалась различной конфигурацией при примерно одном общем факторе формы: для пластины – 2,5 мм, для втулки – 3 мм. Однако, если учитывать лишь площадь поверхности, участвующей в формовании, значения факторов формы (приведенных факторов формы) увеличиваются для образцов, формируемых способами прессования и пластического формования. Кроме того, образцы различаются по симметрии: если для пластин она плоскостного типа преобладает плоскостная симметрия  $mmm$ , то для втулок – симметрия покоящегося цилиндра  $\infty/mm$ . В целом однородность поверхности втулок, особенно из массы для производства фарфора, превышала однородность поверхности пластин.

При исследовании боковых поверхностей образцов, формованных способом прессования, расположенных в направлении формования, выявлено противоречие зависимостям неравноплотности материала от высоты прессовок и их гидравлического радиуса. Согласно [204. С. 76] неравноплотность полуфабриката уменьшается с увеличением гидравлического радиуса и уменьшением высоты. Гидравлический радиус, равный отношению удвоенной площади сечения

полуфабриката к его периметру, для образцов в форме плиток составил 35 мм, для образцов в виде втулок – 8 мм. Для фарфоровых полуфабрикатов в форме втулок неоднородность открытой пористости в направлении прессования (по высоте) оказалась немного ниже, чем у образцов в форме плиток, несмотря на меньший гидравлический радиус и значительно большую высоту втулок (35 мм против 7 мм). Причиной этого явления может быть большая концентрация микротрещин на боковых поверхностях прессованных плиток, мало сказывающаяся на однородности материала в объеме образца. Для полуфарфоровых прессовок отличия в показателе неоднородности боковых поверхностей выявлено не было.

Базовая поверхность формуемых полуфабрикатов также была неоднородной для образцов, формованных способом набивки для полуфарфорового полуфабриката, и формованных шликерным литьем – для фарфорового.

Наиболее однородную структуру поверхности по образующей и высоте втулок можно получить, используя литье в гипсовые формы. Полусухое прессование характеризуется большой неоднородностью открытой пористости, как в вертикальном направлении, так и по образующей втулок.

Напротив, наблюдается достаточно высокие значения относительного коэффициента неоднородности открытой пористости боковой поверхности пластинок, полученных полусухим прессованием и базовой поверхности пластинок, изготовленных методом шликерного литья.

Различие в открытой пористости различных поверхностей может быть причиной дефектов при глазуровании. Исследование поверхности образцов после предварительного (утельного) обжига полуфабрикатов при максимальной температуре 900 °С показало, что между неоднородностью распределения открытой пористости полуфабрикатов и аналогичной характеристикой образцов обожженных при 900 °С изделий наблюдается прямая связь: чем больше неоднородность сырца, тем больше неоднородность обожженных изделий.

Третью партию образцов из фарфора и полуфарфора формовали в виде пластин, колец и втулок сложной формы - образцов, приготовленных для опре-

деления высокотемпературной вязкости способом кручения (см. раздел 3.1). Форма образцов показана на рисунке 3.25.

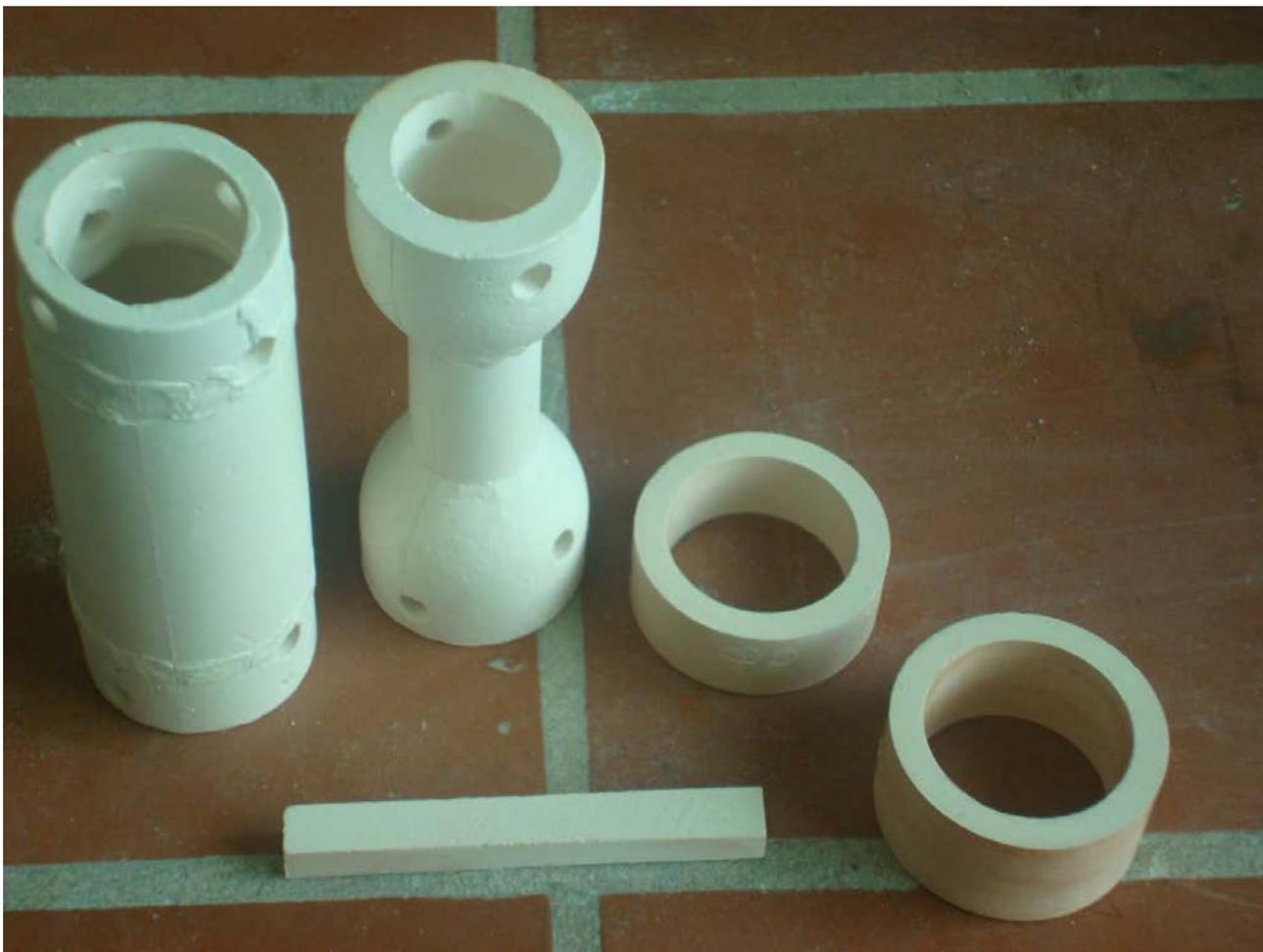


Рисунок 3.25 – Формы исследуемых образцов 3 партии.

На фотографии показан образец в виде балочки, вырезанный из пластины

Для исследования структуры были взяты по 3 полуфабриката для каждого метода формования и каждой формы образца. Образцы каждой партии обожгли при температурах: 900 °С, 1300 °С с выдержкой при каждой температуре в течение 1 часа.

Капиллярное всасывание исследовали для точек, расположенных с двух сторон образца. Для кольца и пластинки были выбраны по три точки (центр, край и край). И для образцов кручения и сжатия, по три точки с каждой стороны: в центре вогнутости, с нижней стороны и с верхней стороны (рис. 3.26).

По данным капиллярного всасывания по формуле (25) рассчитали коэффициент неоднородности.

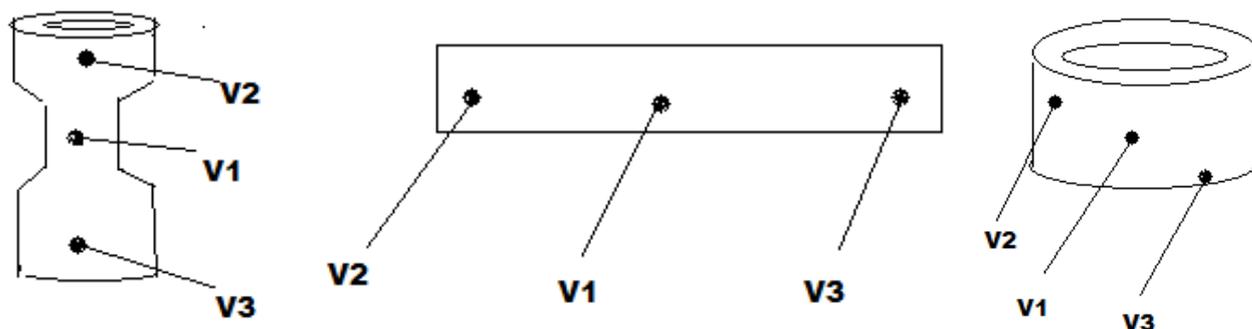


Рисунок 3.26 – Расположение точек контакта капилляров с образцом на верхней (нижней) стороне и в середине

На рис. 3.27 и рис. 3.28 показаны зависимости коэффициента неоднородности полуфарфоровых и фарфоровых полуфабрикатов в форме колец и пластин от температуры обжига. В целом полученные в результате этих экспериментов данные подтверждают данные, представленные выше. Различие касается использования другого материала (полуфарфор), образцов другой формы (кольца и втулки) и повышенной температуры обжига (1300 °С)

Для образцов в виде кольца, полученных способом шликерного литья расхождение между измерениями, проведенными для двух сторон образцов самое минимальное, следовательно, способ формования обеспечивает наибольшую однородность поверхности образцов. Несколько меньшей однородностью поверхности обладают образцы, полученные пластическим формованием. Самые большие расхождения в значениях измерений однородности поверхности определили у образцов, изготовленных полусухим прессованием.

Для образцов в виде пластин – наибольшая степень неоднородности поверхности определили по высоте пластин, полученных методом полусухого и пластического формования.

Образцы в виде втулок, полученных шликерным литьём, проходили испытания методом кручения при 1300 °С (см. раздел 3.4) и показали большую неоднородность поверхности по высоте образцов. Очевидно, развиваемые в процессе испытаний сдвиговые напряжения приводили к образованию микро-трещиноватой структуры.

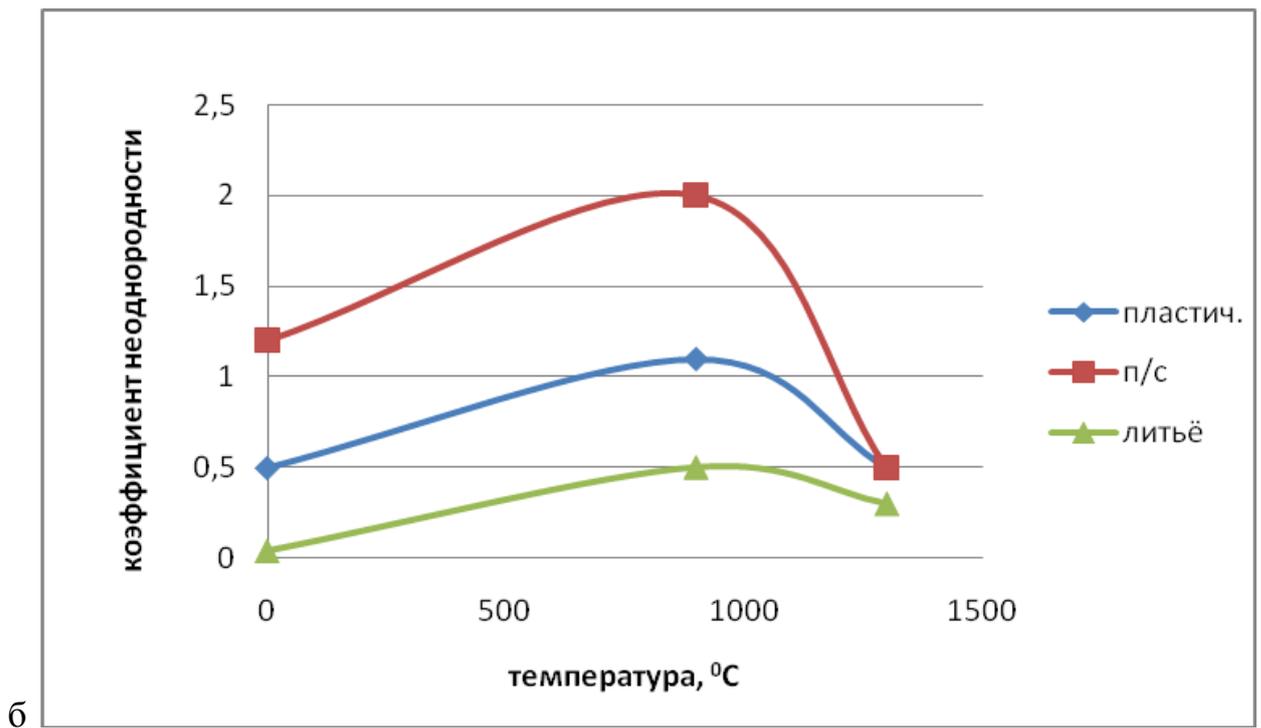
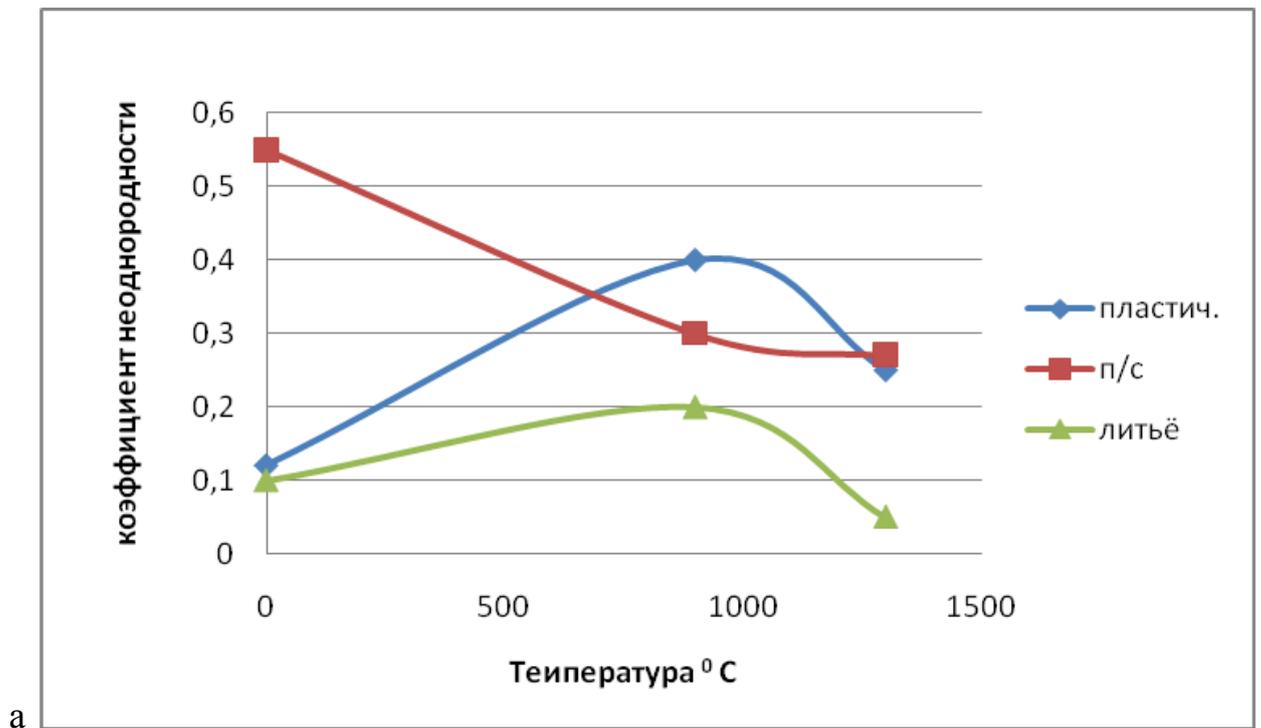


Рисунок 3.27, а, б – Коэффициенты неоднородности поверхности полуфабрикатов в виде колец фарфора по диаметру (а) и высоте (б) в зависимости от температуры обжига

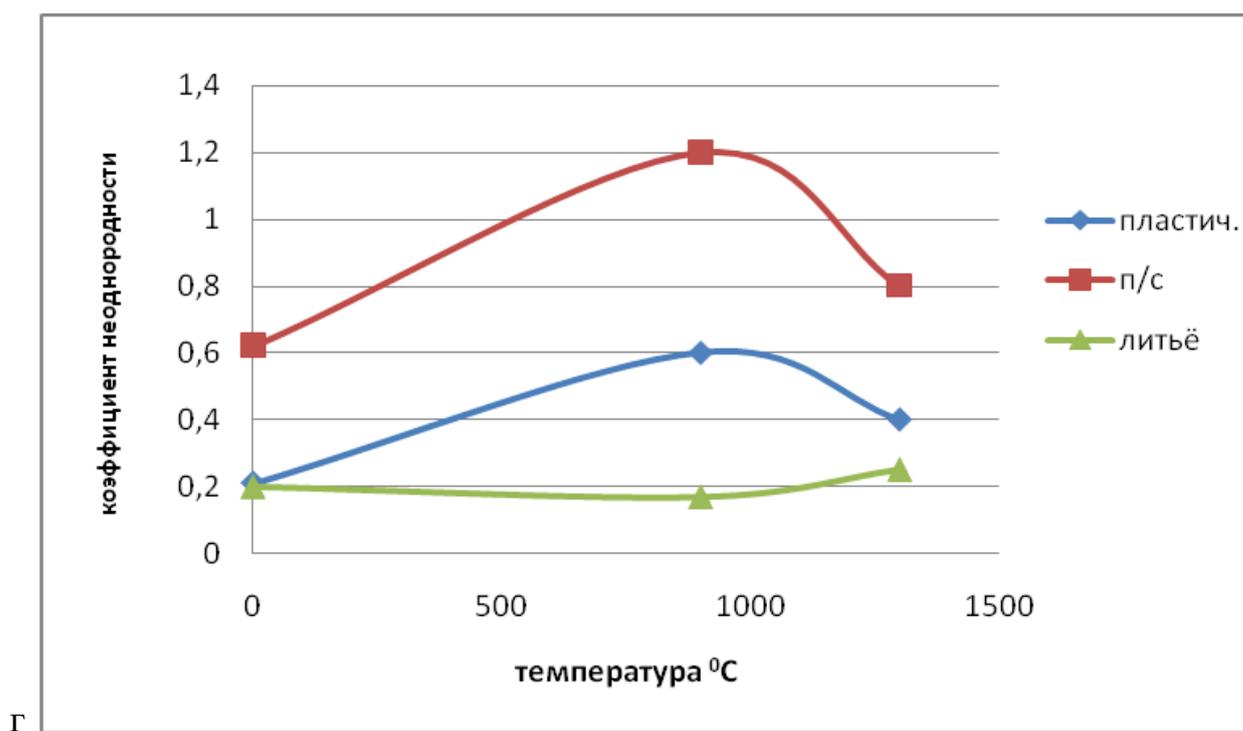
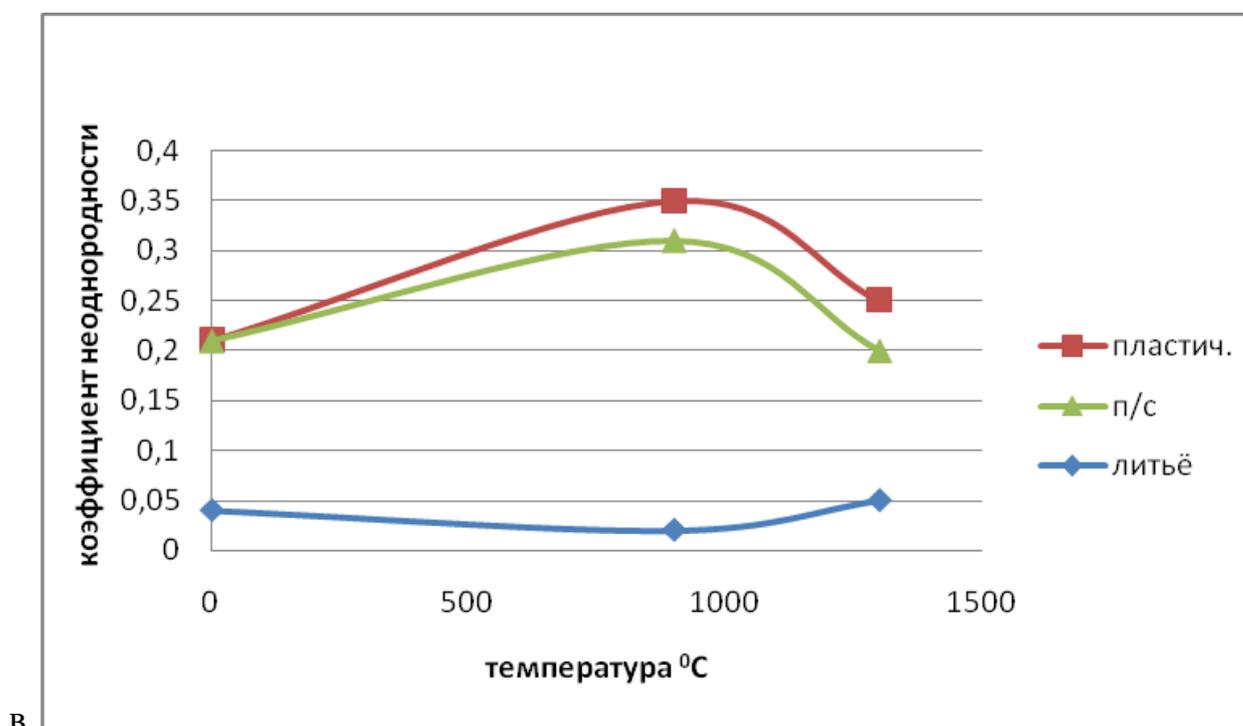


Рисунок 3.27, в, г – Коэффициенты неоднородности поверхности полуфабрикатов в виде колец полуфарфора по диаметру (в) и высоте (г) в зависимости от температуры обжига

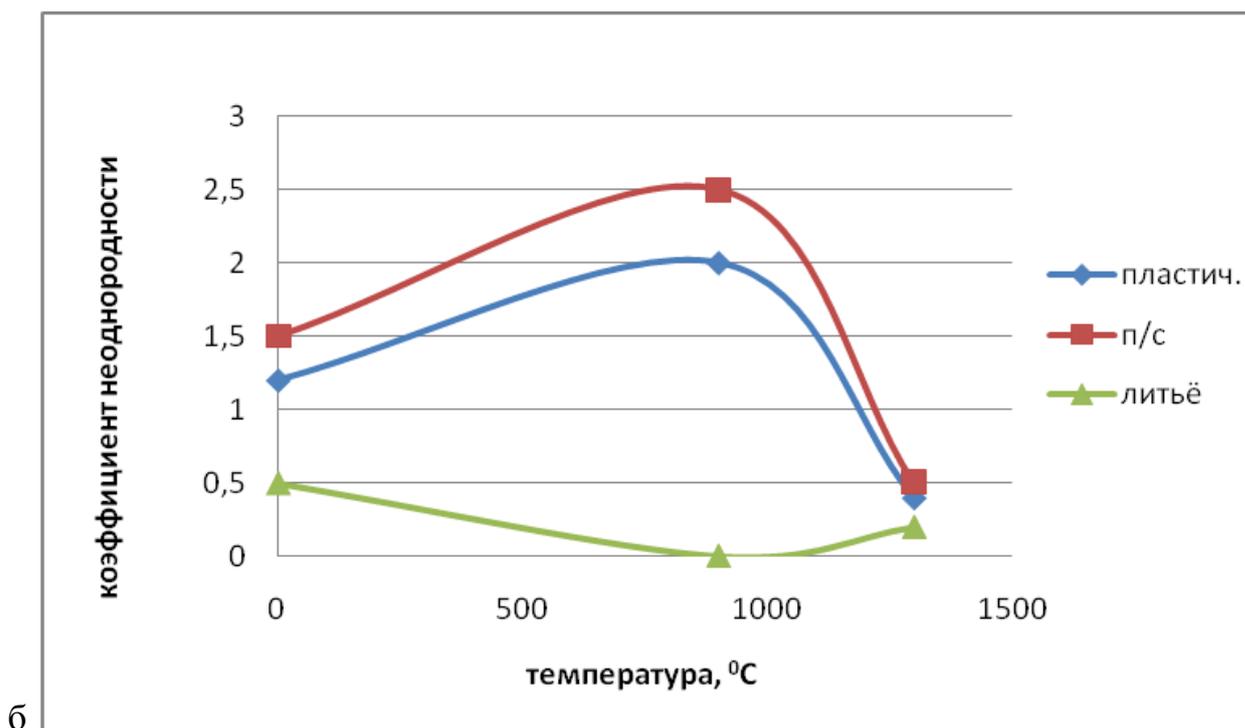
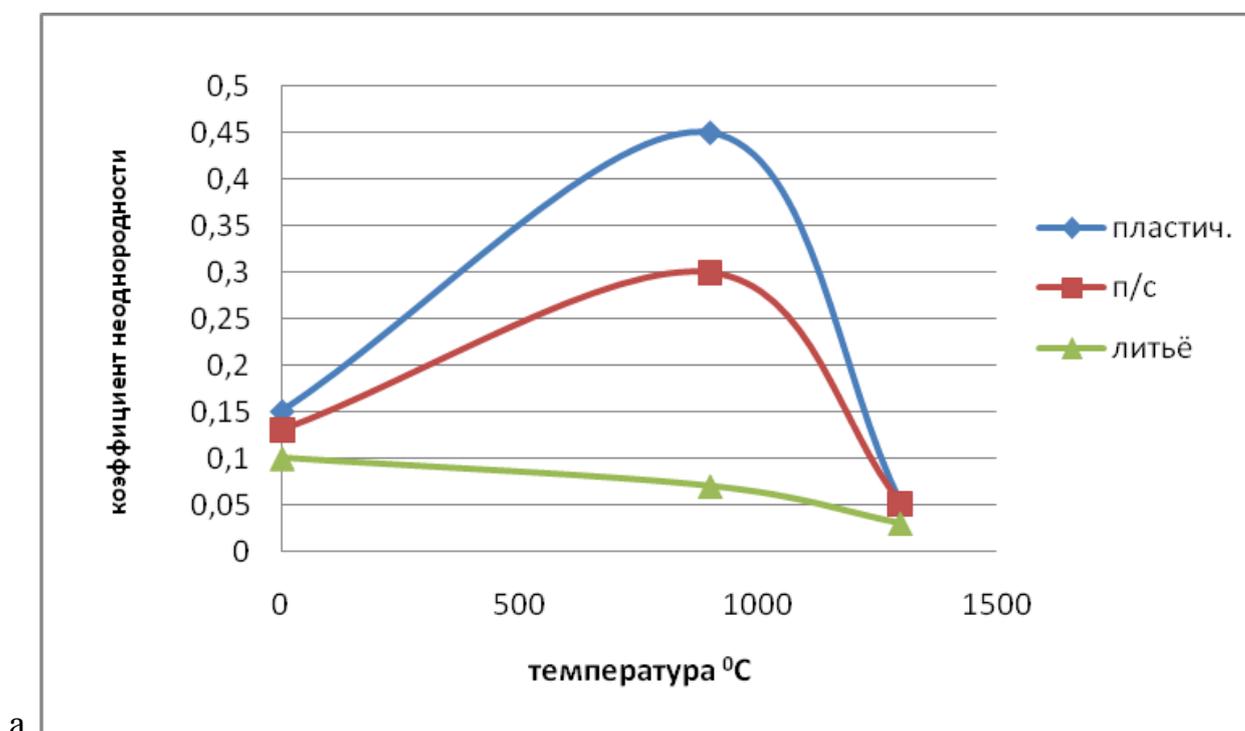


Рисунок 3.28, а, б – Коэффициенты неоднородности поверхности полуфабрикатов в виде пластинок фарфора по длине (а) и высоте (б) в зависимости от температуры обжига

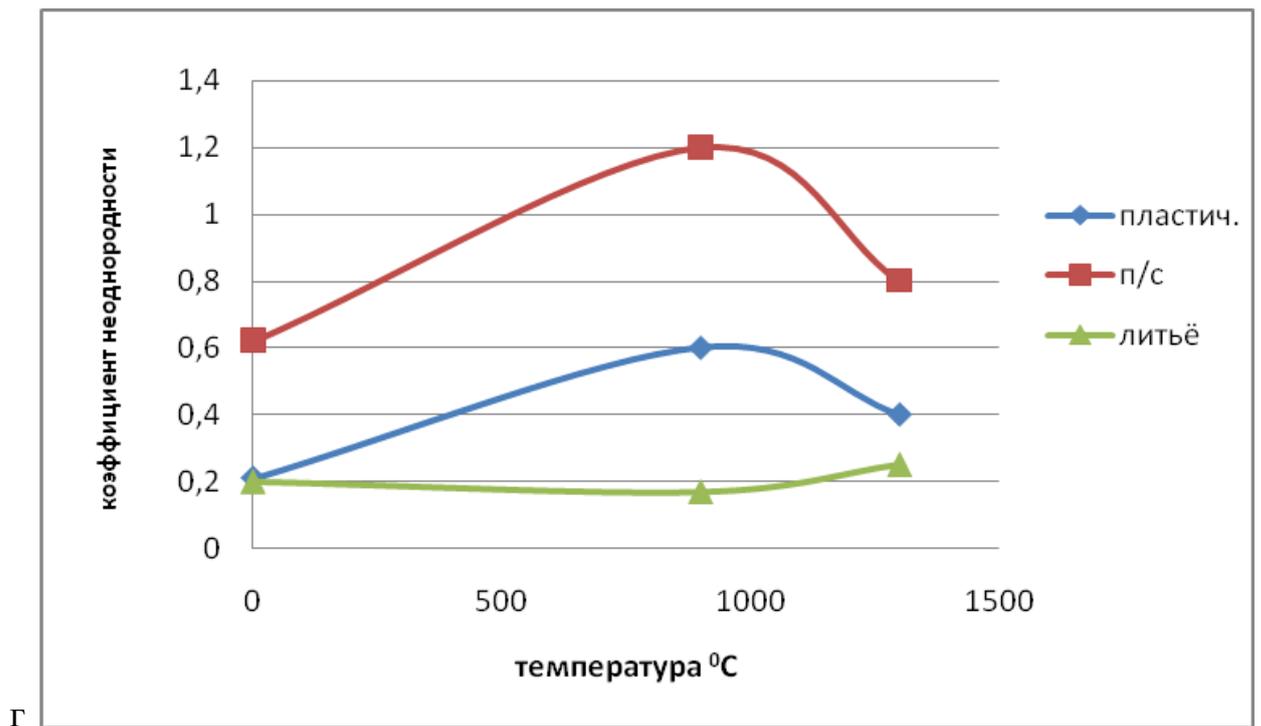
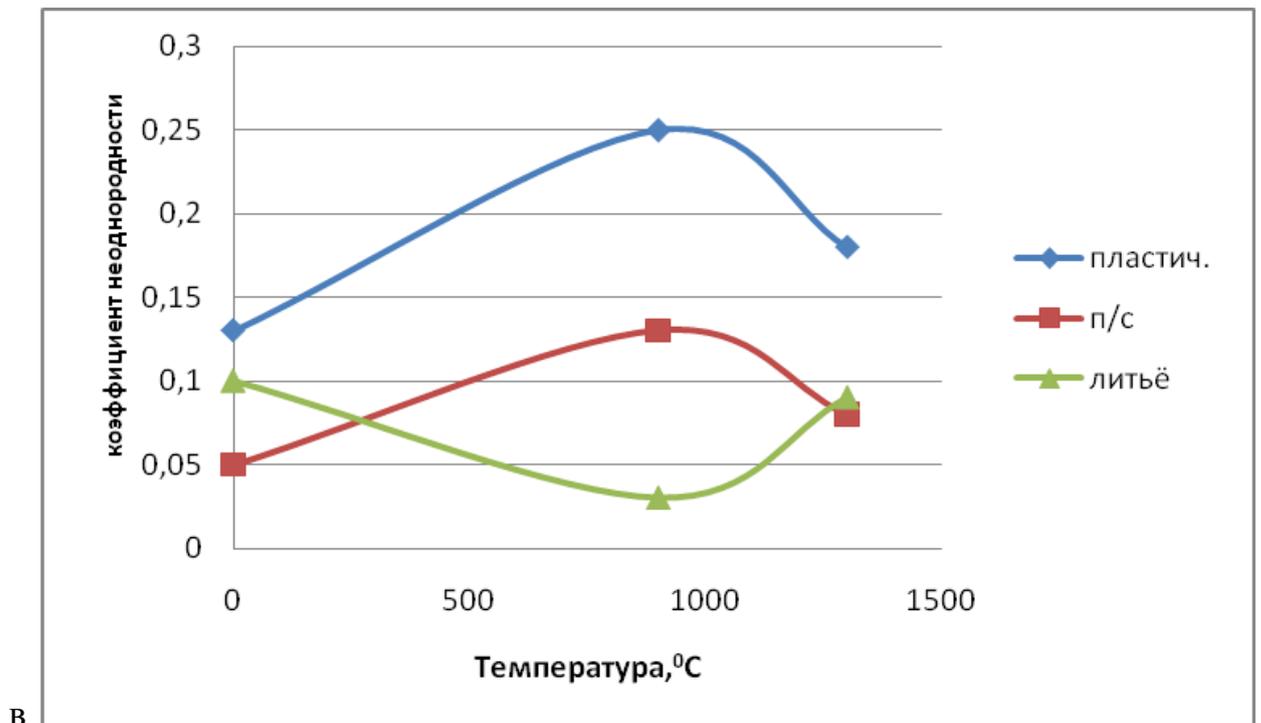


Рисунок 3.28, в, г – Коэффициенты неоднородности поверхности полуфабрикатов в виде пластинок полуфарфора по длине (в) и высоте (г) в зависимости от температуры обжига

Сравнивая показатели неоднородности образцов, полученных из разных материалов, можно отметить следующее. Наиболее однородной поверхностью обладают образцы, изготовленные из полуфарфора, независимо от их формы. Более неоднородной структурой поверхности обладают фарфоровые образцы. Это можно объяснить различным содержанием тонкодисперсной составляющей (глины) в этих материалах, а также тем, что полуфарфор образует менее плотную структуру при равных условиях обжига. В связи с последним видна разница в значениях коэффициентов неоднородности поверхности образцов полуфарфора, формованных различными способами и обожженных при температуре 1300 °С, в отличие от аналогичных образцов фарфора, для которых способ формования не влияет на конечную однородность поверхности.

Рассмотрев влияние способа формования на однородность поверхности образцов различной конфигурации, мы пришли к следующим выводам:

1. Наиболее однородную структуру поверхности по диаметру и высоте колец можно получить, используя литье в гипсовые формы. При этом формовании коэффициент неоднородности минимальный. Полусухое прессование приводит к большой неоднородности поверхности, как по высоте колец, так и по их диаметру.

2. Определили высокую неоднородность поверхности по высоте пластинок, полученных полусухим прессованием и по длине пластинок, изготовленных методом шликерного литья.

3. Как и для необожженных полуфабрикатов, наиболее однородной поверхностью характеризуются обожженные образцы, изготовленные из полуфарфора, независимо от их формы. Наиболее неоднородной структурой поверхности обладают фарфоровые образцы.

4. Измерения неоднородности сырца и фарфоровых пластинок, обожженных при 900 °С и 1300 °С, показали наличие ранее установленных связей: чем больше неоднородность сырца, тем больше неоднородность обожженных образцов.

5. Наиболее однородной структурой поверхности обладают образцы в форме колец.

### **Выводы по разделу 3.2:**

1. Было подтверждено, что способ формования является определяющим фактором в получении изделия с однородными характеристиками объема и поверхности. На основании проведенных экспериментов установлена связь между усилием формования, вязкостью формуемой системы и геометрическими характеристиками изделий.

2. Способ формования оказывает решающее действие на анизотропию усадки образца.

3. Большое влияние на однородность формованного полуфабриката оказывает материал: при прочих равных однородность образцов с повышенным содержанием глинистых компонентов сырья (фаянса и полуфарфора) выше, чем у фарфоровых образцов.

4. Проанализировано влияние конфигурации полуфабриката и фактора формы на однородность керамических образцов. В целом, чем меньше фактор формы образца, тем более однородно изделие, если способ формования в большей степени обеспечивает наследование симметрии изделия.

5. Используя метод капиллярного всасывания, можно оценивать неоднородность поверхности изделий различной структуры и формы, полученных различными способами формования, без разрушения изделия и без сложного и дорогого оборудования. Метод можно использовать для быстрой оценки водопоглощения, часто являющегося характеристикой степени спекаемости керамики.

6. Было установлено влияние изменения структуры образцов после обжига при различных температурах на степень их однородности, оцененной по пористости отдельных участков поверхности. После обжига на 900 – 1100 °С происходит увеличение неоднородности поверхности образцов.

**Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Однородность керамики: связь со способом формования и геометрическими характеристиками изделия [Текст] // Стекло и керамика. 2003. № 9. С. 35-38.

1. **Захаров А. И.** Изучение однородности поверхности керамических полуфабрикатов и изделий методом капиллярного всасывания [Текст] / Захаров А. И., Карнаущенко И. А. // Стекло и керамика. 2008. № 10. С. 37-40.

1. **Захаров А. И.** Влияние способа формования на структуру фарфоровых изделий [Текст] / Неклюдова Т. Л., **Захаров А. И.** // Стекло и керамика. 2013. № 7. С. 28-33.

### **3.3 Влияние характеристик формы полуфабриката на его поведение при сушке**

Производственный процесс удаления временной технологической связки, занимающий в технологической схеме производства керамических изделий место между стадией формований и стадией обжига часто называют сушкой, т. к. для большинства изделий хозяйственно-бытового и строительного назначения, а также некоторых видов технической керамики и шамотных огнеупоров основным компонентом связки служит вода.

Сушка занимает значительную часть времени в технологическом процессе изготовления всего изделия (для массивных изделий продолжительность сушки может превышать продолжительность обжига). Расширение или смена ассортимента выпускаемой продукции определяет многообразие форм керамических изделий и требует от производства возможности быстрой оптимизации режимов сушки с целью сокращения ее длительности. Зачастую у производителей остается лишь один резерв для увеличения скорости сушки – улучшение сушильных свойств массы за счет введения различного рода добавок, как правило, снижающих гидрофильность массы.

Удаление воды из формованного полуфабриката – сложный процесс, в основном протекающий по механизму диффузии жидкости и пара через пористую структуру материала. Керамические полуфабрикаты на основе глин можно рассматривать как капиллярно-пористые тела, состоящие из твердофазных частиц нескольких минералов с разной степенью гидрофильности, на границах которых, а также в порах, располагается жидкость в виде водных растворов примесных солей и модифицирующих добавок (электролиты-дефлокулянты, пластификаторы, упрочняющие клеи и т. п.).

Механизмы сушки и особенности процесса удаления влаги из керамического полуфабриката изложены в научных трудах 40-70-ых годов XX в. [314, 315, 209, С. 5-23].

Рассматривают три периода сушки: отличительная черта первого (период нарастающей скорости сушки) – прогрев полуфабриката, второго (период постоянной скорости сушки) – усадка полуфабриката, сопровождаемая удалением значительной части влаги, третьего (период падающей скорости сушки) – удаление воды пор, протекающее без усадки. Основной период сушки, опасный для появления трещин – период постоянной скорости сушки, завершающийся критическим влагосодержанием, которое показывает окончание воздушной усадки, возрастание температуры тела и уменьшение скорости сушки. В этом периоде устанавливается параболическое распределение влажности между точкой (плоскостью), обозначающей центр полуфабриката в виде пластины и его поверхностью (рис. 3.29). В принципе любая форма полуфабрикатов может быть представлена, как пластина с толщиной, соответствующей определяющему размеру, при этом кривые распределения влажности внутри тела могут характеризоваться более сложной зависимостью, которая определяется также и способом сушки.



Рисунок 3.29 – Распределение напряжений при сушке в образце в виде пластины неограниченной длины шириной  $l$  и толщиной  $2R$  [315, С. 194]

Основной дефект сушки керамических полуфабрикатов, как было показано в разделе 2.2, – образование усадочных трещин, поэтому этот раздел работы посвящен изучению зависимости трещинообразования полуфабрикатов от характеристик их форм.

Максимально допустимый перепад влажности, определяемый по разнице значений влажности между серединой и поверхностью тела, связывает длитель-

ность сушки с массивностью (объемом) и фактором формы полуфабриката [166, С. 263-264, 316].

Основным критерием трещинообразования (критерий Кирпичева –  $Ki_m$ ), определяющим допустимую скорость сушки и возможность образования усадочных трещин в керамических полуфабрикатах, является относительный максимально допустимый перепад влажности между значениями средней влажности полуфабриката  $W_{cp.}$  и влажностью его поверхности  $W_{пов.}$  (формула 29), прямо пропорционален максимально возможному перепаду влагосодержания (влажности)  $\Delta W_{max}$ , (%), возникающему между центром полуфабриката и его поверхностью.

$$Ki_m = (W_{cp.} - W_{пов.}) / W_{cp.} \quad (29)$$

Пределами применения указанного критерия трещинообразования Кирпичева можно считать область, в которой влагосодержание на поверхности полуфабриката больше, чем критическое влагосодержание, достигаемое к концу усадки [315, С. 137].

Скорость сушки (скорость удаления влаги из полуфабриката) лимитируется возникновением и развитием критических напряжений во время усадки полуфабриката, которые могут превысить допустимые и привести к его разрушению. Исследования механизма образования трещин в процессе сушки привели к выводу, что ответственными за их появление являются касательные напряжения, возникающие в упруго-пластической области под действием пластических деформаций [315, С. 197]. Напротив, в [317] уделено значительное место изучению прочностных показателей полуфабрикатов переменной влажности и утверждается, что решающий вклад в образование трещин при сушке вносят растягивающие напряжения, возникающие в поверхностном слое полуфабриката, на которые оказывают влияние его начальная влажность, способность материала к усадке и его гидрофильность, интенсивность сушки. Увеличение значений всех перечисленных характеристик увеличивает напряжения и вероятность образования трещин. Для расчета допустимой интенсивности сушки авторы предлагают решить реологические уравнения для бесконечной пла-

стины, в которые входят величины реологических характеристик, коэффициент диффузии влаги, коэффициент (меру) усадки, плотность сухого вещества при заданной температуре для разных влагосодержаний материала. Затем применить расчетно-графический метод. Таким образом, предсказать поведение образцов конкретной формы в сушке представляется довольно сложной задачей.

Характеристики основных способов сушки полуфабрикатов сведены в табл. 2.16. В таблице указано, что тип симметрии, характеризующий основные виды сушки (кроме СВЧ-сушки) – симметрия покоящегося конуса. На рис. 3.30 проиллюстрированы симметрия полей температуры, давления и влажности, возникающих в основных способах сушки полуфабриката.

Градиенты температурных полей оказывают существенное влияние на скорость сушки в первом и третьем периодах за счет термодиффузии влаги, направление которой противоположно градиенту температуры, при этом градиент давления пара несущественен. Источником нагрева в случае конвекционной сушки (рис. 2.30, а) служит поток теплоносителя, омывающий полуфабрикат, нагревающий его поверхность и подложку. Температура поверхности полуфабриката играет существенную роль. Если на первом этапе ее повышение существенно тормозит удаление влаги из-за термодиффузии, то в периоде постоянной скорости сушки диффузия влаги заметно ускоряется, сокращая общее время сушки (рис. 3.31). Так в проводимых нами экспериментах при повышении температуры сушки с 25 °С до 100 °С период постоянной скорости сушки глиняных образцов в виде пластин и цилиндров сократился почти в 10 раз (с 10 до 1,5 часа), также, как общее время сушки.

При контактной сушке (рис. 2.30, б) нагрев осуществляется передачей тепла от нагретой подложки, при сушке электрическим током (рис. 2.30, в) нагревателем служит электросопротивление слоев жидкости, распределенной вокруг зерен твердой фазы. При контактной сушке влагосодержание середины полуфабриката превышает влагосодержание как открытой поверхности, так и контактного слоя. Несмотря на это, при контактной сушке нагрев контактной поверхности приводит к образованию в контактном слое избыточного давления

паров, которое, как и направленная в сторону открытой поверхности полуфабриката термодиффузия, ускоряет удаление влаги.

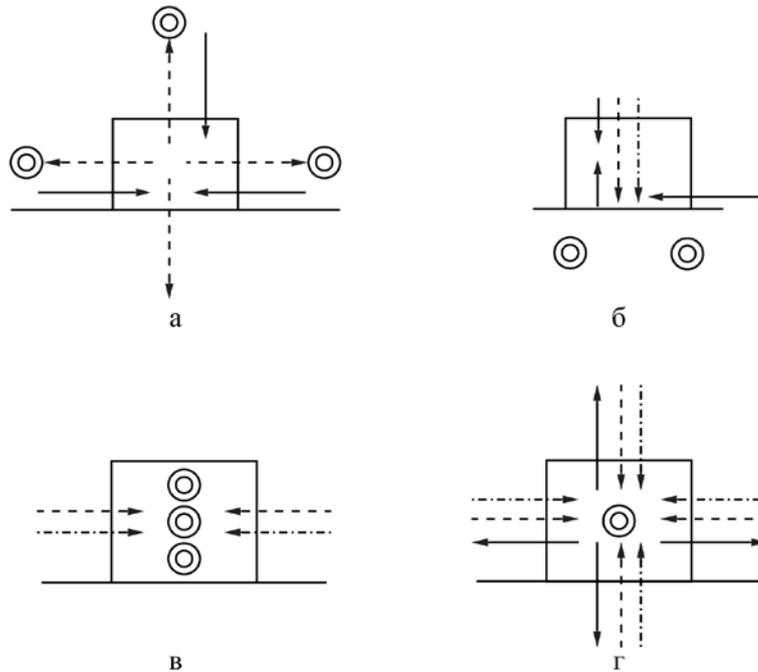


Рисунок 3.30 – Схематичное изображение градиентов температуры (пунктирные стрелки), давления (штрихпунктирные) и влажности (сплошные), возникающих в период растущей и падающей скорости сушки при разных способах сушки: а – конвективном, б – контактном, в – сушке электрическим током, г – СВЧ-сушке. ☉ – расположение источника нагрева

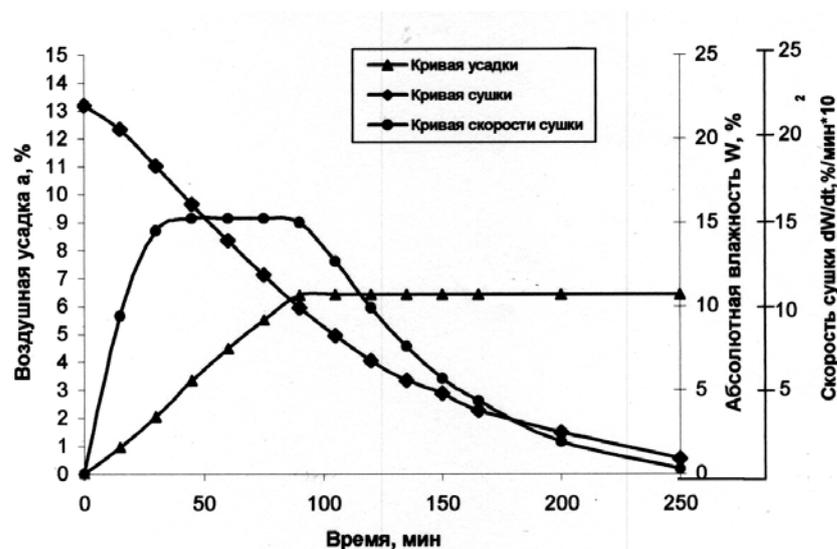


Рисунок 3.31 – Зависимости сушки глиняных образцов в виде параллелепипедов и цилиндров при температуре 100 °С

Сушка электрическим током также приводит к перегреву локальных областей внутри полуфабриката, образованию избыточного давления пара. И в том, и другом случае градиент влагосодержания быстро меняет свое направление (слои вблизи нагретой поверхности при контактной сушке и центральные слои полуфабриката при сушке электротоком оказываются менее влажными), однако градиенты температуры и давления обеспечивают удаление влаги до установления ее равновесного содержания для данных условий.

При сушке СВЧ-излучением (рис. 2.30, г) нагрев определяется диэлектрическими характеристиками материала и происходит в его влажных слоях практически во всем объеме полуфабриката, при этом в середине полуфабриката развивается максимальная температура, приводящая к росту давления паров и возникновению градиента влагосодержания, направленного в сторону поверхности полуфабриката.

Таким образом, для разных способов сушки характерны разно направленные градиенты температуры, влажности и давления при, преимущественно одном типе симметрии. С течением времени сушки температурные градиенты сглаживаются и во втором периоде сушки становятся пренебрежимо малы (т. е. температуру полуфабриката считают постоянной), однако в связи с тем, что градиенты влажности, направленные от поверхности полуфабриката к его середине, очевидно, зависят от его формы, скорость сушки неодинакова для разных направлений. Это проявляется в развитии разных по величине усадочных механических напряжений, возникновению и развитию трещин в определенных областях полуфабриката.

В работе проводили сравнение параметров безопасной сушки различными способами (конвекцией, кондукцией, СВЧ-сушкой). СВЧ-сушка была исследована, как один из самых перспективных способов сушки, внедрение которой в различные отрасли промышленности, в том числе в производство керамических изделий активно изучается и проводится последние 40 лет [36, С. 7, 315, С. 314-331, 318-326].

Эксперименты проводили на массе для производства санитарно-технических изделий (см. раздел 3.1) на образцах в виде цилиндров радиусом 15 мм, высотой 18 мм; пластин размерами 7x65x55 мм (Пл1) и 5x40x30 мм (Пл2).

Способ свободной конвекции обеспечивали в сушилке сушильном шкафу на подложке не препятствующей усадке, кондукцию (контактную сушку) проводили на огнеупорной пластине, нагретой до постоянной температуры, СВЧ-сушку осуществляли в микроволновой печи марки LG MS-1724W при различных мощностях, рассчитанных для нагрева воды по уравнению

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta T \quad (30)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость вещества, которая зависит от его свойств (для воды – 4200 Дж/(кг °С));  $m$  – масса, кг;  $\Delta T$  – изменение температуры.

Строго говоря, СВЧ-сушка в микроволновой печи является комбинированной, сочетаемой с конвективной сушкой из-за обтекания образцов теплоносителем – воздухом, нагнетаемым вентилятором.

Эксперименты, проведенные на образцах разной формы, показали (табл. 3.12), что влияние фактора формы на скорость и общее время сушки очевидно при конвекционной и контактной сушке, тогда как скорость СВЧ-сушки зависит, прежде всего, от объема образца.

Таблица 3.12 – Результаты экспериментов сушки образцов различной формы способами конвекции, кондукции и СВЧ-сушки

Способы сушки Образцы	Конвективная сушка			Контактная сушка			СВЧ-сушка		
	Пл1	Ц	Пл2	Пл1	Ц	Пл2	Пл1	Ц	Пл2
Приведенный фактор формы, мм	2,7	3,9	1,6	2,7	3,9	1,6	2,7	3,9	1,6
Объем · 10 <sup>3</sup> , мм <sup>3</sup>	27	12	4,5	27	12	4,5	27	12	4,5
Критическая влажность, %	10	11	10	8	11	8	11	12	11
Время окончания усадки, мин	65	70	60	20	20	15	4,3	4,2	1,7
Общее время сушки, мин	80	100	70	55	60	40	12,0	7,5	6,8

Примечания: Пл1, Пл2 – образцы в виде пластин различных размеров, Ц – образцы в виде цилиндров.

Время окончания усадки образцов при конвекционной и кондуктивной сушки также зависит от их фактора формы и симметрии, однако, как и для общего времени сушки, эта зависимость более явна при сравнении образцов, обладающих малым фактором формы (1,6 мм) с образцами со средним (2,7) и большим (3,9) факторами формы, чем между последними.

Симметрия образцов практически не влияет на интенсивность СВЧ-сушки (обладающей симметрией покоящегося шара), однако ее влияние можно предполагать при сравнении величины критической влажности: для всех способов сушки критическая влажность образцов в виде цилиндра оказалась выше, чем критическая влажность образцов в виде пластин. Как известно [315, С. 218], критическая влажность более всего зависит от начального влагосодержания, ее зависимость от температуры носит сложный характер. Независимо от способа и, соответственно, от условий сушки для образцов с одной и той же начальной влажностью, критическое влагосодержание оказалось выше для образцов в виде цилиндров, имеющих симметрию покоящегося цилиндра и обладающих большим фактором формы.

В следующем разделе работы рассмотрена связь параметров формы керамического полуфабриката (фактора формы и конфигурации) на скорость сушки и образование дефектов.

Известно, что способ сушки оказывает сильное влияние на ее интенсивность, которая зависит от формы изделия и его расположения в сушильном агрегате, т. е. от симметрии воздействия. Так, при конвективной сушке ее интенсивность (влагосъем с поверхности полуфабриката) зависит от длины стороны полуфабриката, вдоль которой движется поток теплоносителя [315, С. 108]. Зависимость обратно пропорциональна и приведена на рис. 3.32.

Задачами экспериментов были: установить справедливость приведенных в [166, С. 255-264] данных о достаточности использования фактора формы (определяющего размера) полуфабриката для определения безопасного режима сушки и установить связь между трещинообразованием при сушке керамического полуфабриката и его конфигурацией.

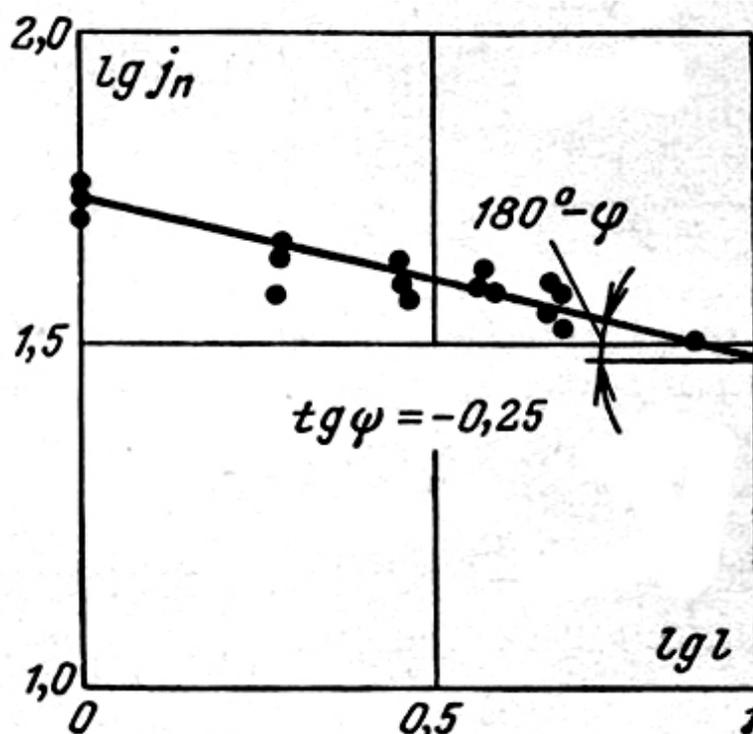


Рисунок 3.32 – Зависимость между интенсивностью сушки и определяющим размером (длиной образца) в условиях естественной конвекции [315, С. 108]

В первой серии экспериментов изучали поведение в условиях конвективной сушки кирпичной массы и глины Левженского месторождения, на основе которой она была составлена. Их фазовый состав приведен в разделе 3.1. Предварительно по методикам, описанным в разделе 3.1, были определены технологические характеристики сырья: пластическая прочность, оптимальная формовочная влажность, воздушная усадка, чувствительность к сушке.

Исследуемую глину отнесли к классу умеренно пластичных глин (число пластичности – 14). Определение связующей способности глины показало, что при добавлении 40 % отощающих (кварцевого песка), масса остается умеренно пластичной (число пластичности – 7). Оптимальная формовочная влажность массы без добавления отощающих, установленная с помощью конического пластометра Ребиндера, соответствовала 23 %.

Коэффициент чувствительности к сушке определяли методом Чижского. Исследуемую массу отнесли к классу малочувствительных (коэффициент чувствительности к сушке 1,03).

Трещинообразование при различных условиях конвективной сушки изучали на изготовленных методом пластического формования при оптимальной формовочной влажности образцах в виде пластин, а также на фрагментах полуфабриката строительного керамического камня заводского изготовления, различавшихся по форме и условиям сушки (рис. 3.33).

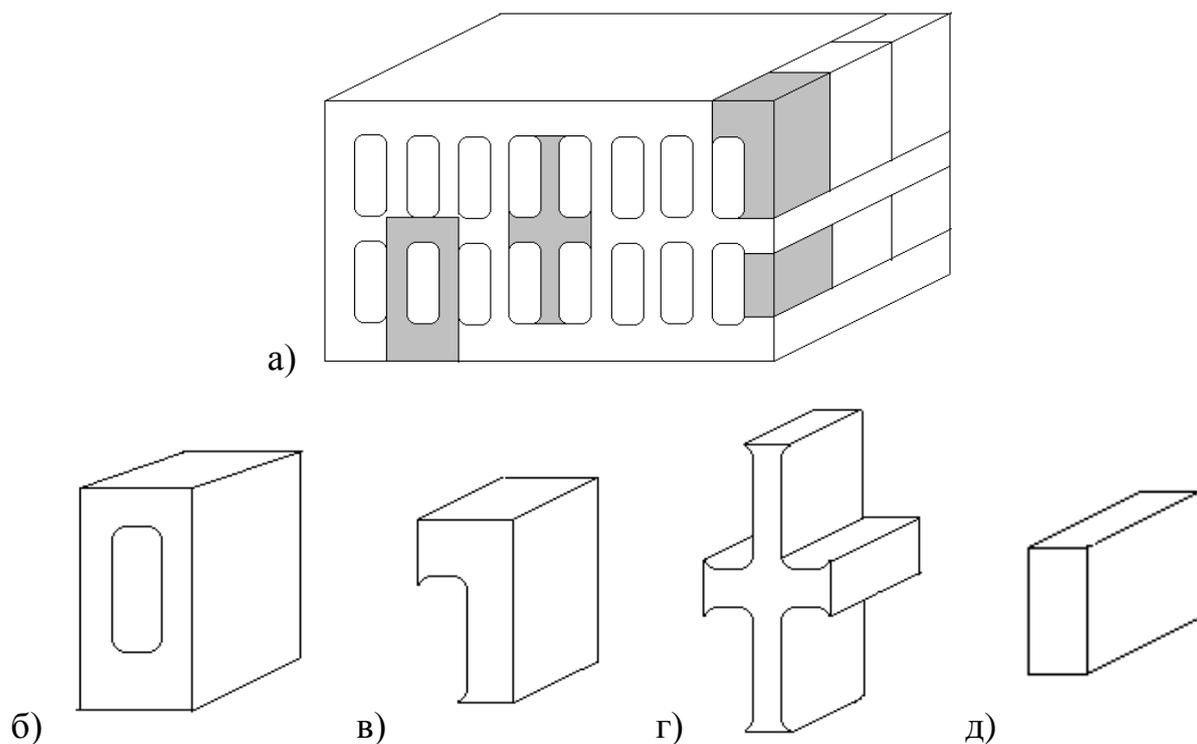


Рисунок 3.33 – Схематичное изображение полуфабриката строительного керамического камня (а). Выделены фрагменты полуфабриката, используемые в качестве образцов (б-д)

Сушку проводили как в естественных условиях при температуре  $20 \pm 2$  °С, так и принудительно при температурах 60 °С, 70 °С и 80 °С (рис. 3.34).

Сушка образцов в естественных условиях не привела к образованию трещин, в дальнейшем сушку проводили при температурах 80 °С. Наиболее интенсивно усадка проходила в течение 1-1,5 ч, именно в этот промежуток времени на поверхности некоторых образцов образовывались трещины.

После проведения экспериментов по сушке для отформованных из левженской глины образцов различной формы и размеров были рассчитаны мак-

симальные влагосъемы (максимально возможная скорость удаления влаги) и установлены области «безопасных» и «опасных» условий сушки и зависимости критического влагосъема от фактора формы (рис. 3.35). Безопасными считались области значений факторов формы образцов и соответствующих им значений максимального влагосъема, при которых на образцах не возникали трещины. В качестве значений факторов формы использовали значения приведенных факторов формы, рассчитываемых с учетом площади образца, с которой происходило удаление влаги.

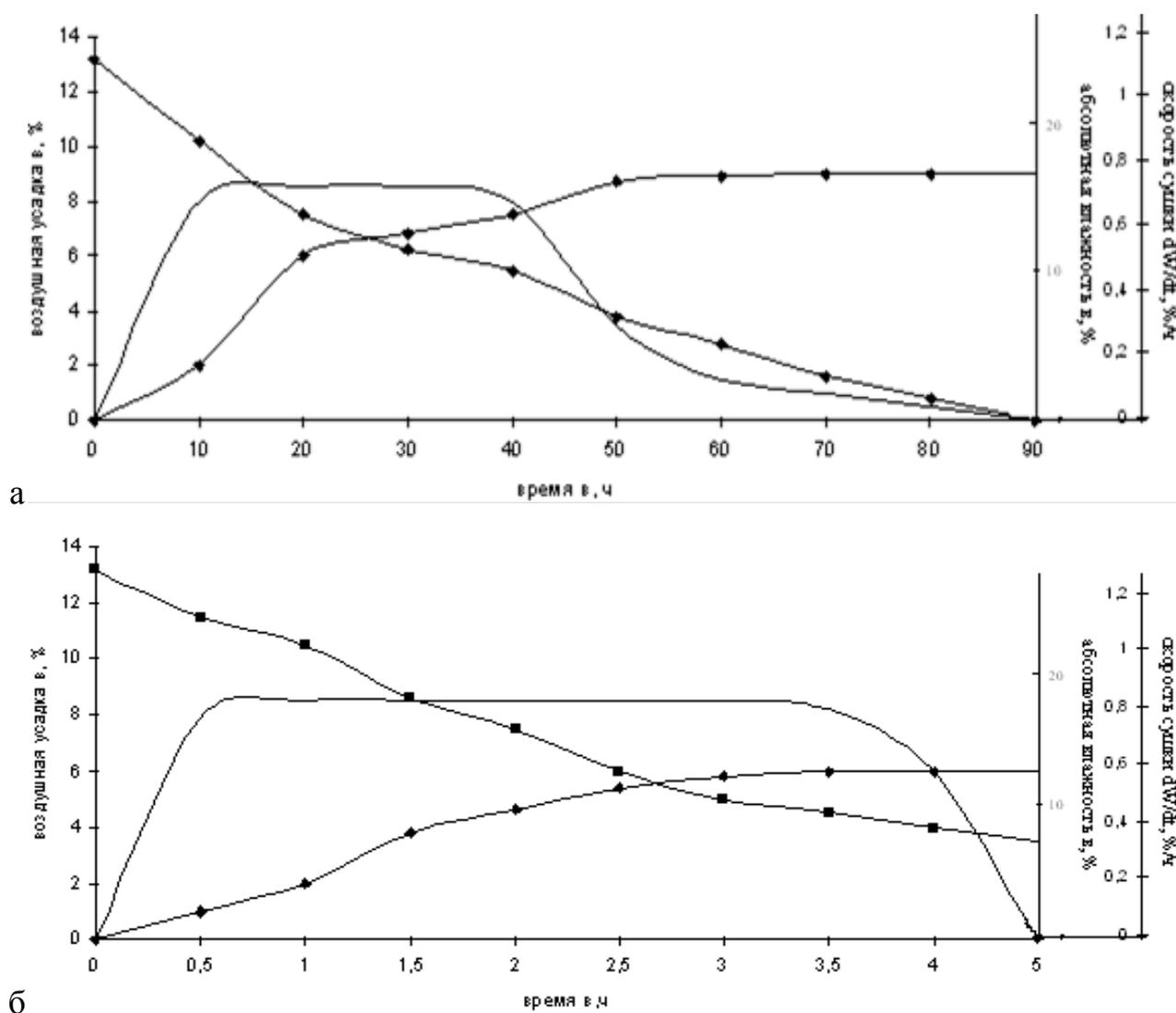


Рисунок 3.34 – Зависимости влажности, скорости сушки и усадки образцов в естественных условиях: а – при температуре 20 °С, б – в сушильном шкафу при температуре 80 °С. 1 – абсолютная влажность; 2 – воздушная усадка; 3 – скорость сушки

Диапазон значений приведенного фактора формы расширяли, увеличивая его путем изоляции частей некоторых образцов тонкой полиэтиленовой пленкой. Для предотвращения образования «рамочных» трещин, возникающих из-за торможения усадки материалом подставки, образцы помещали на прокладки из мягкого материала.

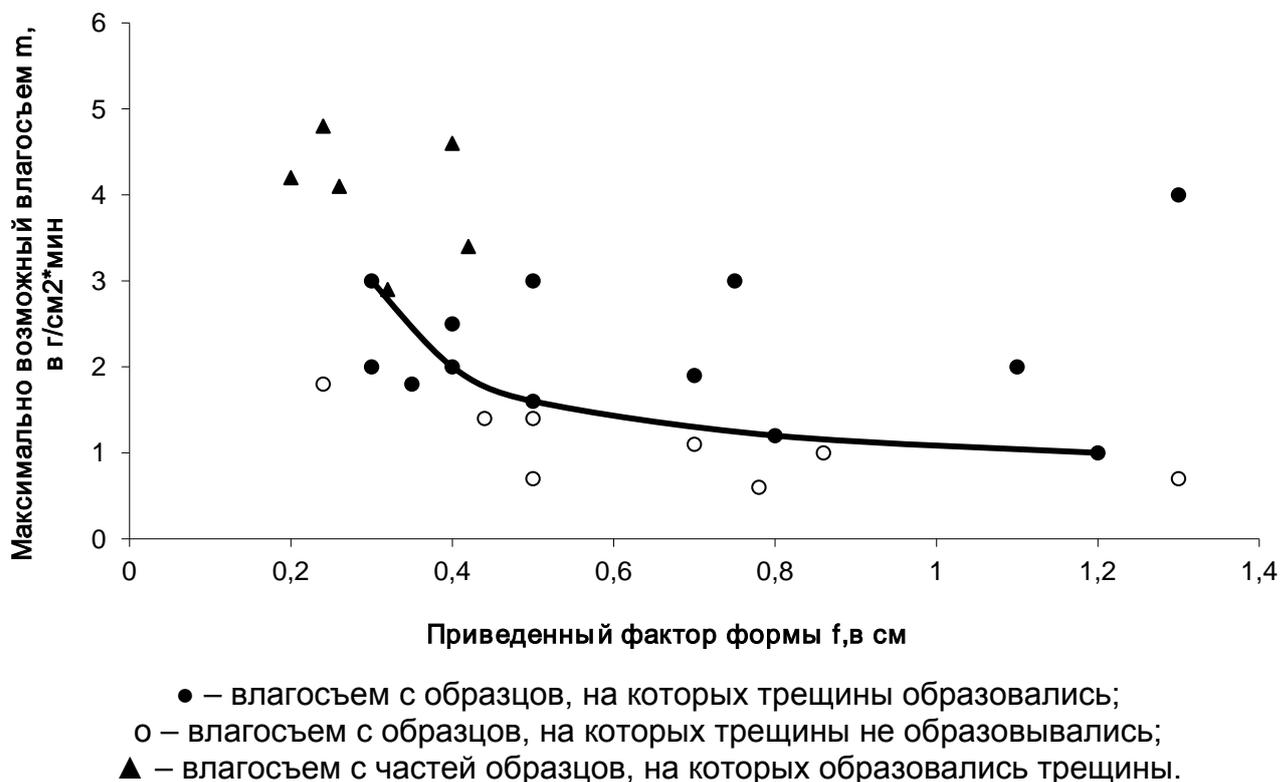


Рисунок 3.35 – Области безопасных и опасных значений максимального влагосъема для образцов из исследуемой глины

Результаты экспериментов с образцами из глины, представленные на рис. 2.35, показали, что нельзя провести четкую границу между областями «опасного» и «безопасного» влагосъема. Так, треснули некоторые образцы в виде прямоугольной пластины, изготовленные из глины Левженского месторождения, сушка которых проходила в области «безопасных» режимов. Следовательно, зависимость максимально возможного влагосъема от приведенного фактора формы даже для одной массы не может служить надежным ориентиром для описания поведения при сушке изделий разных форм.

Для построения более корректной зависимости образцы в виде пластин они условно были разбиты на части, для которых условия сушки и, соответственно, распределение термических усадочных напряжений, возникающих в процессе сушки, явно различаются (рис. 3.36). Части 1, 3, 7 и 9 рассматриваемого образца практически идентичны, как и части 2, 4, 6 и 8, – они имеют одинаковые площадь и приведенный фактор формы. Значения рассчитанного максимально возможного влагосъема с отдельных частей образцов-пластин были нанесены на диаграмму, представленную на рис. 3.35. Для частей, на которых образовывались трещины, влагосъем находился в области запрещенных режимов сушки.

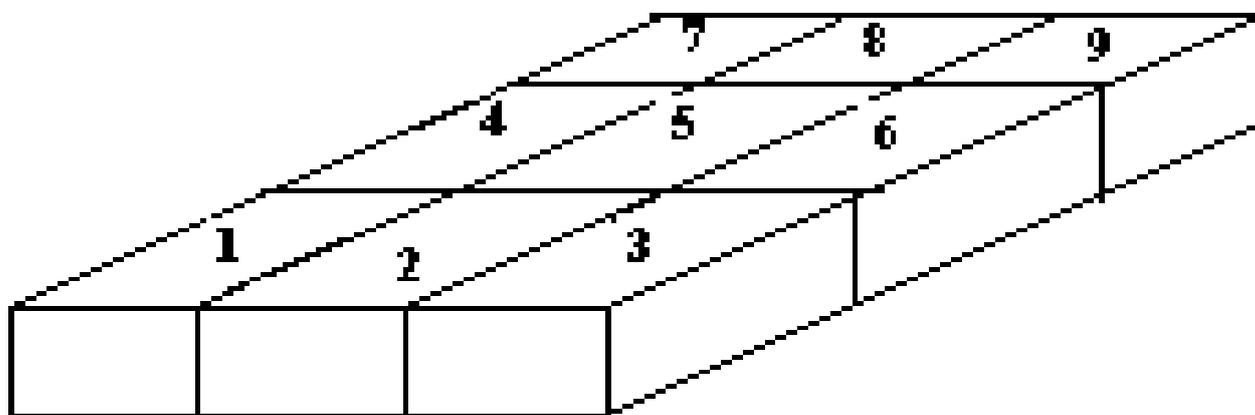


Рисунок 3.36 – Условное разделение образца в виде пластины на части, для которых условия сушки максимально близки

Далее были изготовлены образцы из производственной массы, используемой для изготовления керамического теплоэффективного камня и определена зависимость допустимой интенсивности сушки от приведенного фактора формы у образцов простых форм. Общая картина поведения данной массы в процессе сушки при разных температурах и, соответственно, при разном максимально возможном влагосъеме представлена на рис. 3.37. Для уточнения и более точного описания образцов с трещинами, так же, как и в случае с образцами из глины, образцы были условно разбиты на простые части (рис. 3.38),

рассчитан влагосъем с их поверхности и координаты «приведенный фактор формы – максимальный влагосъем» нанесены на рис. 3.37.

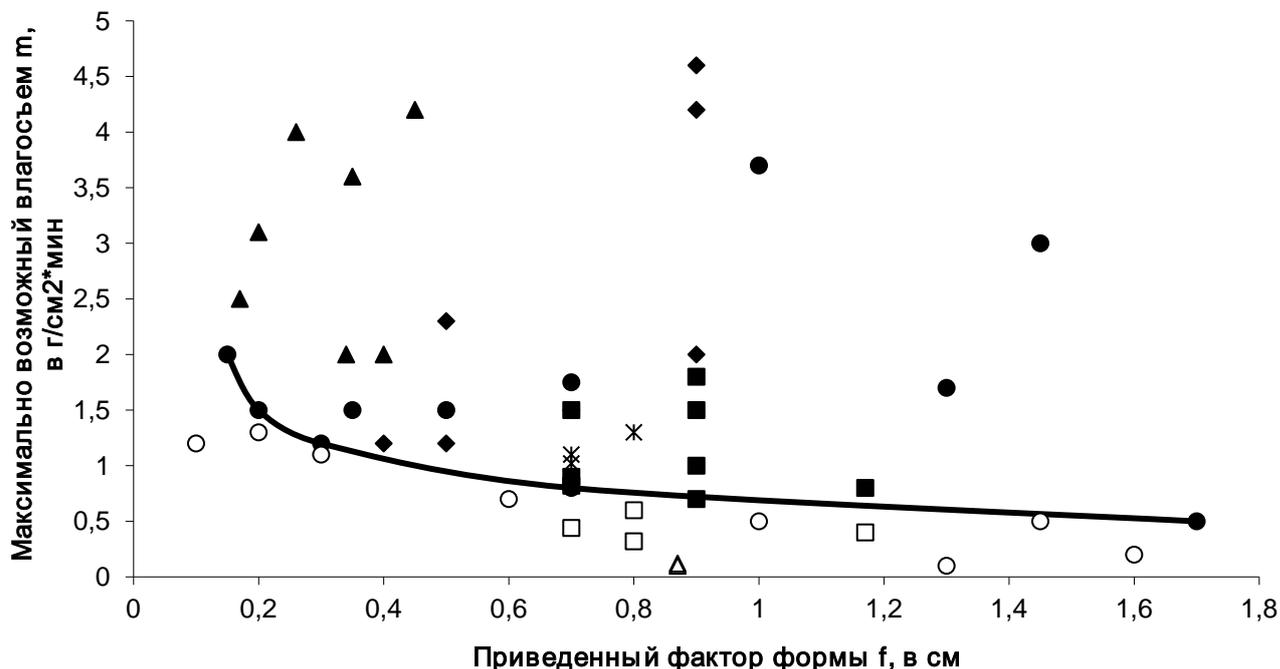


Рисунок 3.37 – Области безопасных и опасных значений максимального влагосъема для образцов из производственной массы для строительного камня.

● – влагосъем с образцов, на которых трещины образовались; ○ – влагосъем с образцов, на которых трещины не образовывались; ▲ – влагосъем с частей, на которых образовались трещины; ■ – влагосъем с образцов сложных форм; □ – влагосъем с образцов сложных форм на которых не образовывались трещины; ◆ – влагосъем с частей сложных форм, на которых образовывались трещины. △ – влагосъем с целых производственных изделий (с трещинами и без); ж – влагосъем с частей производственных изделий, на которых образовывались трещины

По сравнению с фрагментами изделий, выделенными на рисунке 3.33, условному разбиению подвергали только фрагменты сложной формы, поэтому таких фрагментов оказалось 3 (рис. 3.38).

Готовые изделия (керамический строительный теплоэффективный камень) наряду с образцами простой формы и фрагментами изделий также были испытаны в заводских условиях при производственных режимах сушки.

Была получена зависимость допустимой интенсивности сушки в производственных условиях от приведенного фактора формы керамических теплоэффективных камней размером  $250 \times 120 \times 138$  мм и рассчитанные значения нанесены на диаграмму, представленную на рисунке 3.35.

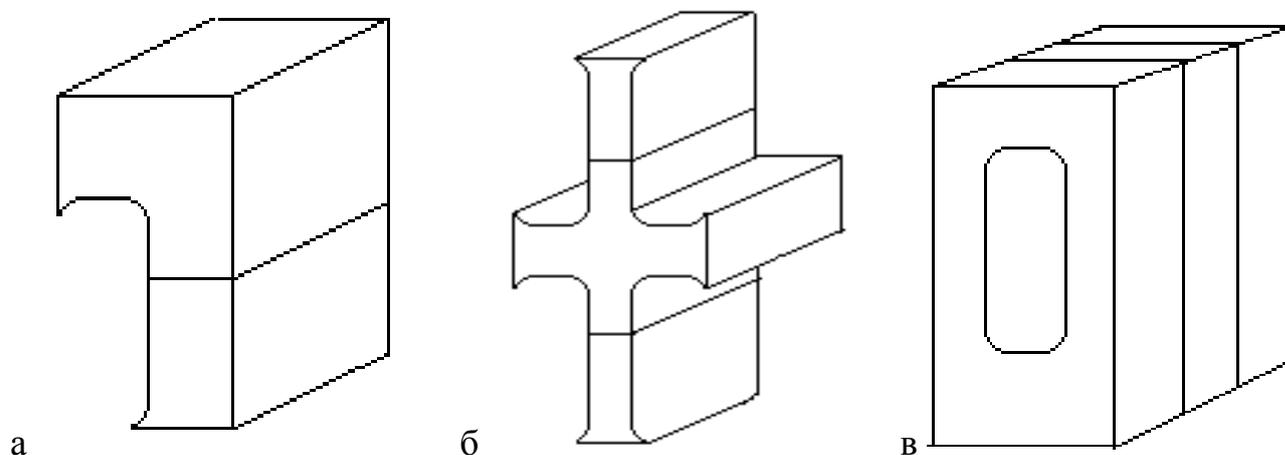


Рисунок 3.38 – Разбиение образцов сложных форм, вырезанных из фрагментов производственных изделий

При этом учитывалось то, что данные, отвечающие эксплуатационным значениям интенсивности влагоотдачи, для изделий несколько занижены, так как в производственных условиях во избежание недосушки и большого перепада критической влажности внутри изделий продолжительность первого периода сушки преднамеренно увеличена. Далее для полной картины полученной зависимости изделия с трещинами были условно разбиты на части (рис. 3.38), а значения влагосъема для них в виде точек нанесены на диаграмму (рис. 3.37).

Для определения безопасного режима сушки были установлены зависимости продолжительности бездефектной сушки  $\tau$  или максимально безопасного влагосъема  $m$  с определяющим размером изделия – приведенным фактором формы  $f$  (рис. 3.39). Зависимости различаются в области больших значений фактора формы.

Аналитически эти зависимости можно записать следующим образом (формула 3):

для образцов простой формы из глины Левжинского месторождения

$$m_1 = 1,06 f^{-0,76}, \quad (31)$$

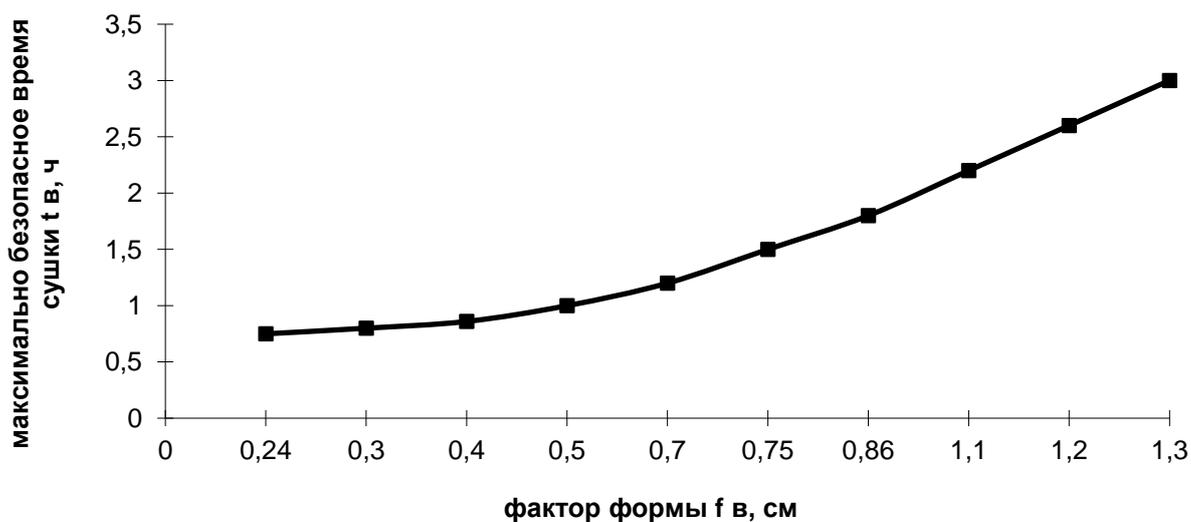
где  $m$  – влагосъем,  $f$  – приведенный фактор формы образца.

$$\tau_1 = 0,31 f^{0,86}, \quad (32)$$

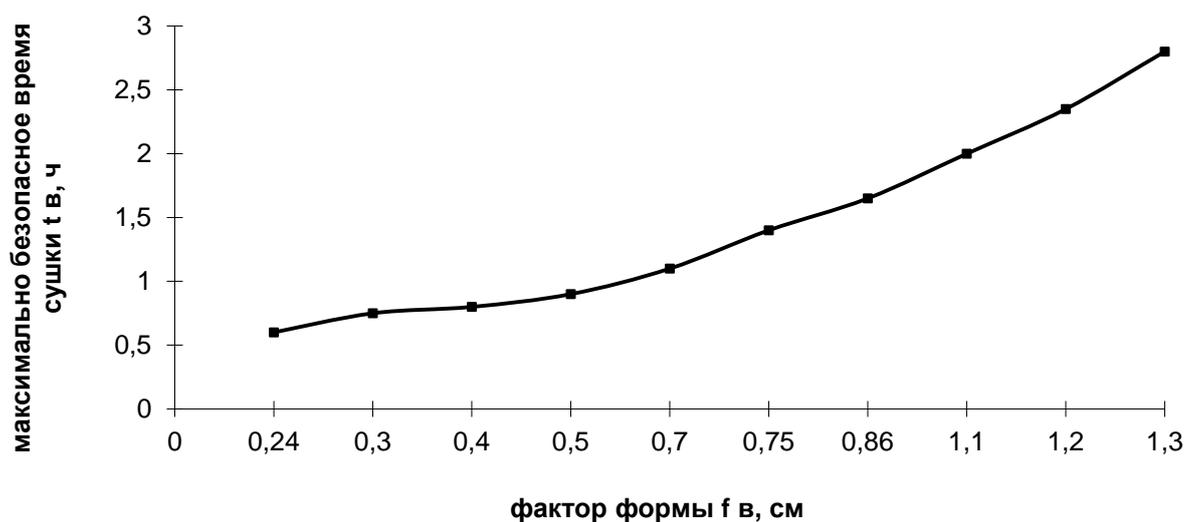
где  $\tau$  – допустимое время сушки для образцов простой формы из производственной массы.

$$m_2 = 0,66 f^{-0,55}, \quad (33)$$

$$\tau_2 = 0,26 f^{0,90}. \quad (34)$$



а



б

Рисунок 3.39 – Зависимость максимально безопасной продолжительности сушки от фактора формы образцов из исследуемой глины (а) и производственной массы (б)

Анализируя полученные закономерности, можно констатировать, что образцы с примерно одинаковым общим фактором формы, но различными геометрическими характеристиками, в процессе сушки ведут себя по-разному. Условно разбивая эти изделия на составные части и отдельно считая факторы формы этих частей, можно получить более четкую картину – влагосъем с той части изделия, где образуется трещина, превышает максимально допустимое значение, а в той части, где трещины не образуются, значения влагосъема находятся в области разрешенных режимов сушки. Результаты, полученные в заводских условиях (сушка образцов в камерных сушилах), подчиняются установленным выше зависимостям. Однако, была замечена значительная разность в максимальном влагосъеме одинаковых образцов, расположенных на различных рядах (полках) сушильной камеры, что говорит о значительной неравномерности условий сушки.

Для изделий, изготовленных из левженской глины, установлено, что при факторе формы образцов и их характерных частей 0,2-0,7 см влагосъем не должен превышать 1,4-1,5 г/(см<sup>2</sup> мин), а для изделий из этой же массы с фактором формы не менее 0,7 см – должен находиться в пределах до 1 г/(см<sup>2</sup> мин). Образцы из производственной массы с фактором формы (в том числе их характерных частей) 0,1-0,7 можно без опасения сушить при влагосъеме 0,7-1,2 г/(см<sup>2</sup> мин). Образцы, имеющие общий фактор формы или их характерных частей выше 0,7 требуется сушить при влагосъеме не более 0,6 г/(см<sup>2</sup> мин).

Анализируя характер и месторасположение трещин в образцах в виде пластин, можно заметить, что трещины чаще всего располагались во второй части или идентичных ей (рис. 3.36). Объясняется это тем, что при сушке влагосъем именно с этих частей превышал допустимо безопасный. При сушке изделий такой формы расчет и подбор режимов следует вести относительно режимов сушки именно этой части.

Для образцов сложной формы (рис. 3.38) установлено, что для образца «а» влагосъем при бездефектной сушке должен находиться в пределах ниже

0,9 г/(см<sup>2</sup> мин), для образца «б» при тех же условиях – 0,4 и менее, для образца «в» – ниже 0,6 г/(см<sup>2</sup> мин). Поскольку эти части были рассмотрены как составные части керамического теплоэффективного камня, можно сделать вывод о том, что из представленных частей самой опасной является часть «б», по ней и следует подбирать режим для сушки всего изделия.

Сравнивая полученные результаты исследований с результатами испытаний в производственных условиях, можно отметить, что значения влагосъема с частей изделий, на которых трещины образовывались, превышали допустимые для бездефектной сушки. Таким образом, зависимость максимально безопасного влагосъема от приведенного фактора формы позволяет предугадать появление и месторасположение трещин.

Еще одним этапом исследований было установление в процессе сушки образцов различной формы из масс различной пластичности и чувствительности к сушке мест расположения трещин. Образцы готовили из вакуумированной (1) и невакуумированной (2) массы на основе смеси владимирской и гжельской глин (масса ПГ, см. раздел 3.1) и массы на основе веселовской глины с добавками отошающих – шамота и нефелин-сиенита (3), таблица 3.13.

Таблица 3.13 – Характеристики используемых в работе керамических масс

Масса	Оптимальная формовочная влажность, %	Коэффициент чувствительности к сушке по Чижскому, $K_c$
1	23	0,7
2	25	0,7
3	28,5	1,2

В табл. 3.13 приведены основные технологические характеристики масс: оптимальная формовочная влажность, определенная с помощью конуса Ребиндера, и коэффициент чувствительности к сушке, определенный по методике Чижского.

Из табл. 3.13 очевидно, что исследуемые массы относятся к мало- (1 и 2), и среднечувствительным (3) к сушке, что позволяет надеяться на получение бо-

лее явной зависимости образования трещин от условий сушки и формы образцов, чем в случае малочувствительной массы.

Образцы различной конфигурации (диски, цилиндры, пластины, параллелепипеды, а также фигурные пластины) формовали методом пластического формования. Максимальный размер образцов составлял – 100 мм, минимальный – 10 мм.

Образцы рассматривали как состоящие из нескольких частей, поведение которых (удаление влаги и связанная с ним усадка) различается (рис. 3.40).

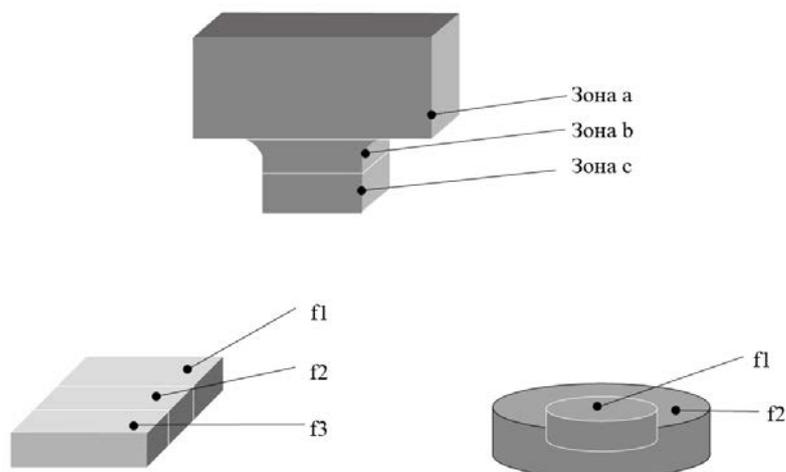


Рисунок 3.40 – Формы образцов и их различные части (зоны), для которых рассчитывали приведенные факторы формы

Фигурные пластины состояли из узкой и широкой частей (соотношение размеров 1,67; 2,5; 5), соединенных переходной частью с различным радиусом закругления (5; 10; 15 мм).

Исследовали также образцы (рис. 3.41), в виде дисков и цилиндров (диаметром от 40 до 80 мм, высотой от 10 до 70 мм), параллелепипедов со сторонами  $a$  – от 40 до 100 мм,  $b$  – от 30 до 54 мм, с высотой  $c$  – от 11 до 40 мм.

Образцы рассматривали, как состоящие из нескольких частей. Часть цилиндрических образцов изолировали полимерной пленкой по образующей высотой  $h$  (рис. 3.41, в), уменьшая тем самым приведенный фактор формы. Высота изолированной части составляла  $1/5 H$ ,  $2/5 H$ ,  $3/5 H$ ,  $4/5 H$ .

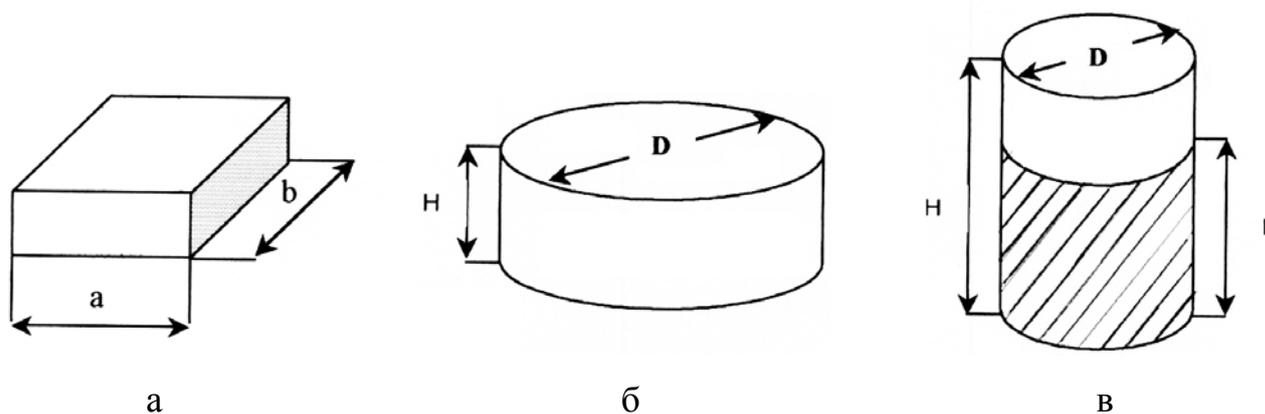


Рисунок 3.41 – Формы исследованных образцов. Пояснения в тексте

Отформованные образцы сушили при температурах от 20 до 200 °С, определяя влажность, момент и место образования трещин. Для увеличения диапазона значений фактора формы части некоторых образцов изолировали тонкой полиэтиленовой пленкой. Кроме того, предпринимали необходимые меры для предотвращения образования на образцах рамочных трещин из-за торможения усадки материалом подставки.

Для образцов, отформованных из одной массы, различной формы и размеров были установлены области безопасных и опасных условий сушки и зависимости критического влагосъема от приведенного фактора формы образцов. Диаграмма опасных и безопасных областей сушки одной серии образцов (в форме диска) показана на рис. 3.42.

Установленные зависимости не имели универсального характера, т. к. на некоторых образцах, проходивших сушку в безопасных, согласно построенных диаграмм, условиях, были зафиксированы трещины.

Для образцов различных форм диаграммы опасных и опасных областей сушки заметно различались (рис. 3.43). Так, для образцов в виде параллелепипеда наблюдали более крутую зависимость максимально возможного влагосъема по сравнению с гораздо более пологой для образцов в виде цилиндра. Такой результат объясняется влиянием симметрии полуфабрикатов: при одинаковых факторах формы сушка образцов различной симметрии в одних и тех же условиях может привести к различным результатам.

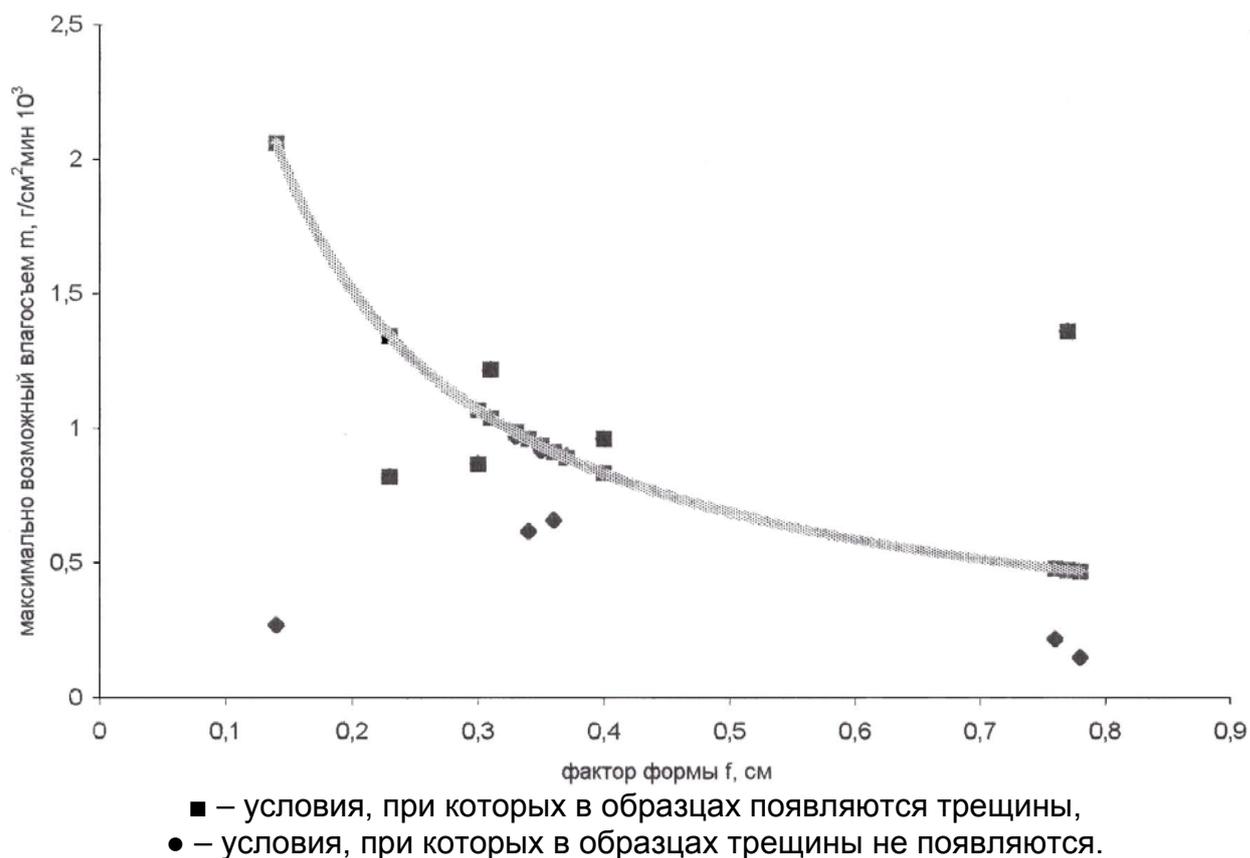


Рисунок 3.42 – Области максимального безопасного влагоудержания с поверхности образца в форме диска, отформованного из массы 2

В общем, подтвердилось, что зависимости максимально допустимой интенсивности сушки от приведенного фактора формы образца даже для одной массы не могут служить надежным ориентиром для определения условий бездефектной сушки полуфабриката. Для всех испытуемых масс были рассчитаны время безопасной сушки по уравнению (3) и установлено, что коэффициенты в уравнениях отличаются для изделий различной формы (табл. 3.14).

Наибольшие по значению коэффициенты, т. е. более резкую зависимость интенсивности или времени безопасной сушки от фактора формы образца показывают полуфабрикаты сложной формы (фигурные пластины) и относительно толстые изделия (параллелепипеды и цилиндры).

Для того, чтобы установить более явные закономерности на образцах в виде фигурных пластин изучали распределение влажности в момент образования трещины. Для этого пластину разрезали на части и определяли влажность

каждой из частей. Полученное распределение влажности подчинялось ранее установленному параболическому закону. Так, в периферийные участки широкой части пластины, образующие ее края, имели влажность 17 %, центральные – 26 %, тогда как в узкой части пластины аналогичные показатели составляли 18 и 22 % (рис. 3.44).

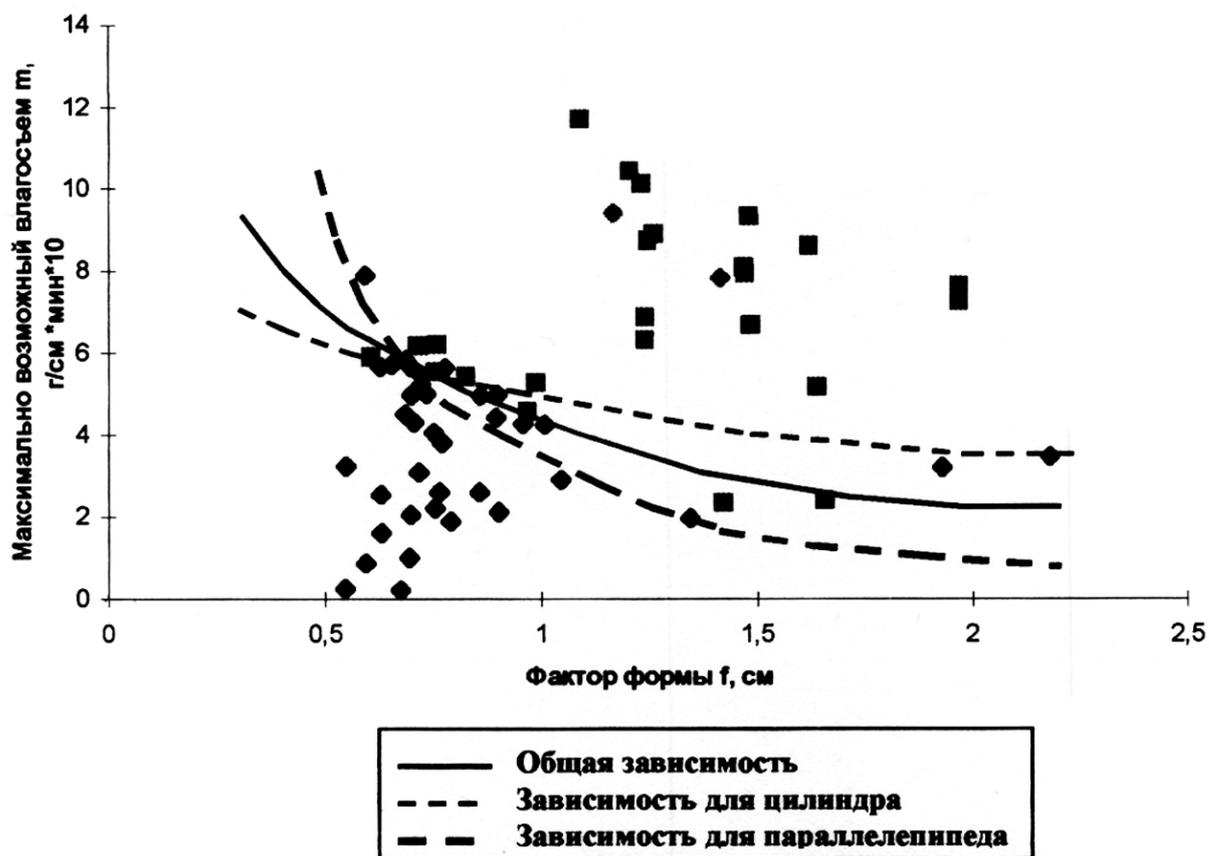


Рисунок 3.43 – Диаграмма опасных и безопасных областей сушки для образцов в виде цилиндра и параллелепипеда. Точками различной формы показаны исследованные области

Таблица 3.14 – Значения коэффициентов в уравнении (3) максимально безопасного влагосъема для изделий различной формы из различных масс

№ массы	Форма образца	Коэффициенты уравнения	
		A	n
1	Фигурная пластина	0,14	-1,14
2	Фигурная пластина	1,32	-2,89
2	Пластина	0,31	-1,05
2	Диск	0,38	-0,86
3	Параллелепипед	3,55	-1,70
3	Цилиндр	4,70	-0,19

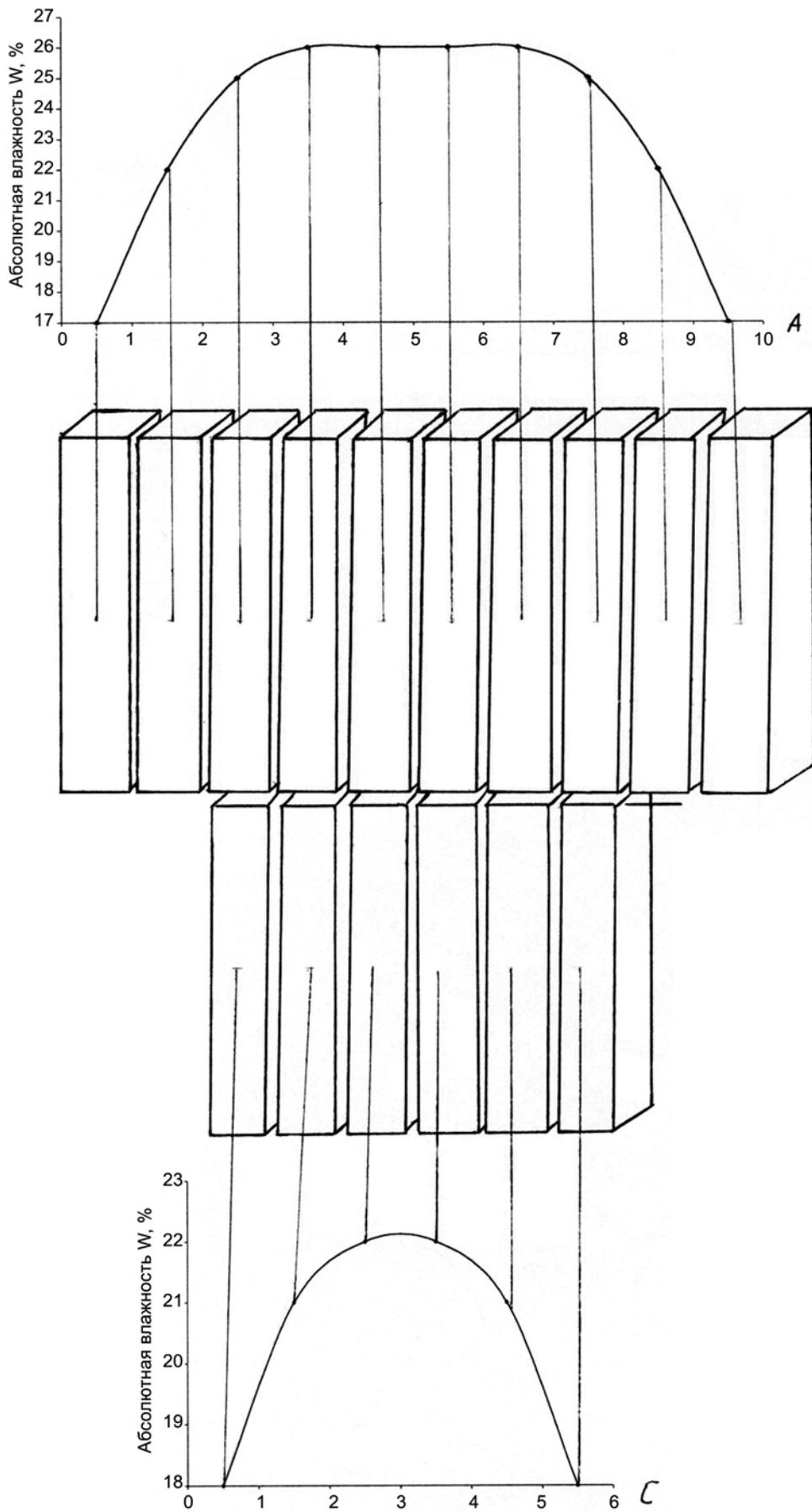


Рисунок 3.44 – Распределение влажности в центральных участках сегментов фигурной пластины в период постоянной скорости сушки

Далее, образцы условно разбивали на части, отличающиеся друг от друга фактором формы, предварительно рассчитанным исходя из геометрических размеров. Для фигурных пластин это были узкая, широкая и переходная части, для образцов простой формы (диски, цилиндры, пластины, параллелепипеды) – размеры частей определяли исходя из расчета фронта движения влажности, выделяя центральную область с повышенным содержанием влаги до окончания 2 периода сушки. Было замечено, что трещины образовывались в местах перехода от узкой к широкой части пластин, причем часть из них образовывалась уже после сушки, вероятно, из-за развития возникших ранее в месте перехода микротрещин (так называемые адсорбционные трещины).

Далее анализировали места расположения трещин на образцах и определяли точки безопасных и опасных режимов сушки для каждой части образцов (рис. 3.45). При этом учитывали трещины, образующиеся непосредственно в процессе сушки. Так для фигурных пластин из массы 1 трещины сушки возникали на фигурных пластинах с общим максимальным фактором формы, у которых соотношение между широкой (А) и узкой (С) частью составляло 1,67, в других случаях было замечено лишь образование адсорбционных трещин.



Рисунок 3.45 – Расположение трещин на фигурных пластинах при различных соотношениях между широкой (А) и узкой (С) частями: а – 5; б – 2,5; в – 1,67

В результате анализа трещинообразования в отдельных частях образцов были установлены следующие факты.

Во-первых, трещины образовывались в тех частях образцов, приведенные факторы форм которых соответствовали определенному диапазону значений, Так, для фигурных пластин из массы 1, независимо от общего фактора формы образца в целом, трещины возникала в той части образца, значение фактора формы которой составляло 15,7 мм. Для фигурных пластин из массы 2-21,9 мм, для пластин – 3,2-3,5 мм, для дисков – 3,3-3,6 мм. При этом, рассчитав влагосъем с данной части образца, можно было определить, что его значения лежат в пределах запрещенной области или на границе диаграммы, построенной для образцов определенной формы и массы, тогда как значения влагосъема частей образца не содержащего трещин находились в разрешенной области.

Во-вторых, в образцах с частично изолированными участками трещины образовывались в зависимости от соотношения факторов формы этих частей, начиная с некоторого предельного значения.

Таким образом, анализ формы глиняного полуфабриката с условным разбиением его на простые объемы может позволить прогнозировать образование трещин в процессе сушки, включая место их появления. Для этого предварительно необходимо определить зависимость допустимой интенсивности сушки от приведенного фактора формы для образцов простых форм одной массы.

### **Выводы по разделу 3.3:**

1. Приведенный фактор формы полуфабриката оказывает решающее влияние на скорость и общее время бездефектной сушки способами конвекции и кондукции, однако не является полностью определяющей характеристикой.

2. Учет формы и симметрии полуфабриката в большей степени определяет безопасные скорости сушки. Для этого необходимо разбиение полуфабрикатов на простые объемы, максимальные факторы формы которых будут определяющими.

3. Способ сушки определяет симметрию полей температуры-давления-влажности, что необходимо учитывать при его выборе для конкретных изделий. При использовании СВЧ-сушки нужно учитывать не симметрию полуфабриката, а его объем.

**Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Формообразование керамических изделий: принцип П. Кюри и тенденции развития [Текст] // Труды Академии технической эстетики и дизайна. 2014. № 3. С. 9-15.

2. **Захаров А. И.** Трещинообразование глиняного полуфабриката [Текст] / Гурьянов А. Л., **Захаров А. И.** // Стекло и керамика. 2007. № 2. С. 24-28.

### **3.4 Влияние характеристик формы полуфабриката на его поведение в обжиге**

Обжиг – важнейшая стадия технологии керамики, в которой изделия приобретают свои окончательные физико-химические свойства. Обжиг изделий заключается в нагреве полуфабриката до высокой температуры, выдержки и последующего охлаждения и описывается физико-химическими процессами спекания и фазообразования (стеклообразования, полиморфных превращений, химических реакций). Время, затрачиваемое на обжиг, керамического изделия не в последнюю очередь определяется его габаритами. Так, время высокотемпературной выдержки, необходимое для выравнивания температуры по объему изделия прямо пропорционально квадрату его толщины [174, С. 143].

Как показано в разделе 2.2, наиболее распространенные дефекты, образующиеся в процессе обжига – надструктурные дефекты формы, в которых преобладают трещины и деформации. Для большого класса бытовых и строительных изделий, особенно плоских, тонкостенных, сложной формы [327], изготавливаемых из каменных масс (керамическая плитка, посуда), фарфора и полуфарфора (санитарно-техническая керамика, посуда, электроизоляторы и т. д.) особый интерес представляют деформации.

В данном разделе рассмотрены вопросы сохранения однородности изделия в процессе обжига и прогнозирование деформации с учетом формы изделий.

#### **3.4.1 Исследование открытой пористости участков обожженного изделия**

Проведенные исследования (см. раздел 3.2) привели к выводу, что основной причиной неоднородности и одной из главных причин образования дефектов является неоднородность, образуемая в результате несоответствия условий формования параметрам (природе и структуре материала), габаритом и форме (симметрии) изготавливаемого изделия. Термическая обработка (рис. 3.17 – рис. 3.21) может, как усиливать (обжиг в определенном интервале температур),

так и сглаживать (обжиг в интервале спекшегося состояния) отличия в характеристиках поверхности изделия. Если выше изучали однородность в основном плоских участках поверхности изделий, то в этом разделе работы приведены результаты изучения открытой пористости различных, преимущественно, криволинейных, участков поверхности изделий сложной формы, подвергнутых обжигу.

Как известно [328], в процессе спекания керамического изделия происходит уменьшение его пористости за счет так называемых «внешнего» спекания (удаления пор через внешние границы, в том числе границы изделия) и «внутреннего» спекания (коалисценции пор внутри материала). Однако, даже в результате спекания керамических материалов до высокой плотности, когда на внешних границах изделия образуется своеобразная «корка» уплотненного слоя частиц с открытой пористостью, приближающаяся к нулю, внутри спеченного изделия присутствует около 5 % остаточных пор [174, С. 115, 329]. Характеристика водопоглощения, определяемая по открытой пористости этой «корки» [293, С. 161] часто служит мерой спекания керамических изделий, однако, обилие различных керамических материалов, различающихся составом и структурой, не дает возможности использовать величину водопоглощения в качестве универсальной характеристики степени спекания разных керамических материалов. С другой стороны, при рассмотрении материалов одного класса водопоглощение успешно используют как такую характеристику, например, для классификации глин по спекаемости.

Таким образом, для характеристики однородности спеченного керамического изделия, можно использовать рассмотренный в разделах 3.1 и 3.2 способ локального капиллярного всасывания, который характеризует открытую пористость поверхности полуфабриката и, соответственно, его водопоглощение.

В качестве исходного материала для изготовления керамического изделия использовали полуфарфоровую массу марки ПФЛ-1/С (состав приведен в табл. 3.1) представляющую собой порошкообразный продукт, предназначенный для изготовления санитарно-технических изделий способом шликерного литья.

Из исходной массы способом шликерного литья были изготовлены образцы, которые после обжига при температурах 1100-1250 °С (включая температурную область, соответствующую рекомендуемой для получения спеченного материала [330]) показали характеристики, указанные в табл. 3.15.

Таблица 3.15 – Некоторые характеристики обожженных образцов

Температура обжига образцов, °С	Водопоглощение, %	Открытая пористость, %
1100	11,5	24,8
1150	6,2	16,1
1200	1,6	3,8
1250	0,4	0,9

Для изучения неоднородности спеченных изделий из шликера на основе исходной массы были изготовлены образцы сложной формы в виде вазы, части которых составляли элементарные геометрические фигуры, характеризующиеся отличающимися друг от друга факторами формы и кривизной поверхности.

Форма образцов показана на рис. 3.46. На этом рисунке также показаны точки измерения капиллярного всасывания, в которых оценивали локальную открытую пористость образцов.

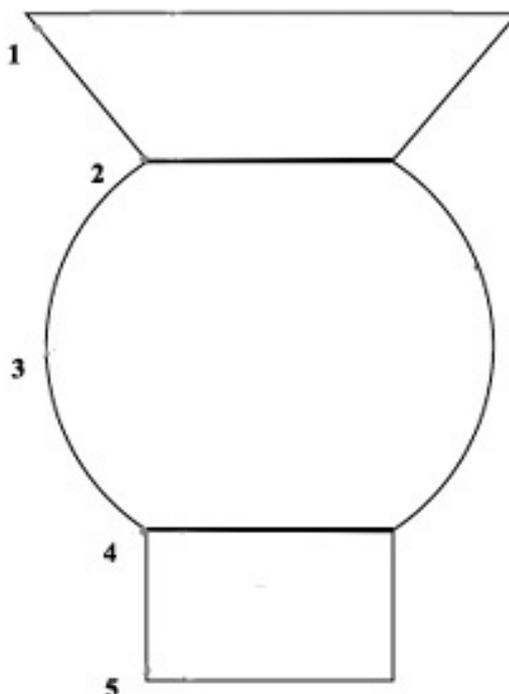


Рисунок 3.46 – Форма исследуемых образцов в виде вазы.

1, 2, 3, 4, 5 – точки, в которых проводились измерения всасывания

Образцы помещали в печь с карбидкремниевыми нагревателями и обжигали последовательно при максимальных температурах, указанных в табл. 3.15. После каждого обжига методом капиллярного всасывания определяли коэффициент всасывания жидкости в местах образцов, обозначенных цифрами от 1 до 5 (рис. 3.46). Коэффициент всасывания жидкости рассчитывали по отношению объема впитавшейся жидкости к корню квадратному от времени впитывания. Как было показано ранее (раздел 3.2) коэффициент всасывания имеет размерность  $\text{мл}/(\text{мин}^{1/2})$  и прямо пропорционален открытой пористости материала.

Метод определения локальной открытой пористости позволил дифференцировать открытую пористость по профилю изделия.

По результатам измерений построили зависимости изменения коэффициента всасывания от температуры обжига изделия (рис. 3.47).

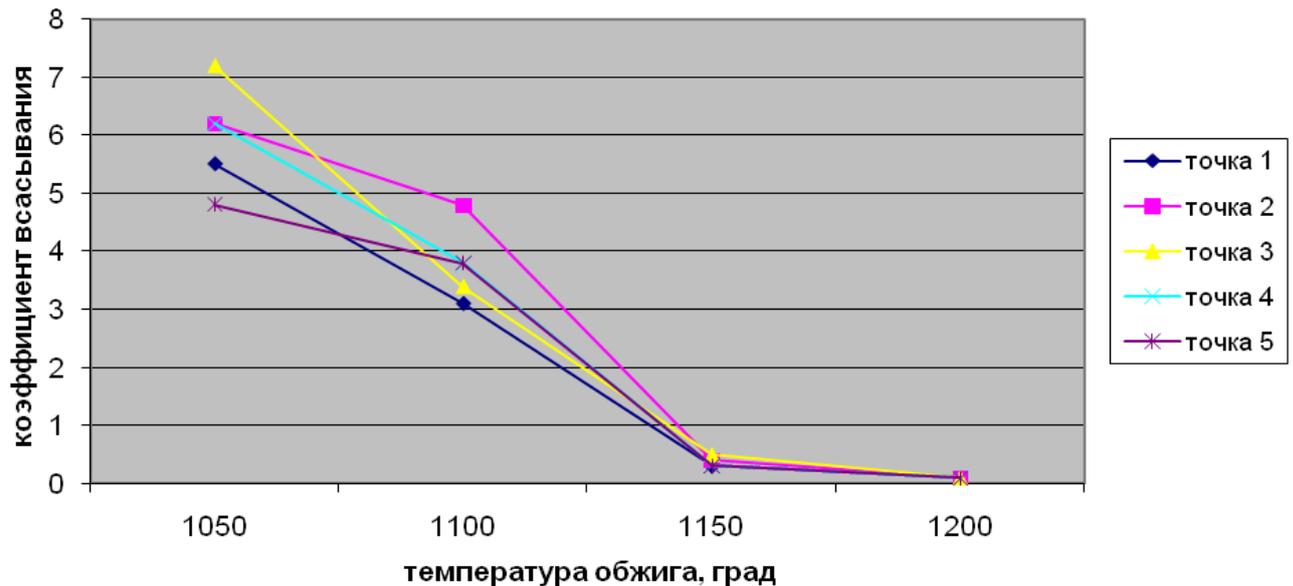


Рисунок 3.47 – Зависимости величины коэффициента всасывания, определенного в различных точках поверхности образца (рис. 3.46) от температуры обжига

Из рисунка 3.47 видно, что наиболее резко (от максимальной) меняется открытая пористость в точке 3, расположенной на наиболее выпуклой поверхности изделия. После обжига при невысокой температуре (1050 °C) в этой точке наблюдается самая высокая пористость, вероятно связанная с растягивающими

напряжениями в начальном периоде усадки материала. Поверхность в точках 2 и 4, расположенных в местах резкого перехода формы изделия, обожженных до температуры начала спекания (до 1150 °С), характеризуется повышенной пористостью.

Край изделия (точка 1) вызывает наибольшие сложности при глазуровании изделий из-за того, что в случае повышенной температуры уфельного обжига, на нем плохо держится глазурь (дефект «летелый край»). После обжига при температуре 1150 °С край изделия имел наименьшую пористость.

Участок, расположенный у основания изделия (точка 5), имеет низкую открытую пористость после обжига при температуре ниже температуры интенсивного спекания, возможно, из-за влияния нагретого пода печи, который за счет теплопроводности в периоде обжига (период нагрева) приводит к превышению температуры по сравнению с температурой других участков изделия.

При достижении температуры обжига 1150 °С разница в открытой пористости различных участках изделия практически сходится на нет. Таким образом, для такого материала, как полуфарфор, спекание которого проходит по жидкофазному механизму, неоднородности, заложенные на стадии формования изделий (см. раздел 2.2), практически нивелируются при достижении температур спекания. Это вывод в целом совпадает с тезисом о релаксации в процессе обжига напряжений в полуфабрикатах (прессовках), созданных при формовании [316, С. 287-288].

Выводы:

1. Локальная открытая пористость поверхности обожженного изделия зависит от кривизны участка изделия.
2. С повышением температуры обжига разница в открытой пористости различных участков изделия практически сходится на нет.

При анализе результатов экспериментов, описанных выше, можно прийти к выводу, что основную опасность для изделий из материалов на основе глины, спекаемых по механизму жидкофазного спекания представляют не дефекты, заложенные на предыдущих технологических стадиях – неоднородности, воз-

никающие при формовании и трещины, возникающие в процессе сушки, т. к. эти дефекты либо нивелируются при обжиге, либо становятся явными до него и изделия с ними отбраковываются, а деформации, большая часть которых связана с ошибками в проектировании формы и конструкции изделия и неправильном учете поведения материала при обжиге. Поэтому следующая часть работы посвящена разработке методики учета деформации изделий на основе фарфора, как наиболее распространенного материала, спекающегося по жидкофазному механизму и, следовательно, склонного к деформации.

### **3.4.2 Проблемы исследований деформации керамики**

Деформация изделий при обжиге – проблема, находящаяся в центре внимания исследователей, занятых в областях технологии огнеупоров, находящихся при эксплуатации в условиях постоянного или переменного действия высоких температур и изделий, в состав которых входит большое количество стеклообразной фазы. К последним принадлежат изделия из ряда фарфора, полуфарфора, каменной керамики и разнообразных стеклокристаллических материалов технического назначения (в том числе ситаллов). К деформации более склонны изделия с тонкими стенками и горизонтальными плоскостями [327, С. 31], например, типичные изделия плоской посуды (блюдца, тарелки, блюда). При многообразии конструкций сложных форм, характерных для посудного ассортимента, вопросы прогнозирования деформации всегда стоят на повестке дня [220, С. 8-43, 202-204]. В плоских строительных изделиях типа плиток и плит при наметившейся тенденции увеличения габаритов деформация также один из часто встречающихся дефектов [223, С. 274-275, 331].

Анализ поведения в обжиге фарфоровых изделий показывает, что увеличение толщины стенки изделия и упрочнение конструкции ребрами жесткости не могут полностью предотвратить деформацию. Так, на одном из крупнейших заводах по выпуску санитарно-технических изделий, несмотря на относительно толстые стенки изделия (более 10 мм) и значительный опыт оптимизации конструкции изделий, на долю брака из-за деформации при обжиге приходится

свыше 1 из 15 % общего брака продукции. Так как наибольшая доля дефектов связана с повреждениями глазурного слоя, брак изделий из-за их деформации довольно частое явление.

Основные виды деформации, встречающейся при обжиге фарфоровых унитазов проиллюстрированы на рис. 3.48.



Рисунок 3.48 – Виды деформаций при обжиге унитазов: а – деформация под собственным весом (отклонение от горизонтали); б – деформация сливного отверстия (овальность); в – прогиб стенки в результате неравномерной усадки

Приведем пример результатов исследования деформации санитарно-технического изделия – умывального стола. Его сложная форма и значительная масса приводит к сложной картине деформации (рис. 3.49), которую нельзя оценить по методу треугольников, указанному в [97, С. 160-182].

На рис. 3.49 пунктиром нанесен контур обожженного изделия. Измерения усадки проводили по точкам, указанным цифрами у кривой контура изделия. Величины линейной усадки, относительно «нулевой точки», совпадающей с началом координат, указаны в табл. 3.16.

Из данных, представленных на рис. 3.49 и в табл. 3.16 можно сделать вывод, что усадка (деформация) в различных точках изделия с низкой симметрией (плоскостной  $m$ ) определяется его конструкцией и не может быть определена исходя из усадки стандартных образцов.

При стремлении сократить затраты за счет уменьшения времени обжига, что наиболее эффективно можно сделать, интенсифицируя процесс жидкофазного спекания, увеличение подвижности спекаемого материала ведет к увели-

чению опасности деформации изделий. Это обстоятельство придает разрабатываемой теме особую актуальность.

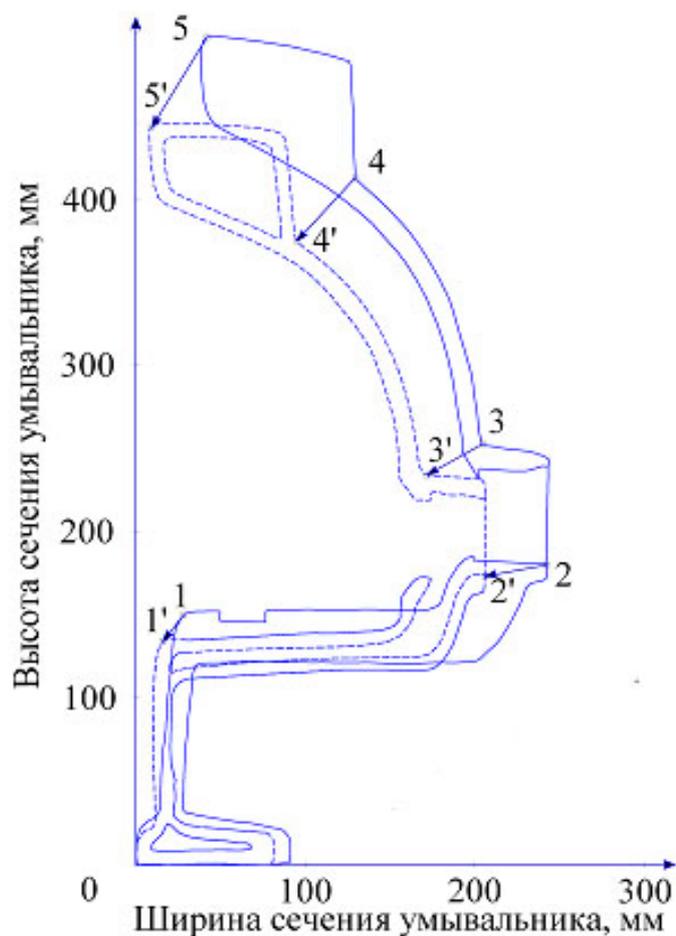


Рисунок 3.49 – Реальная деформация санитарно-технического изделия (умывальника), измеренная по усадке меток после обжига в туннельной печи по штатному режиму. Точки с верхним индексом – положение, занятое после обжига

Таблица 3.16 – Огневая линейная усадка в разных точках фарфорового умывальника, рассчитанная по изменениям расположения меток, нанесенных на полуфабрикат

№ метки	Расстояние между метками, мм	Усадка, рассчитанная относительно «нулевой точки», %
1-1'	20,7	13,8
2-2'	36,6	13,5
3-3'	38,6	12,9
4-4'	50,3	12,0
5-5'	61,5	12,3

В выводах к разделу 2.2 было сказано, что одним из критериев, обобщающих поведение керамического полуфабриката на различных технологических стадиях, является вязкость материала. В разделе 3.2 показано, что для сохранения однородности полуфабриката при формовании требуется соблюдение определенного баланса между величиной внешнего воздействия (усилиями формования) и способностями материала к перестройке структуры (вязкости). Если реакция материала на действующие извне нагрузки превышает допустимые пределы, то избыточная энергия аккумулируется в дефектах структуры или дефектах формы. В процессе обжига наиболее резкие изменения температурного поля ведут к разрыву сплошности материала – дефектам структуры – образованию и развитию трещин. При менее резких (растянутых во времени) изменениях температуры, сопряженных с действием механических нагрузок, полуфабрикат может испытывать недопустимые изменения размеров (деформацию). В этом случае основным критерием поведения материала, позволяющим оценить возможность таких изменений, будет высокотемпературная вязкость.

При механических нагрузках, в том числе и под действием собственной массы, распределение которой по объему полуфабриката определяется конструкцией, материал испытывает неупругую деформацию. Учет деформации, происходящий при спекании, в ряде случаев дает возможность максимально приблизиться к требуемой форме изделий [106, С. 60-61], однако для точного прогноза изменения формы изделия требуется точный расчет.

Определение и, соответственно, прогнозирование неупругой деформации возможно при использовании методов численного моделирования, среди которых наиболее применим метод конечных элементов (МКЭ), используемый в системах автоматизированного инжиниринга (CAE) [332]. Принципиальная схема моделирования по методу конечных элементов представлена на рис. 3.50.

Наиболее сложный этап моделирования – задание адекватной модели поведения материала, начальных и граничных условий.

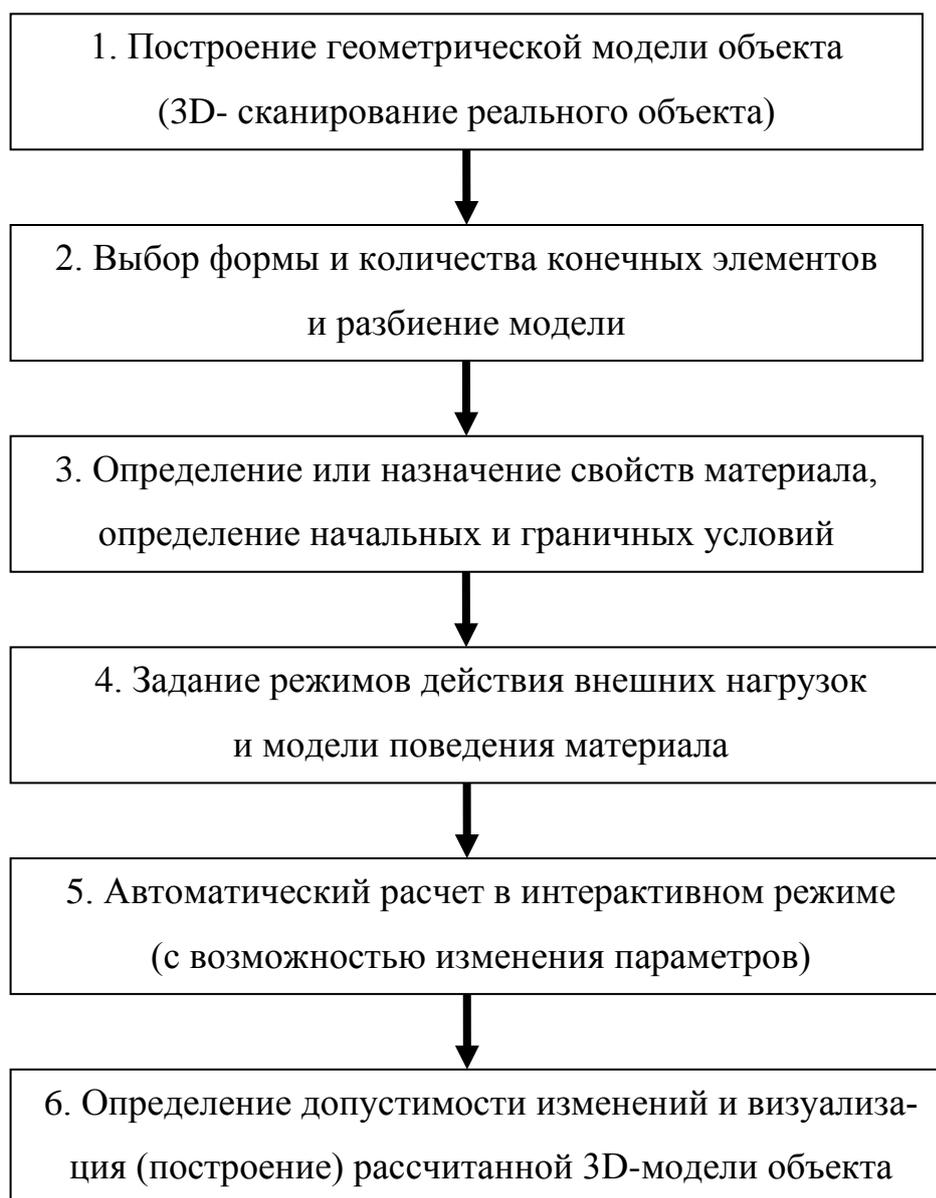


Рисунок 3.50 – Принципиальная схема моделирования изменений объекта сложной формы при использовании метода конечных элементов

Наиболее распространенные инструменты для моделирования в инженерном материаловедении – программы ANSYS (продукт компании ANSYS, Inc. USA) [333, 334]. Программы используют в основном для сложных инженерных расчетов наиболее распространенных конструкционных материалов (металлов, пластиков). Для моделирования деформационного поведения керамических изделий (полуфабрикатов) задача выбора модели спекающегося (или деформируемого при формовании) материала представляется весьма сложной: феноменологические модели [335] имеют преимущество перед структурно-

механическими [336, 337], так как последние не учитывают многофазового состава керамических материалов (пористая матрица или компоненты формуемой смеси обычно состоит из 2 и более кристаллических и аморфных фаз с различными характеристиками).

В свою очередь, феноменологические модели основаны на законах механики сплошных сред, характеризующих пластическую деформацию системы под влиянием внешних нагрузок.

В работе [338] утверждается, что определить феноменологические параметры моделей можно на образцах простой математической формы, проведя достаточное количество экспериментов для определения сдвигового и объемного деформирования.

Наиболее актуальным расчет деформации изделий в обжиге представляется для материалов группы фарфора, имеющих в своем составе значительное количество плавней. Фарфоровые изделия, прежде всего посуду, формуют различными способами – раскаткой, шликерным литьем, изостатическим прессованием. Однако, даже при использовании изостатического прессования, позволяющего снизить количество временной технологической связки и, соответственно, усадку, наблюдается деформация изделий, которая требует учета сил трения о подложку [339].

Известны работы по моделированию прессования и спекания керамических полуфабрикатов различной конструкционной, строительной и бытовой керамики (а также металлов) [116, С. 381, 340, 341] с использованием метода конечных элементов на основе феноменологической модели поведения порошков материалов, в которых проведена оптимизация формы. В работе [116, С. 397] указано, что изменения формы полуфабрикатов в процессе формования (прессования) превышают значения деформации при обжиге.

Расчеты по методу конечных элементов необходимо совмещать с экспериментами, т. к. недостаток экспериментальных данных – основное препятствие построения адекватных моделей [340, С. 229, 342-344].

Феноменология жидкофазного спекания керамических порошков изложена в работах Д. Кингери [345], В. Скорохода [346], который использовал модель вязкого течения материала с дисперсно распределенными порами.

На основе модели Д. Кингери Е. Олевски [347] разработал модель нелинейно-вязкого течения уплотняемого и деформируемого в процессе спекания керамического материала с равномерно распределенной пористостью. Модель учитывает эквивалентное напряжение спекания, сдвиговую и объемную вязкости и на ее основе возможен расчет деформации полуфабриката при спекании [348]. Е. Олевски на основе бингамовской модели поведения материала применил безразмерный параметр искажения формы [349] при расчете деформации образцов в виде цилиндра. В его работах учитывалась изначально неоднородная структура (разная пористость) и форма образцов [348, С. 1919-1920].

Модель вязкого течения при спекании также использовали для расчетов и другие исследователи [350-355]. Модификацию моделей сплошных сред проводили в направлении уточнения свойств материала, состоящего из отдельных частиц, с учетом их взаимодействия (микромеханические, молекулярно-динамические и мультичастичные модели) [356].

Необходимо отметить, что упомянутые модели упрощают реальные условия нагружения и объемного напряжения материала, представляя их изотропными. На самом деле, как было показано выше (разделы 2.2 и 3.2), анизотропия внешних воздействий представляет собой серьезную проблему для сохранения однородности материала.

Существующая анизотропия воздействий учитывается в некоторых работах. Так, с использованием программы ABAQUS в работе [342, С. 376] рассчитывали деформационное поведение спекаемых полуфабрикатов с учетом напряжения спекания и объемной и сдвиговой вязкости. При этом учитывали не только распределение массы и трение о подложку, но и существующий при обжиге градиент температур. В работе [357] методами Монте Карло и конечных элементов рассчитывали структуру материала в различных местах изделий

сложных форм (например, чашек), неоднородности которой определяются условиями объемно-напряженного состояния при формовании и спекании.

Особую сложность представляет измерение высокотемпературной вязкости керамического материала во время его спекания, осложненного наличием градиентов напряжений [358-360].

Известны различные методы определения вязкости керамических материалов [342, С. 376, 343, С. 347, 361-372]. Методы сводятся либо к одноосному постоянному (циклическому, временному) нагружению нагреваемых образцов, либо к исследованию их деформации в условиях 3-точечного изгиба. Наиболее современные способы совмещены с дилатометрией, в том числе бесконтактной.

При применении способов одноосного нагружения образцов [367, С. 447, 373] сложно учитывать влияние приложенной нагрузки, если она сравнима с усилиями, развивающимися при спекании материала. Длительное приложение даже небольшой нагрузки приводит к анизотропии усадки [372, С. 439-440].

При выборе способа испытаний надо учитывать предысторию материала, т. е. условия его нагрева, которые д. б. подобны условиям обжига изделий [367, С. 445].

При расчете деформации образцов различают 2 части общей деформации: объемную ( $\varepsilon_v$ ) и сдвиговую ( $\varepsilon_{Dz}$ ). Под последней понимают осевую деформацию, совпадающую по направлению с направлением усилия. Расчеты для одноосно нагруженного цилиндрического образца (индексы  $z$  и  $r$  соответствуют оси образца и его радиусу) проводят по формулам 35-37:

$$\varepsilon_z = \ln \frac{l}{l_0} \quad \text{и} \quad \varepsilon_r = \ln \frac{r}{r_0}, \quad (35)$$

$$\varepsilon_v = \ln \frac{V}{V_0} = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r, \quad (36)$$

$$\varepsilon_{Dz} = \frac{2}{3}(\varepsilon_z - \varepsilon_r), \quad (37)$$

где  $l$  и  $r$  – текущие высота и радиус образца,  $V$  и  $V_0$  – его текущий и начальный объемы.

При спекании образца под действием внешней нагрузки деформацию можно представить как [372, С. 439]:

$$\dot{\varepsilon}_z = \dot{\varepsilon}_z^{free} + (\sigma_z / \eta_u), \quad (38)$$

где  $\dot{\varepsilon}_z^{free}$  – скорость усадки при отсутствии внешней нагрузки,  $\dot{\varepsilon}_r$  и  $\dot{\varepsilon}_z$  – радиальная и осевая скорости деформации соответственно,  $\eta_u$  – вязкость Трутона и  $\nu_\eta$  – вязкий коэффициент Пуассона.

Деформация под нарастающей нагрузкой эффективна для уплотнения нанокристаллических порошков диоксида циркония [374].

Моделировании деформации образцов, нагруженных по одной оси, также проводят с помощью циклической дилатометрии [367, С. 447], однако наиболее распространенными видами нагружения для расчета деформации остаются испытания при 3 или 4-точечном изгибе [360, С. 867, 363, С. 197, 366, С. 833].

Наиболее корректными, создающими в материале напряжения чистого сдвига, для расчета вязкости представляются нагружение полнотелых и пустотелых (труб) образцов круглого сечения способом кручения [361, С. 11-29, 375].

Вязкость спекаемого материала фарфорового состава изменяется по мере изменения пористости и появления новых фаз. В работе [339, С. 339] отмечено возрастание модуля Юнга с уменьшением пористости материала и образованием фазы муллита.

Для определения вязкости материала при различных способах нагружения (одноосное сжатие, изгиб, кручение) используют основную реологическую зависимость скорости деформации от напряжения [367, С. 450, 376]. При этом можно рассматривать реологическое поведение спекаемого фарфорового материала с высокой долей стеклофазы, как деформируемую несжимаемую жидкость ньютоновского типа, с учетом изменяющейся пористости, подобно спекающемуся стеклу [377]. При этом напряжение спекания определяется как сила, уравнивающая усадку, которая возрастает с уменьшением пористости материала [378, 379]. Для спекающихся полуфабрикатов из порошков стекла и оксидов алюминия и магния значения величин напряжения оценивали от 0,1-

0,5 МПа для начала интервала спекания до 0,8-2,5 МПа в его конце [365, С. 499, 380, 367, С. 450].

Известно [328, С. 7], что движущаяся сила спекания – сокращение удельной поверхностной энергии, что позволяет определить напряжение спекания как [347, С. 45, 348, С. 1917]:

$$P_L \equiv \frac{\partial F}{\partial \vartheta}, \quad (39)$$

где  $F$  – свободная поверхностная энергия, приходящаяся на единицу массы пористой среды;  $\vartheta$  – удельный объем.

Для прогнозирования коробления или растрескивания спекаемых полуфабрикатов, вызываемых наличием градиентов температур в обжиговом агрегате, используют построение кривых спекания, которые строят по изменению плотностей при обжиге с различной скоростью. В свою очередь, испытания проводят с помощью дилатометрии, а расчеты – с помощью метода конечных элементов [381, 382]. Для расчетов необходимо рассчитывать энергию активации спекания (уравнение Аррениуса), предполагая, что спекание материала проходит по одному преобладающему механизму.

Существующий градиент температур в печи приводит к наличию градиента непосредственно в обжигаемом изделии, его значение возрастает с увеличением габаритов изделия. В этом случае моделирование поведения изделий может существенно сократить цикл обжига [383, 384]. При расчетах необходимо учитывать загрузку печи изделиями и огнеприпасом, на котором размещают изделия [342, С. 377].

Для расчета деформации также необходимо учитывать состав и структуру материала [385], которые могут меняться во время обжига, чем особенно отличается фарфор. Фазообразование в фарфоре связывают с частичным растворением кварцевой составляющей в стекле полевошпатного состава с образованием первичного и вторичного муллита [386, 387]. Скорость и полнота протекания этих процессов (растворения-кристаллизации) оказывает решающее значение как на деформационное поведение изделия при обжиге, так и на конечные

свойства изделия. В интервале спекания фарфора пиропластическая деформация в основном зависит от скорости растворения кварца (в частности, от дисперсности его зерен), однако обогащение жидкой фазы тугоплавким кремнеземом повышает вязкость спекаемой массы и на конечном этапе (интервал спекшегося состояния) склонность к деформации уменьшается [388].

Сформировавшаяся структура твердого фарфора представляет собой композиционный материал с матрицей в виде полевошпатового стекла, в которой распределены зерна кварца и реликты (остатки) каолинита и полевого шпата со связанными с ними кристаллами первичного и вторичного муллита [389].

Способ подготовки и формования полуфабрикатов на основе глин оказывает существенное влияние на их поведение при обжиге [390], что связано с анизотропией частиц глинистых минералов [391], расположение которых в материале связано с симметрией формирующих усилий. В работе [392] утверждается, что влияние формы изделия на деформацию в основном определяется правильностью выбора условий формования, что, по нашему мнению, и есть показатель соответствия направления (симметрии) и меры внешних воздействий.

Выводы:

1. Исследованию деформаций, происходящих в процессе обжига керамических изделий, уделяется большое внимание, особенно если речь идет материалах, спекаемых в присутствии большого количества жидкой фазы (фарфор), а также изделиях сложной формы и больших габаритов.

2. Прогнозирование деформации керамических изделий на примере фарфора рациональнее проводить с использованием компьютерных программ, реализующих метод конечных элементов.

3. Для прогнозирования можно использовать феноменологические модели Скорохода-Олевского, для чего необходимо определение высокотемпературной вязкости материала под нагрузкой по методам консольного изгиба, растяжения и кручения.

### 3.4.3 Прогнозирование деформации керамического изделия при обжиге

Объектами для определения деформации были выбраны образцы простой геометрической формы, изготовленные из фарфоровых масс различного состава. Особенности составов масс приведены в таблице 3.17. Пластичные материалы были представлены глинами и каолинами; плавни – полевыми шпатами, пегматитами, кварц-полевошпатными породами; отощающие – кварцевым песком и шамотом (молотым боем изделий). Водопоглощение и пористость обожженных образцов, их механическую прочность определяли по методикам, приведенным в разделе 3.1. Микроструктуру спеченных материалов изучали методами оптической и электронной микроскопии (см. раздел 3.1).

Максимальная температура обжига образцов составляла 1200 °С, температура была выбрана из следующих соображений. Для всех исследованных материалов при этой температуре наблюдается активное спекание материала, сопровождающееся уплотнением и набором прочности.

В ходе предварительных исследований определили эффективную вязкость материала, которую рассчитали по величине остаточной стрелы прогиба образцов при трехточечном нагружении в течение обжига при максимальной температуре 1200 °С на отпрессованных образцах в виде балок. Расчет вели по методике, приведенной в [250, С. 33-35]. Результаты представлены в табл. 3.17, где они сопоставлены с исходным составом масс.

В той же таблице представлены результаты петрографического анализа, который показал, что после обжига при 1000 °С, материалы характеризуются различной величиной ширины каймы вокруг зерен кварца. Изучение микроструктуры спеченных материалов методами оптической и электронной микроскопии и сопоставление с расчетами вязкости показало, что эффективная вязкость и, следовательно, стойкость к деформации под нагрузкой прямо пропорциональны ширине каймы стеклофазы вокруг зерен кварца. При средней ширине каймы вокруг зерен кварца в различных видах фарфора 1,5-2 мкм, она достигая в фарфоре «Париан» и «Бона чайна» величины 3 мкм. Таким образом, обогащение жидкой фазы, образующейся в процессе обжига огнеупорной кремне-

земистой составляющей, приводило к увеличению эффективной вязкости материала. В этих же образцах количество муллита составляло от 3-4 % для костяного фарфора до 8-10 % для электротехнического фарфора.

На рис. 3.51 показана микроструктура аншлифов различных видов фарфора после травления фтористоводородной кислотой, полученная с помощью электронного микроскопа. На фотографиях видны иглообразные и волокнистые частицы вторичного муллита и витлокита (костяной фарфор), оказывающие значительное воздействие на реологические свойства материала в процессе обжига. Так, несмотря на значительное количество плавней и, соответственно, жидкой фазы, образуемой при высокой температуре, мягкий фарфор характеризуется достаточно высокой вязкостью материала.

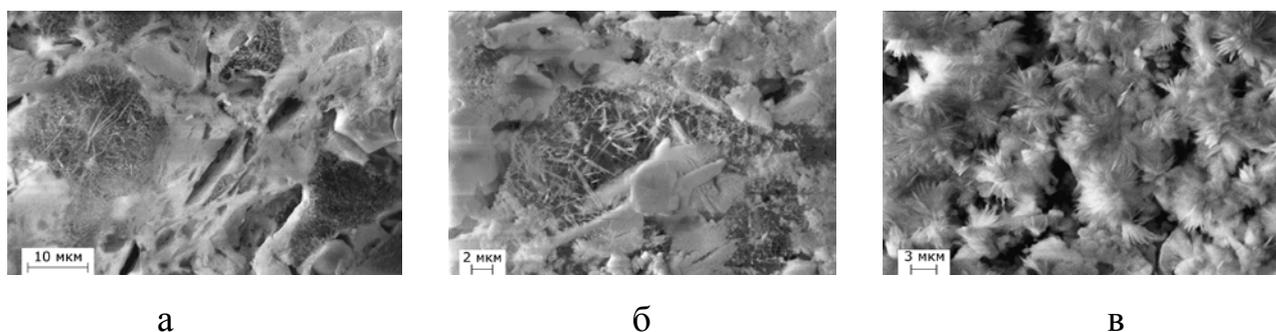


Рисунок 3.51 – Микроструктура образцов разных видов фарфора: твердый фарфор (Дулево) (а), (Гжель) (б), мягкий костяной фарфор («Бона чайна») (в)

Таблица 3.17 – Состав исходной масс и эффективная вязкость керамических образцов, рассчитанная по величине деформации после обжига при 1200 °С

Фарфор	Массовое содержание в составе шихты, %			Ширина каймы вокруг зерен кварца, мкм*	Вязкость, МПа·с
	пластичные	плавни	отошающие		
Электро-технический	47	26	27	1-2	100-300
Санитарно-технический	48	21	31	1-2	100-300
Хозяйственный	55-57	20-25	20-23	1-2	100-400
«Париан»	34-40	60-67	—	2-3	>400
«Бона-чайна»	25-30	70-75	—	2	>400

На первом этапе экспериментов решали задачу определения температурной вязкости на образцах простой формы при простых способах нагружения – при усилиях изгиба. Образцы закрепляли огнеупорными брусками, так что они образовывали консоль, деформирующуюся под собственным весом (рис. 3.52 и рис. 3.53). Стрелу прогиба образцов измеряли посредством катетометра в течение высокотемпературного нагрева со скоростью  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

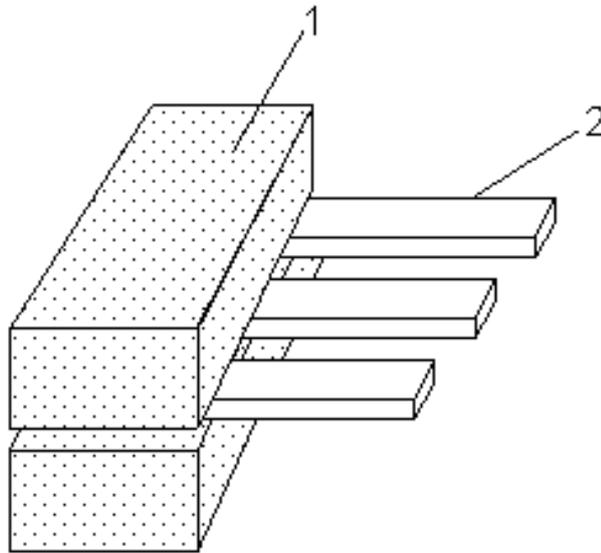


Рисунок 3.52 – Схема крепления образцов:

1 – огнеупорный брусок, 2 – испытываемые образцы

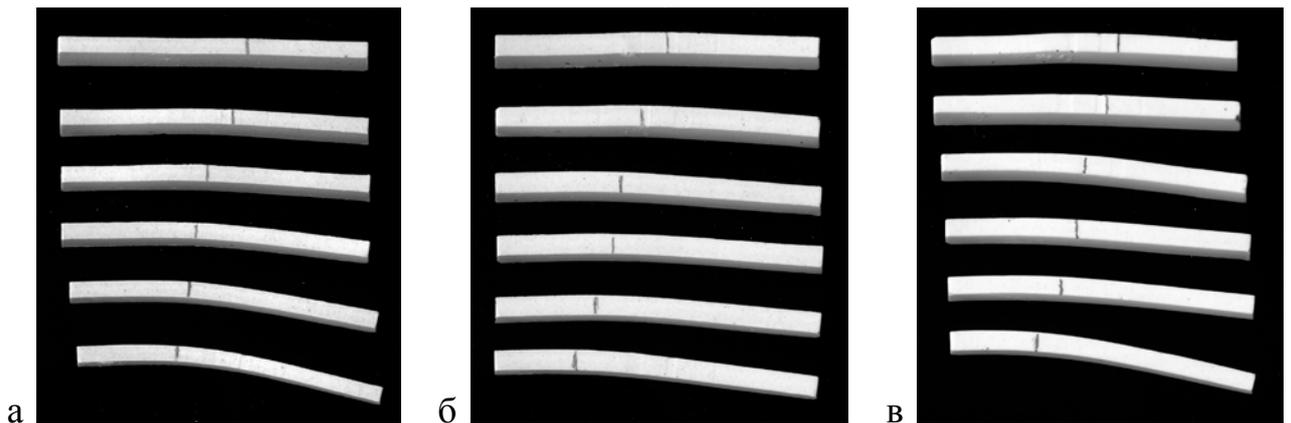


Рисунок 3.53 – Деформированные образцы-консоли: а – электротехнический фарфор, б – хозяйственный фарфор, в – мягкий костяной фарфор «Бона-чайна»

Основой для расчетов вязкости спекаемого материала являлись формулы, предложенные Н. В. Соломиным [250, С. 33-43]. На обожженных образцах в

виде балок прямоугольного сечения измеряли деформацию (стрелу прогиба) под собственным весом:

$$f = Pl^3\tau/2bh^3\eta \quad (40)$$

где  $f$  – максимальная стрела прогиба,  $P$  – собственный вес консольной балки габаритами  $b$  (ширина),  $h$  (толщина), испытующей прогиб свободного конца длиной  $l$  в течение времени  $\tau$ ,  $\eta$  – эффективная динамическая вязкость.

После преобразования формулы, получили выражение (41) для расчета средней эффективной вязкости  $\eta_{cp.}$  для промежутков времени  $\Delta\tau$ :

$$\eta_{cp.} = \frac{Pl^3\Delta\tau}{2bh^3\Delta f} \quad (41)$$

Для расчета использовали полиномиальные регрессии времени обжига  $\tau$  и стрелы прогиба  $f$  по температуре с достоверностью аппроксимации не ниже 0,99.

В результате проведенных экспериментов и расчета вязкости была получена зависимость логарифма эффективной вязкости от температуры нагрева образца в процессе его обжига. На рис. 3.54 показана зависимость, полученная для мягкого костяного фарфора.

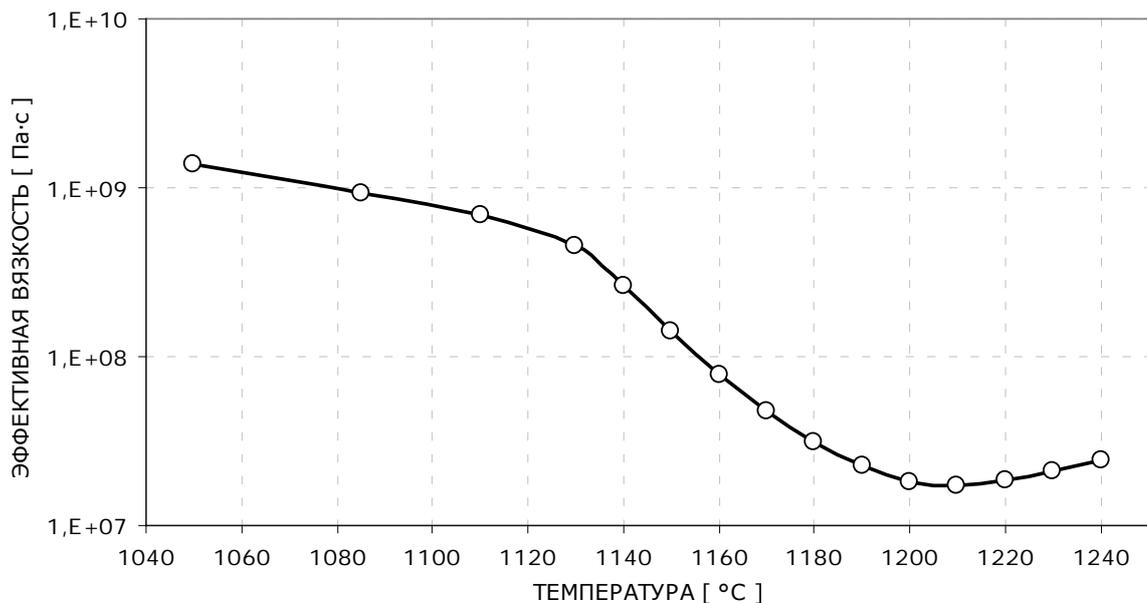


Рисунок 3.54 – Зависимость логарифма эффективной вязкости образца мягкого костяного фарфора «Бона чайна» от температуры, построенная по результатам деформации консолей под собственным весом

В диапазоне температур 1180-1250 °С наблюдали максимальную деформацию, связанную, очевидно, с увеличением количества полевошпатового расплава. В диапазоне температур 1220-1250 °С вязкость материала незначительно возрастала, что обусловлено увеличением количества вторичного муллита, образование которого отмечали после обжига при температуре 1100 °С. При исследовании образцов после обжига температуре 1200 °С была отмечена кристаллизация муллита в виде зерен игольчатой формы размером 3-4 мкм.

Было отмечено, что деформации подверглись образцы с достаточно малой длиной незакрепленного конца (консольной части образца), что соответствует низкому пределу текучести материала в исследуемом температурно-временном диапазоне, что характерно для жидкостей с ньютоновским характером реологического поведения. Таким образом, исследуемый фарфор при нагреве до высоких температур, несмотря на значительное содержание кристаллических фаз, ведет себя как высоковязкая малоструктурированная жидкость.

В процессе проведения испытаний методом консольного нагружения было замечено, что при малой длине консолей и их небольшого сечения сложно избавиться от влияния температурных градиентов в печи (приходилось прибегать к использованию специальных капсулей), а при увеличении сечения образцов необходимо увеличивать нагрузку для обеспечения значительной деформации. В результате было решено, что метод деформирования образцов фарфора консольным нагружением балок под собственным весом не подходит для определения вязкости чистого сдвига.

Были проведены эксперименты по нагреву образцов при одноосном нагружении, которые позволили аналитически разделить деформацию, вызванную внешней нагрузкой от деформации, обусловленной усадкой в процессе спекания материала. Форма образцов, изготавливаемых из массы для производства полуфарфора способом шликерного литья, представлена на рисунке 3.55.

Образцы предварительно обжигали при максимальной температуре 900 °С с выдержкой 0,5 ч. Испытания проводили при постоянной скорости нагрева от 900 °С до 1300 °С.



Рисунок 3.55 – Внешний вид образцов после спекания при максимальной температуре 1200 °С

Проведенные расчеты деформации и усадки образцов показали, что данный метод может дать удовлетворительное решение для вязкости при эквивалентном напряжении спекания, существенно превосходящем напряжение, задаваемое внешней нагрузкой, так чтобы его влиянием на усадку можно было пренебречь. Было решено, что полученная в результате проведенных экспериментов деформации образцов при растяжении, полиномиальная функция вязкости может быть использована при моделировании деформации полуфарфора в области относительно низких температур обжига (до 1150 °С).

Для обеспечения отдельного определения деформации обжигаемых образцов под нагрузкой и деформации, вызванной спеканием материала (усадки), необходима разработка метода на базе установки, реализующей метод кручения образцов в виде тонкостенных трубок.

Сконструированную установку, описанную в разделе 3.1, использовали для экспериментального определения температурной зависимости вязкости. Усилия чистого сдвига реализовывались на образцах в виде трубок с особой формой манжетов для крепления (рис. 3.56).

Трубки формовали из фарфоровых и полуфарфоровых составов способом шликерного литья в гипсовые формы. Толщина стенки рабочей части (середин-

ны образца) длиной 25-35 мм составляла 2,5 мм, что в 2-3 раза меньше толщины стенок манжетов.

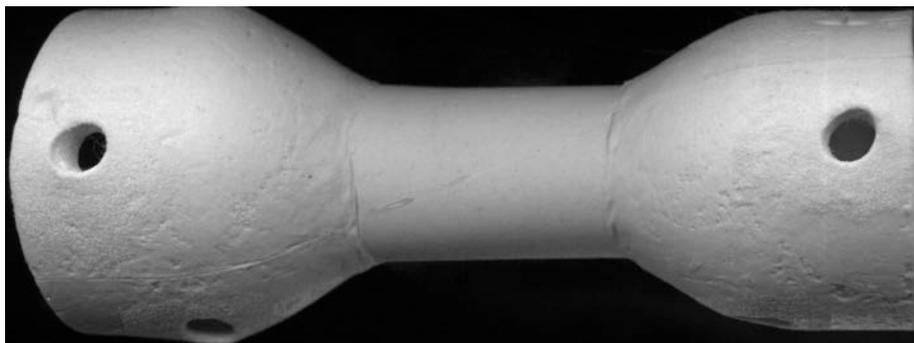


Рисунок 3.56 – Образец, использованный для экспериментального определения температурной зависимости вязкости

После сушки образцов в их манжетах выполняли отверстия для штифтов. Для контроля свободной усадки при обжиге использовали образцы-трубки. Образцы предварительно обжигали при максимальной температуре 900 °С с выдержкой 0,5 ч.

Метод нагружения, реализуемый на установке, (чистый сдвиг, реализуемый в условиях кручения трубок) позволяет отделить высокотемпературную деформацию материала под нагрузкой от деформации, вызванной спеканием материала и сопровождаемой усадкой.

Расчеты прогнозируемой деформации проводили по методу конечных элементов на программе ABAQUS. В качестве модели для описания реологического поведения спекаемого материала состава фарфора была принята модель линейно-вязкого течения Скорохода-Олевского (см. раздел 3.4.2), которая характерна также для явления ползучести.

Испытания проводили при нагреве со скоростью 10 град/мин до температуры 890 °С, далее со скоростью 2 град/мин до 1300 °С (1350 °С – для твердого хозяйственного фарфора).

Определения вязкости проводили на образцах, изготовленных из масс хозяйственного, санитарно-технического фарфора и полуфарфора. Выбор материалов для экспериментов определялся тем, что хозяйственный фарфор и по-

луфарфор применяются в основном для изготовления тонкостенных изделий сложных форм (посуды), санитарно-технический – для сложных крупногабаритных санитарно-технических изделий. Как было показано выше для этих изделий деформация в процессе обжига – один из распространенных дефектов.

Для расчета эффективной вязкости  $\eta$  по результатам испытаний образцов в виде трубок была использована следующая формула, полученная из закона Ньютона, выведенного для вязкого течения:

$$\eta = \frac{12,5mRx}{d^3 z - 3d^2 z^2 + 3dz^3 - z^4} \frac{\Delta t}{\Delta W}, \quad (42)$$

где  $m$  – масса нагрузки (включая массу троса и элементов крепления);  $R$  — плечо приложения нагрузки;  $x$ ,  $z$ ,  $d$  – длина, толщина стенки и внешний диаметр трубки, которые определяются усадкой в течение обжига;  $\Delta t$ ,  $\Delta W$  – приращение времени и угла вращения (в рад) одного конца трубки относительно другого соответственно.

По исходным и конечным размерам контрольных образцов в виде трубок рассчитывали свободную усадку. По размерам образцов для кручения рассчитывали усадку под нагрузкой. Результаты показали, что с увеличением приложенного касательного напряжения незначительно возрастала усадка вдоль оси сдвига (по диаметру образца).

Величины усадки в различных направлениях образца при различных напряжениях сдвига, приложенных к образцам представлены в таблице 3.18.

Данные табл. 3.18 свидетельствуют о значительной анизотропии усадки для всех материалов. Санитарно-технический фарфор имел несколько меньшую усадку по сравнению с хозяйственным фарфором и полуфарфором. Наибольшая усадка (16 %) была зафиксирована по толщине образцов, как следствие анизотропии структуры полуфабриката, полученного шликерным литьем. Наименьшую усадку наблюдали по длине (по оси) образцов.

При расчете вязкости материалов учитывали дилатометрические кривые усадки материала в течение обжига, полученные на дилатометре. После усреднения их сравнивали с расчетными данными (рис. 3.57). Т. к. реологическое по-

ведение фарфора и полуфарфора материалов было подобно, рассчитанные данные можно считать обобщенными для их разновидностей.

Таблица 3.18 – Линейная усадка, определенная в различных направлениях образцов

Фарфор	Температура обжига, °С	Огневая усадка, %		
		место измерения	свободная	Под нагрузкой
Полуфарфор	1300	по оси	9,75±0,90	10,19±0,41
		по диаметру	11,31±0,43	11,50±0,36
		по толщине	17,01±1,34	18,13±0,84
Санитарно-технический	1300	по оси	8,92±0,92	9,12±0,47
		по диаметру	10,19±0,52	10,31±0,37
		по толщине	15,00	15,00
Хозяйственный	1350	по оси	10,00	9,00
		по диаметру	11,24±0,48	11,00
		по толщине	17,00	18,00

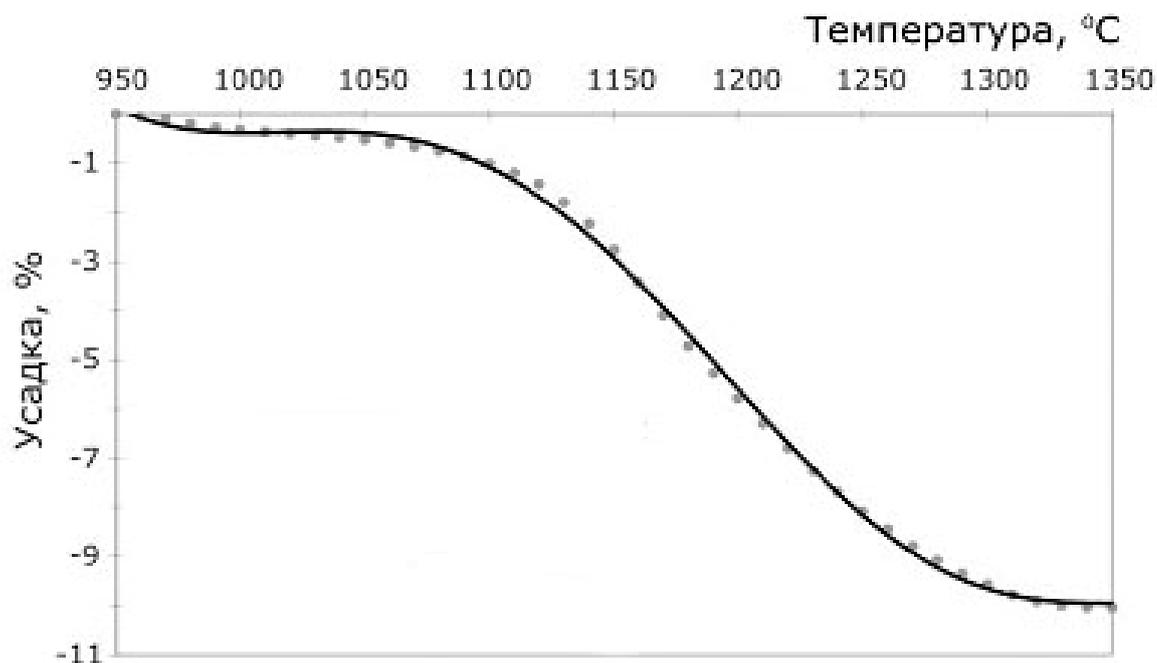


Рисунок 3.57 – Дилатометрические экспериментальные (•) и расчетные (-) данные усадки образца хозяйственного фарфора

Зависимости логарифма вязкости образцов полуфарфора от температуры, построенные для некоторых значений приложенных напряжений, представлены на рис. 3.58. Испытаниям подвергали тонкостенные трубки из полуфарфора,

предварительно обожженные при 900 °С. Для интервала напряжений 65,5-336 кПа разброс экспериментальных данных на кривых вязкости имел небольшие отклонения, поэтому для данного интервала напряжений построена одна кривая.

На ниспадающих кривых вязкости выделяются два максимума (1000 °С и 1175 °С), очевидно, связанные с формированием кристаллических фаз, резко повышающих вязкость жидкой фазы.

Замечены значительные колебания вязкости в температурном интервале от 1140 °С до 1300 °С для низких напряжений.

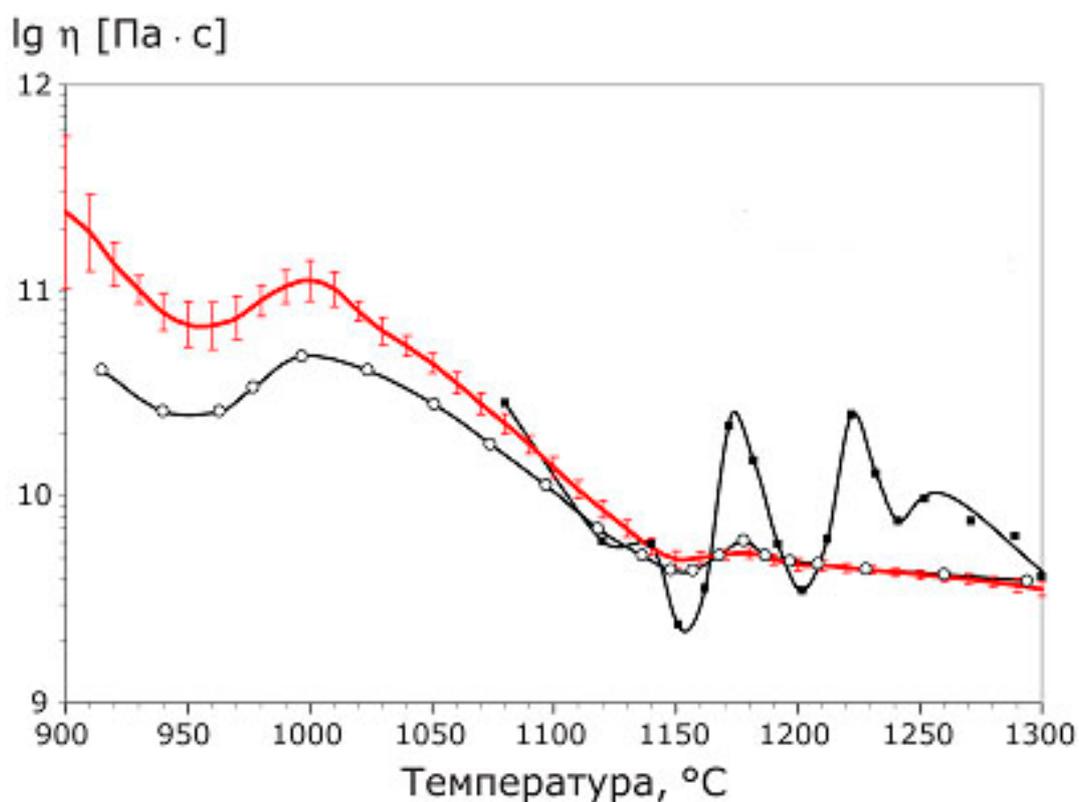


Рисунок 3.58 – Температурная зависимость логарифма вязкости  $\lg \eta$  образцов из полуфарфора, полученная при различных напряжениях сдвига: 6,77 (•), 43,3 (°) и 65,5-336 кПа (-)

На графике зависимости скорости сдвига от напряжения (рис. 3.59), построенном по результатам экспериментов исследования температурных зависимостей вязкости образцов полуфарфора, предварительно обожженных при 900 °С, при различных напряжениях, присутствует криволинейный участок в

области напряжений от 34-43 кПа до 48-65 кПа. Этот участок показывает наличие двух механизмов течения, которые зависят от приложенного напряжения в широком диапазоне температур. С увеличением температуры разница между реологическим поведением материала нивелируется и наклон обоих прямых участков графиков становится подобным.

Крутой изгиб графика в диапазоне напряжений 40-60 кПа характеризует дилатантное поведение системы, сменяющееся с повышением напряжения на ньютоновское, прямо пропорциональное приложенному напряжению с постоянной скоростью деформации.

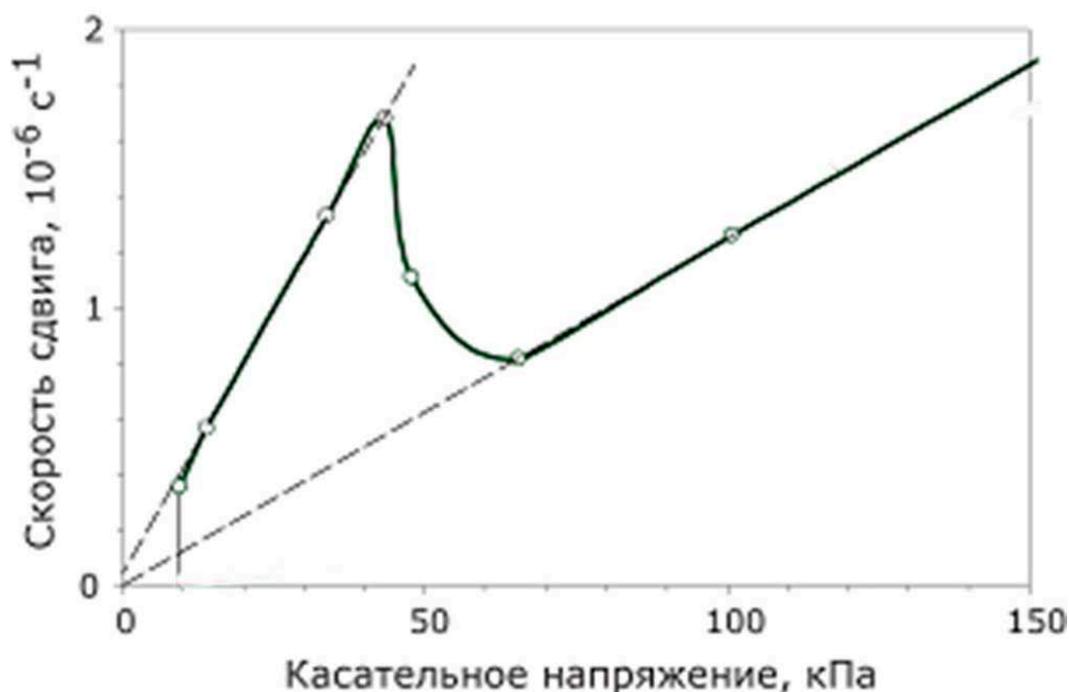


Рисунок 3.59 – Зависимость скорости сдвига от напряжения образцов полуфарфора при 940 °С. На графике показана пунктиром экстраполяция кривой течения

Таким образом, можно обозначить четыре характерных интервала напряжений: критически низких (<10 кПа), низких (10-35 кПа), средних (35-50 кПа) и высоких (>50 кПа) напряжений.

В процессе обжига изделия сложной формы материал испытывает сложно напряженное состояние, при этом его устойчивость к деформации может существенно различаться для состояния растяжения и сжатия [393]. При обжиге

фарфоровых и полуфарфоровых изделий сложной формы в них могут присутствовать напряжения сжатия и растяжения, влияющие на их деформацию.

При относительно небольших деформациях под действием собственного веса соотношение главных напряжений в течение обжига будет постоянным, что можно определить, как простое нагружение [394]. Анализ отличий между температурными зависимостями вязкости полуфарфора, полученными при чистом сдвиге и с дополнительным приложением осевой нагрузки растяжения или сжатия (рис. 3.60) показал, что интервале температур 950-1020 °С существует существенное различие в кривых из-за влияния осевой нагрузки.

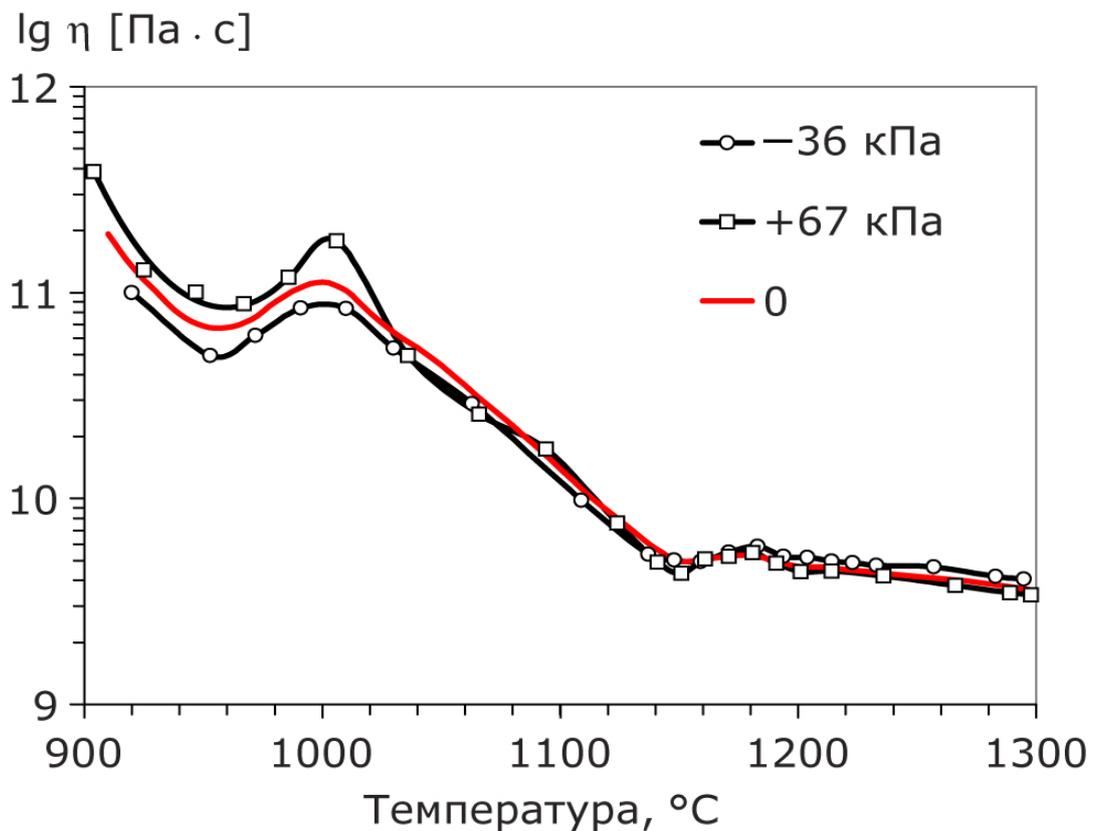


Рисунок 3.60 – Температурные зависимости логарифма вязкости  $\lg \eta$ , построенные по результатам экспериментов по кручению при дополнительном осевом сжатии или растяжении тонкостенных трубок из полуфарфора, предварительно обожженных при 900 °С (напряжение кручения 90 кПа)

Так, вязкость чистого сдвига материала при приложенном дополнительно растяжении с напряжением 67 кПа в 2 раза превышает значения вязкости при приложенном сжатии с напряжением 36 кПа. Дополнительное сжатие, прило-

женное при кручении, уменьшает вязкость материала, дополнительное растяжение – увеличивает.

Выше 1020 °С, различия реологического поведения материала при разных осевых нагрузениях выявлено не было. Следовательно, деформация материала описывается законом Ньютона – коэффициентом вязкости, определенным при чистом сдвиге.

Моделирование деформации изделий группы фарфора выполняли с помощью программного комплекса ABAQUS, основанного на МКЭ, основываясь на ранее выводах о статичности условий нагружения (усадка и напряжения под собственным весом) и ньютоновском характере реологического поведения материала в условиях обжига.

Предварительно обожженные при 900 °С образцы хозяйственного фарфора испытывали в течение политого обжига, проведенному до максимальной температуры 1300 (для метода калибровки) или 1350 °С (для метода валидации).

Для калибровки проводили исследования деформации в условиях консольного изгиба образцов простой формы в виде балок.

Образцы вырезали из стенок заготовок цилиндрической формы, отформованных методом сливного шликерного литья и прошедших предварительный обжиг. Размер образцов составлял в среднем 40x10x2 мм. Среднее значение стрелы прогиба консольно закрепленных образцов составило  $5,95 \pm 1,6$  мм при доверительной вероятности 0,95.

Была построена КЭ-модель консоли (рис. 3.61) на основании вязкого поведения материала по модели Ньютона с учетом температурных зависимостей вязкости при чистом сдвиге с касательными напряжениями 5,2 кПа и 82 кПа, определяемым приложенной в течение эксперимента нагрузкой. Огневую усадку моделировали заданием температурной кривой скорости объемной деформации с учетом анизотропии по толщине, ширине и длине, рассчитанных как сумма трех температурных зависимостей скоростей линейных деформаций в соответствии с тремя осями анизотропии (рис. 3.62).

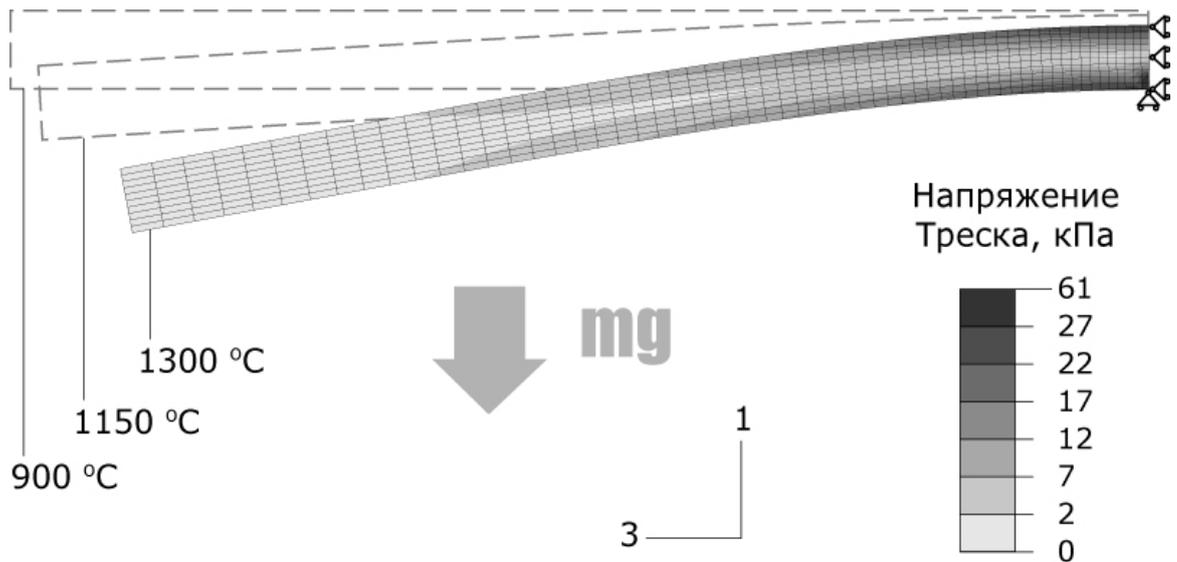


Рисунок 3.61 – Деформация КЭ-модели консоли на разных шагах моделирования и распределение наибольшего касательного напряжения

Учитывали также температурную зависимость плотности материала образца, начиная с плотности  $1590 \text{ кг/м}^3$ , исходя из объемных изменений во время термообработки. Временной промежуток, задаваемый для проведения расчетов, (шаг) составлял 150 с, температурный промежуток –  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

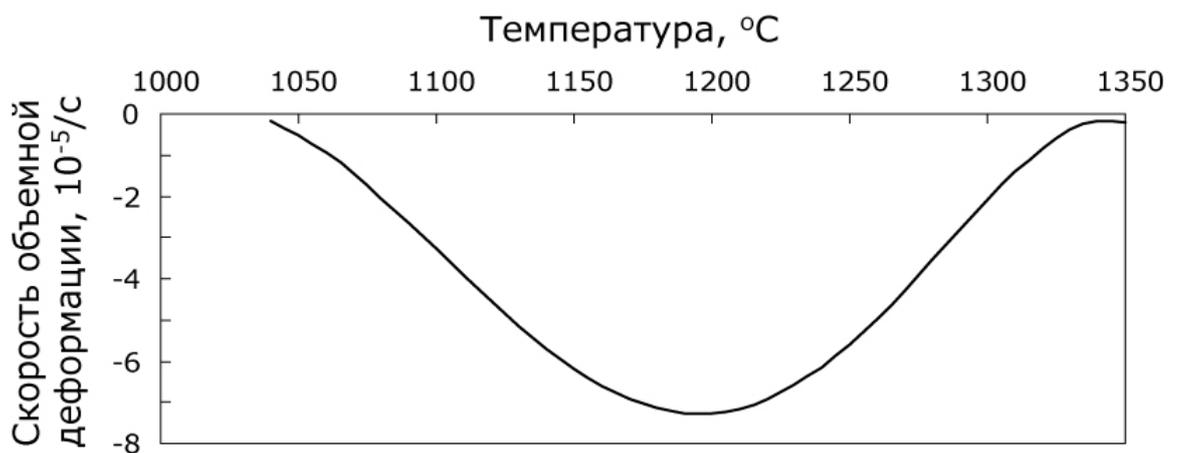


Рисунок 3.62 – Температурная зависимость скорости объемной деформации, полученная по результатам испытания тонкостенных трубок при чистом сдвиге

В результате моделирования была рассчитана стрела прогиба консоли (рис. 3.61), которая при  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  составила 4,5 мм и 4,9 мм для расчетов, осно-

ванных на данных по вязкости, полученных экспериментально при касательном напряжении чистого сдвига 82 кПа и 5,2 кПа соответственно. Величина стрелы прогиба образцов, полученная в результате моделирования по методу КЭ, оказалась меньше на 24 % и 18 %, соответственно, из-за влияния краевых эффектов, которые были тем больше, чем меньше был фактор формы образца.

Для учета влияния краевых эффектов был установлен поправочный коэффициент  $K_{edge}$ , находящийся в прямо пропорциональной зависимости от фактора формы с увеличением которого влияние краевых эффектов уменьшается. Коэффициент может использоваться при моделировании в качестве калибровочной величины, абстрагированной от образца конкретной формы.

Величина коэффициента  $K_{edge}$  была найдена на основе рассчитанного по результатам экспериментов калибровочного коэффициента  $E_{cant}$ , определенного как 0,21 (отклонение на 21 %), с подстановкой вместо объема  $V$  и площади поверхности  $S$  соответствующих средних габаритов консоли:

$$K_{edge} = \frac{E_{cant}}{f} = \frac{VE_{cant}}{S} = \frac{0,04 \cdot 0,01 \cdot 0,0026 \cdot 0,21}{2 \cdot 0,04 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,04 \cdot 0,0026 + 0,01 \cdot 0,0026} = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (43)$$

Таким образом, коэффициент  $K_{edge}$  позволяет при расчете деформации для одинаковых условий обжига данного материала перейти от условий чистого сдвига к условиям деформации изгиба с учетом фактора формы  $f$ , определяющего влияние формы элемента конструкции изделия (толщины стенки и т. д.).

Для подтверждения правильности разработанной модели (валидации) в качестве представительного объекта, обладающего сложностью, присущей большинству реальных фарфоровых изделий (например, посуды), был выбран образец в виде кольца. Нагружение под действием внешней механической нагрузки вертикально расположенного образца в виде кольца в условиях высоких температур позволяет получить изгибающие напряжения, деформацию от которых удобно фиксировать по меняющемуся профилю образца непосредственным наблюдением посредством катетометра.

Образцы колец формовали способом шликерного литья в гипсовые формы заготовок в виде трубок, из которых вырезали кольца. Образцы диаметром 10-11 мм со средней толщиной стенки 1,5 мм устанавливали в печь с нагревателями из карбида кремния в специально изготовленную огнеупорную камеру (капсель), предохраняющую от создания значительных градиентов температур и оснащенную смотровым отверстием, через которое осуществляли фотофиксацию изменения формы образцов.

Малые размеры образцов позволяли максимально устранить влияние внешних факторов (колебаний температуры и газовой среды печи).

Образцы нагружали сверху грузом, создающим напряжения, подобные напряжениям, возникающим в бытовых фарфоровых изделиях под собственным весом. Компьютерная модель образца в виде кольца представлена на рисунке 3.63, а.

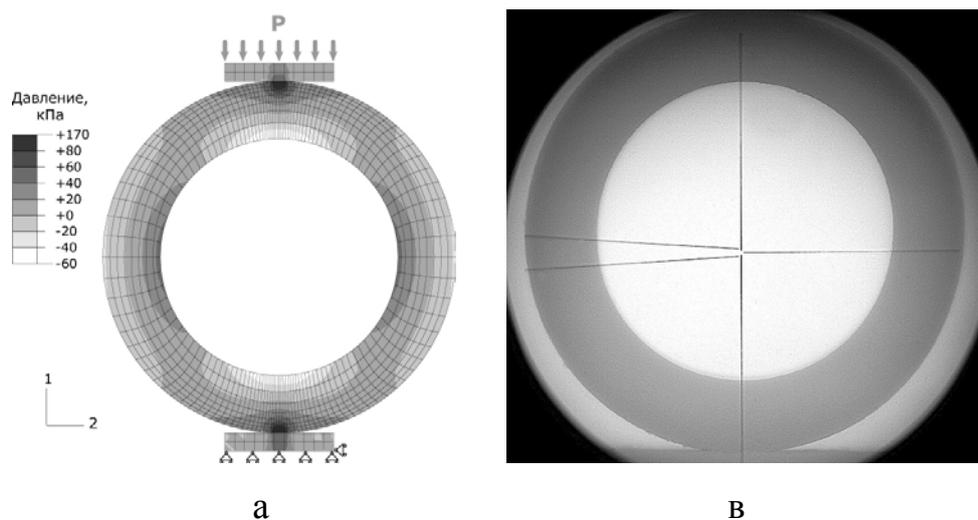


Рисунок 3.63 – Модель и образец кольца при температуре 900 °С:  
а – компьютерная модель образца, показано распределение давлений от приложенной нагрузки  $P$ ; б – снимок фронтального вида образца в процессе испытания

В результате сравнения силуэтов внутренних радиусов образца и модели в торцевой плоскости (рис. 3.64, б) можно было убедиться, что деформированная форма реальных образцов соответствует расчетной модели. Образцы испытывали деформации изгиба с наиболее высокими напряжениями сжатия и рас-

тяжения в вертикальной оси симметрии образцов, оцениваемыми как 170 кПа и 60 кПа соответственно.

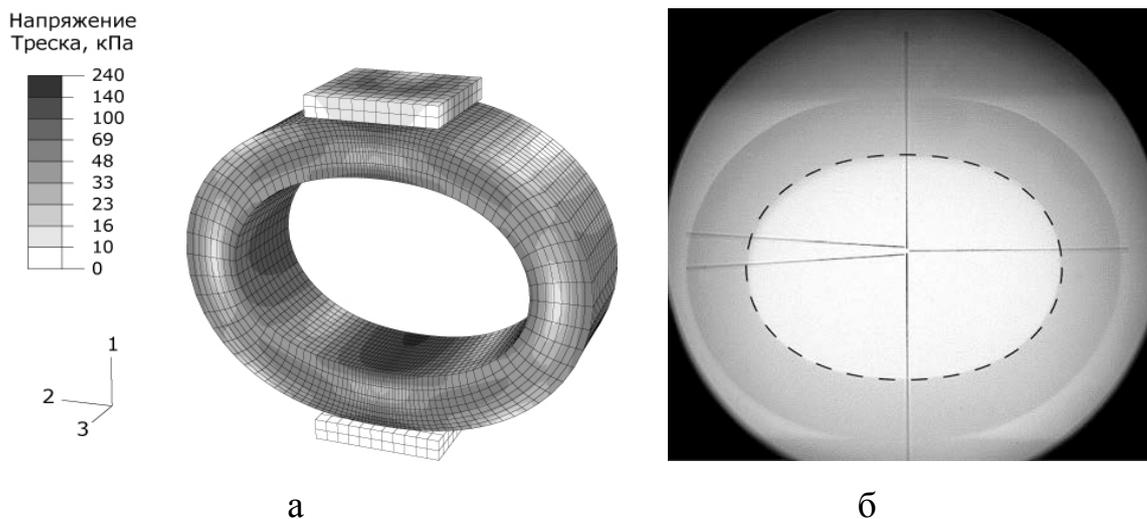


Рисунок 3.64 – Модель и образец кольца при температуре 1350 °С;  
 а – распределение наибольшего касательного напряжения в модели;  
 б – снимок образца с пунктирным контуром расчетной модели

Критически важный диапазон напряжений, возникающих в областях интенсивной деформации кольца, можно обозначить величинами 70-140 кПа, соответствует напряжению сдвига, при котором получена использованная при моделировании кривая вязкости. Результаты дополнительных расчетов показали пренебрежимо малое влияние внешнего трения на деформацию образца.

Для количественного сравнения результатов моделирования и экспериментов использовали функцию деформации кольца  $D(w, h)$ :

$$D = \frac{w - h}{w + h} \cdot 100 \% \quad (44)$$

где  $w$  и  $h$  – величины горизонтальной и вертикальной осей внутренней окружности образца.

На рис. 3.65, показаны графические зависимости деформации образцов и модели в зависимости от температуры нагрева. График показывает, что величины деформации, полученные в результате моделирования немного превышают величины деформаций, определенных по экспериментальным данным, рассчитанным по фотоснимкам. Конечная реальная деформация образцов при

температуре 1350 °С по данным экспериментов составила  $20 \pm 5$  % при доверительной вероятности 0,80, тогда как по результатам моделирования – 17,4 %.

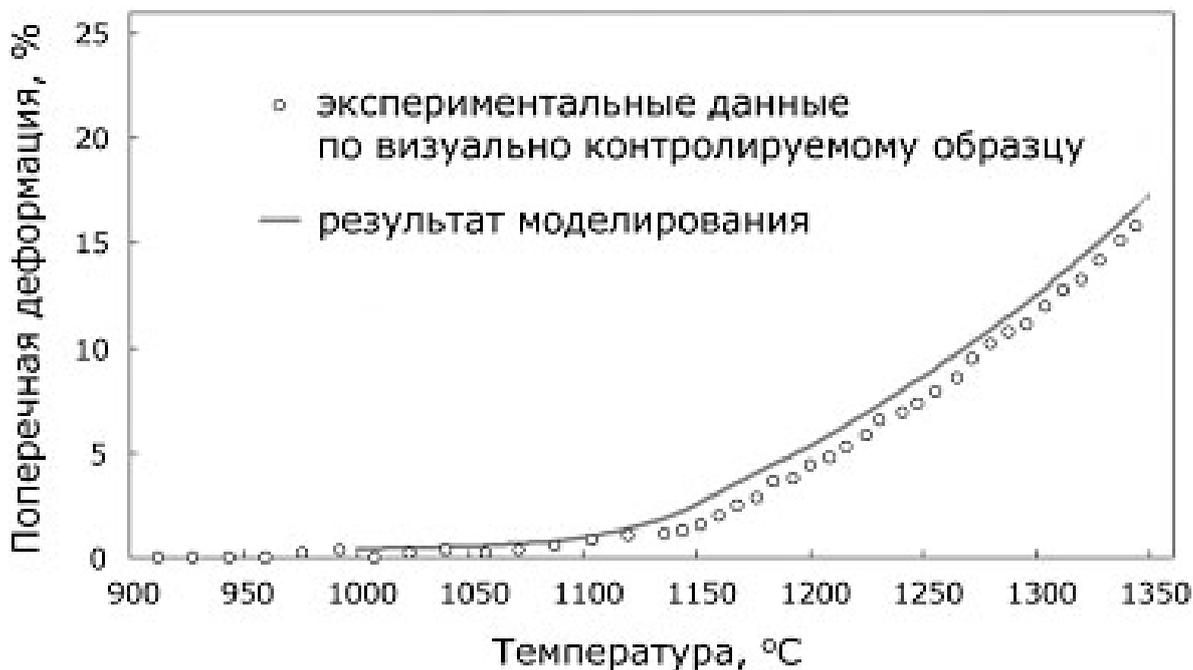


Рисунок 3.65 – Зависимости реальной и моделированной деформации образцов в виде колец от температуры

Итого, относительное отклонение деформации, полученной в результате моделирования, составило 13 %. С введением поправочного коэффициента, (формула 43) учитывающего фактор формы образцов (1,24 мм) отклонение расчетной деформации от реальной составило 4,7 %.

#### **Выводы по разделу 3.4:**

1. Предложен метод прогнозирования деформации керамических изделий при их обжиге, основанный на определении температурной зависимости вязкости обжигаемого материала методом кручения тонкостенных трубок, позволяющим воспроизвести условия чистого сдвига.
2. В качестве инструмента моделирования использовано компьютерное моделирование методом конечных элементов. Использован метод валидации

прогнозирования деформации, в качестве объекта которого выбраны тонкостенные фарфоровые кольца, находящиеся в условиях поперечного сжатия.

3. Полученное расхождение в результатах деформации образцов в ходе натуральных экспериментов и расчетной деформации на компьютерной модели нивелируется учетом фактора формы образца.

**Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Деформация фарфоровых изделий [Текст] / Андреев Д. В., **Захаров А. И.** // Стекло и керамика. 2009. № 1. С. 10-12.

2. **Захаров А. И.** Деформация керамических изделий во время обжига — влияние состава и микроструктуры (Обзор) [Текст] / Андреев Д. В., **Захаров А. И.** // Новые огнеупоры. 2009. № 8. С. 45-52.

3. **Захаров А. И.** Структура и реология фарфорового полуфабриката при обжиге [Текст] / Андреев Д. В., **Захаров А. И.** // Стекло и керамика. 2011, № 10. с. 18-25.

4. **Захаров А. И.** Исследование реологии спекающихся стеклокристаллических материалов методом кручения тонкостенных трубок [Текст] / Андреев Д. В., **Захаров А. И.** // Новые огнеупоры. 2012. № 1. С. 36-44.

5. **Захаров А. И.** Комплексный метод исследования и прогнозирования деформации керамических изделий при обжиге [Текст] / Андреев Д. В., **Захаров А. И.** // Новые огнеупоры. 2013. № 9. С. 41-51.

### **3.5 Примеры, иллюстрирующие основные положения работы**

В этом разделе приводятся несколько примеров технологических разработок, в которых при проектировании технологии, формы изделий и условий их получения были использованы положения, изложенные в предыдущих разделах.

#### **3.5.1 Использование фактора формы в оптимизации формы изделия**

Далее, на примере изделий из пористой керамики, используемой в качестве адсорбирующего материала, показана методика оптимизации формы изделия, используемого для временного хранения поглощенной жидкости, на основе условий его эксплуатации и производства.

Известно, что пористая керамика, в первую очередь находившая применение в качестве теплоизоляции, сегодня все более широко применяется для катализаторов, фильтров и адсорбентов [395-397]. Высокая пористость, создаваемая с помощью различных технологических приемов, обеспечивает уникальные свойства таких изделий (высокую проницаемость или поглощаемость, низкую теплопроводность).

К разрабатываемым образцам предъявляли следующие требования: высокая скорость впитывания жидкости и емкость поглощения (не менее 100 % по массе). Образцы погружаются в емкость с жидкостью и извлекаются из нее как ручным, так и автоматизированным способами. В техническое задание в качестве значимых параметров не входили ни габариты образцов, ни их форма, поэтому, помимо разработки материала с определенными характеристиками (пористость, прочность, способность к впитыванию жидкости), предполагали проектировать изделие, определив его оптимальную форму, габариты и конструкцию.

Основой для разрабатываемых изделий служила среднепластичная легкоплавкая глина ПГ (раздел 3.1). Для создания высокой (свыше 70 %) пористости в данной работе использовали метод выгорающих добавок, в качестве которых

применяли органические отходы. Глину с добавкой увлажняли и смешивали в шнековом смесителе, после чего формовали образцы. Образцы сушили при 100 °С до постоянной массы и обжигали в воздушной среде при температуре 900 °С.

При проектировании изделия учитывали следующие факторы:

1. Габариты изделия должны обеспечивать значительный объем впитывания.
2. Максимальное время насыщения образца жидкостью не должно превышать 10 мин, что определяет сроки загрузки емкости, окончание которой совпадает с началом ее разгрузки.

Для удобства ручной загрузки и выгрузки максимальный объем, впитанной изделием жидкости ограничили 1 л. При выполнении этого условия при плотности материала, не превышающей 500 кг/м<sup>3</sup>, общая масса изделия не будет превышать 1,5 кг, что позволяет легко извлекать насыщенное изделие одной рукой.

Скорость впитывания воды материалом, определенная опытным путем, составила 0,18 г/см<sup>2</sup>мин. Исходя из определенной скорости насыщения, насыщение образцов 0,5 л жидкости в течение 10 минут площадь образца должна составлять не менее 28 000 мм<sup>2</sup>.

Таким образом, были определены граничные (максимальный объем и минимальная площадь) параметры изделия.

Форму изделия определяли исходя из следующих предпосылок:

- изделие должно быть эргономично, т. е. удобным для перемещения, хранения и использования (погружения в жидкость, извлечения из жидкости, помещение в емкость для дальнейшего хранения);
- изделие должно быть технологично, т. е. удобно для изготовления.

При выборе способа формования изделий определенной формы учитывали возможность получения заготовки однородной бездефектной структуры. Среди параметров формы изделия, оказывающих наибольшее влияние на образование дефектов при формовании, указывали объем изделия, его габариты,

площадь сечения в направлении формования, высоту в направлении формования. Таким образом, при полусухом прессовании или набивке пластической массы для получения однородного изделия в общем случае необходимо стремиться к увеличению площади его поперечного сечения без усложнения его профиля.

Структура полуфабриката во многом также определяется способом формования: применение разновидностей способа прессования приводит к образованию более плотных структур с менее проницаемыми порами. В нашем случае более пористую структуру легче получить формованием под небольшими усилиями пластичной массы с повышенным содержанием временной технологической связки. Недостатки пластического способа формования (текстурирование массы и значительные усадки) в нашем случае нивелировались использованием выгорающих добавок, снижающих сушильную усадку и упрочняющих полуфабрикат.

При выборе способа формования, для сохранения однородности создаваемой пористой структуры и уменьшения усилий формования, необходимо было обеспечить значительную площадь сечения изделия в направлении формования.

Для сохранения целостности изделия при сушке и обжиге необходимо было учитывать габариты изделия, – прежде всего, его толщину, определяющую максимальные скорости нагрева и охлаждения. Эта характеристика тем более важна для материалов с низкой теплопроводностью, к которым относятся пористая керамика и ее полуфабрикаты.

В предыдущих разделах работы в качестве основных критериев оценки сложности формы, т. е. удобства ее производства (технологичности) были предложены: габариты изделия, наличие симметрии и фактор формы (отношение объема к поверхности). Поясним данные положения относительно поставленной задачи.

Габариты изделия в значительной степени определяют и удобство производства (формования, транспортировки на переделы технологии, садки и т. д.),

и вероятность образования дефектов. Наиболее эргономичными габаритами изделий, несмотря на повсеместную автоматизацию производства, по-прежнему, являются габариты соизмеримые с параметрами рук человека. Изготовление слишком изделий больших или слишком маленьких по сравнению с руками габаритов изделий означают разработку специальных, нетипичных видов оборудования и оснастки. В нашем случае удобство обращения с изделием (складирование, загрузка, выгрузка) можно определить, как удобство захвата изделия рукой. Следовательно, толщина образца в одном измерении не должна превышать 120 мм, оптимально – 80 мм [398].

Наличие симметрии в форме изделия облегчает процесс укладки частиц формовочной массы в форму, при прочих равных условиях облегчает равномерное распределение формовочных усилий по объему формируемой заготовки, а также, при равных условиях тепло и влагообмена, обеспечивает более равномерное протекания усадки в разных частях изделия при сушке и обжиге по сравнению с изделиями несимметричной формы. Для емкостей, к которым функционально относится проектируемое изделие, наиболее распространены формы, обладающие симметрией покоящихся цилиндра и конуса (диски, цилиндры, втулки), форма которых позволяет достичь равномерности возникающих напряжений относительно центра заготовки. В том случае, когда симметрия поля формирующих усадочных усилий включает в себя тип симметрии формируемого и термообрабатываемого изделия, вероятность образования дефектов формования и термообработки снижается.

Фактор формы изделия трактуется, как отношение его объема к поверхности. Практически фактор формы показывает толщину изделия любой конфигурации, преобразованного в пластину. При сушке и обжиге толщина такой пластины подобна приведенной толщиной изделия или его характерному размеру, используемых в теплотехнических расчетах (нагрев, охлаждение и испарение влаги через открытые поверхности изделия). При формовании необходимо учитывать направление формования, т. е. использовать приведенный фактор

формы, учитывающий площадь, на которую распределяются усилия формования.

В табл. 3.19 перечислены параметры формы изделия, оптимальные для различных стадий его изготовления, а также для службы изделия.

Таблица 3.19 – Параметры формы изделия пористой керамики, значимые для процессов технологии и эксплуатации

Стадия изготовления и службы	Процессы	Критерии подобия, описывающие процессы	Требования к геометрическим параметрам изделия		
			Объем	Поверхность	Фактор формы
Формование	Быстрое уплотнение с минимальным влиянием внешнего трения	Критерий Ньютона $Ne = \frac{F \cdot t^2}{m \cdot l}$ Критерий Пуассона $\frac{F}{E \cdot l^2}$	Минимум	Оптимум	Оптимум
Сушка	Быстрый нагрев, испарение влаги	Критерий Био: $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda},$	Минимум	Максимум	Минимум
Обжиг	Быстрый нагрев и охлаждение	Радиационный критерий Био $Bi_{rad} = \frac{\sigma_0 T_0^3 l_0}{\lambda},$	Минимум	Максимум	Минимум
Служба	Быстрое капиллярное всасывание максимально возможного объема жидкости	Диффузионный критерий Био $Bi_{dif} = \beta_m l / k_j$	Максимум	Максимум	Оптимум

Обозначения:  $F$  – сила,  $t$ ,  $T$  – время,  $m$  – масса,  $E$  – модуль упругости,  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $k$  – коэффициенты, соответственно, теплоотдачи, теплопроводности, массоотдачи, массопроводности,  $\sigma$  – постоянная Больцмана,  $l$  – характерный размер тела.

Пояснения: минимум – желательно уменьшение параметра, максимум – желательно увеличение параметра, оптимум – существует область оптимальных значений для конкретных условий.

Из данных, приведенных в табл. 3.19 можно сделать вывод, что в процессах изготовления изделия из пористой керамики и его эксплуатации наиболее

значимым параметром является приведенная толщина, за которую можно принять размер изделия в направлении действия сил формования, подвода и отвода тепла, удаления и впитывания жидкости. За толщину изделия, участвующего в этих процессах, можно принять его фактор формы, величина которого, в отличие от объема и поверхности изделия, имеет оптимальную область значений. Так, при формовании уменьшение объема заготовки облегчает ее формование, однако увеличение ее поверхности означает возрастание сил внешнего трения, что ведет к искажению однородности.

В нашем случае для формования изделий были выбраны две разновидности пластического формования: набивка и протяжка (экструзия). Способом набивки изготовили изделия в виде цилиндра и усеченного конуса и пирамиды (рис. 3.66), размеры которых были достаточно велики для обеспечения быстрого всасывания жидкости. Изделие в виде усеченного конуса обладало большой поверхностью, однако имело небольшой объем.



Рисунок 3.66 – Изделия различной формы, изготовленные из пористой керамики

Габариты изделия были определены по сформулированным ранее требованиям к высоте, объему и площади с учетом технологической коррекции формы (табл. 3.20).

Таблица 3.20 – Параметры изделий, показанных на рис. 3.66

№	Форма изделия	Диаметр, мм	Высота, мм	Объем, л	Площадь поверхности, мм <sup>2</sup>	Фактор формы, мм
1	Цилиндр	155	180	3,4	106465	32
2	Втулка	135	60	0,8	58000	14
3	Усеченная пирамида с отверстием	95	90	0,5	39050	13
4	Усеченный конус с отверстием	50	100	0,7	22110	31
5	Втулка	155	60	1,0	54340	17

Выбрав экструзию, как производительный способ формования, мы использовали мундштук с диаметром 155 мм. Первоначальные параметры изделий были изменены в сторону снижения фактора формы из-за большой длительности сушки и обжига. Для облегчения изготовления изделия и уменьшения его габаритов форма изделий была изменена с цилиндра на втулку с центральным отверстием (рис. 3.67). Наличие отверстие существенно снизило фактор формы и дало возможность значительно облегчить удаление влаги при сушке и значительно быстрее прогреть и охладить изделие при обжиге при низкой теплопроводности пористого тела. В целом общее время сушки и обжига сократилось в 1,5 раза.



Рисунок 3.67 – Изделия оптимальной формы

После выбора формы проводили коррекцию высоты изделия (табл. 3.21), уменьшение которой приводило к уменьшению фактора формы и, следовательно, к облегчению сушки и обжига.

Из данных, приведенных в табл. 3.20 и табл. 3.21 видно, что сформулированным ранее условиям в большей степени соответствует изделие – втулка с объемом 1 л, поглощающее 0,5 л жидкости за 5 минут.

Далее была изготовлена опытная партия изделий оптимальной формы, успешно прошедшая испытания в качестве поглощающих элементов (см. Приложения).

Таблица 3.21 – Сравнительные характеристики изделий и параметры их эксплуатации

Высота изделия, мм	Параметры изделия в форме цилиндра диаметром 155 мм			Параметры изделия в форме втулки диаметром 155 мм с отверстием диаметром 40 мм		
	Объем жидкости, мл	Время насыщения, мин	Фактор формы изделия, мм	Объем жидкости, мм <sup>3</sup>	Время насыщения, мин	Фактор формы изделия, мм
180	1700	9	32	1600	7	22
120	1200	8,5	29	1000	6	21
80	700	7	26	700	6	19
60	500	6	24	500	5	17

### 3.5.2 Использование принципа Кюри в проектировании обжига изделий

В этом разделе работы на примере спекания керамики на основе нитрида кремния иллюстрируется использование принципа суперпозиции симметрии П. Кюри в технологии обжига керамики.

Керамические изделия на основе нитрида кремния получали способом спекания в СВС-реакторе – установки для проведения самораспространяющегося синтеза, схема которого показана на рисунке 3.68. Способ СВС известен,

прежде всего, как относительно дешевый способ синтеза тугоплавких соединений (нитридов, карбидов и др.) путем нагрева с помощью инициированной экзотермической реакции [399]. Нагрев материала, возникающий в результате химической реакции (в данном случае в результате горения порошка кремния в газообразном азоте) можно использовать не только для высокотемпературного синтеза, но и для спекания.

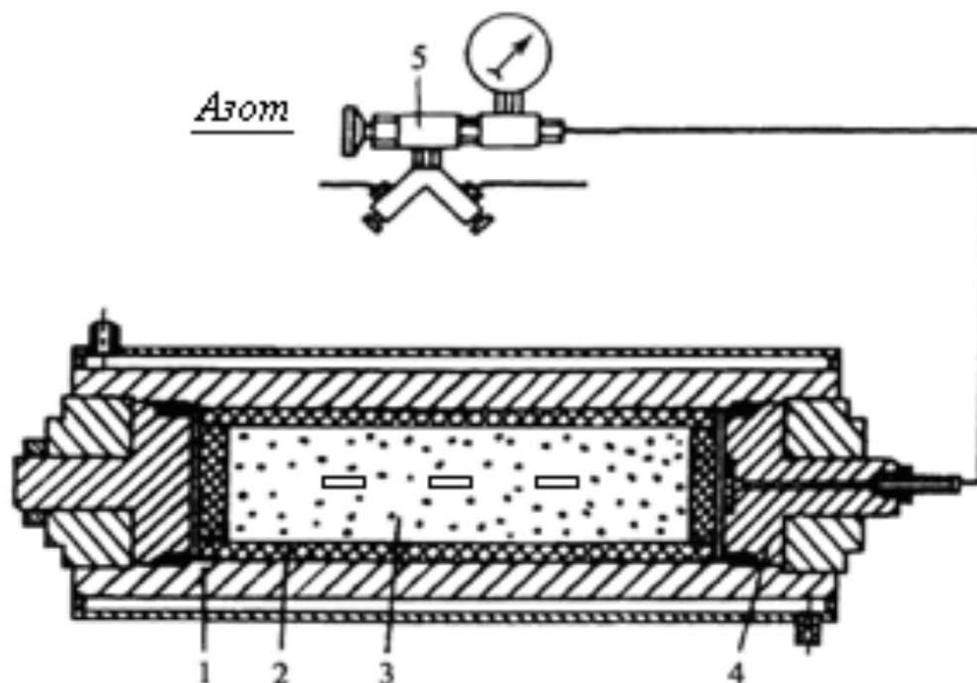


Рисунок 3.68 – Схема СВС-реактора. 1 – корпус; 2 – графитовая футеровка; 3 – реакционная шихта; 4 – грибовидный затвор; 5 – газораспределительный узел

Эксперименты проводили в институте структурной макрокинетики РАН (ИСМАН, г. Черноголовка) в лаборатории под руководством И. П. Боровинской, при непосредственном участии В. В. Закоржевского.

Спекание осуществляется за счет тепла, выделявшегося при горении шихты, содержащей кремний и засыпки, состоявшей из порошков кремния, нитрида кремния и других добавок в среде азота, давление которого в реакторе развивалось в диапазоне от 5 до 150 МПа.

Температурный режим обжига образцов из нитрида кремния показан на графике, изображенном на рисунке 3.69. Скорость горения составила 1,2 мм/сек.

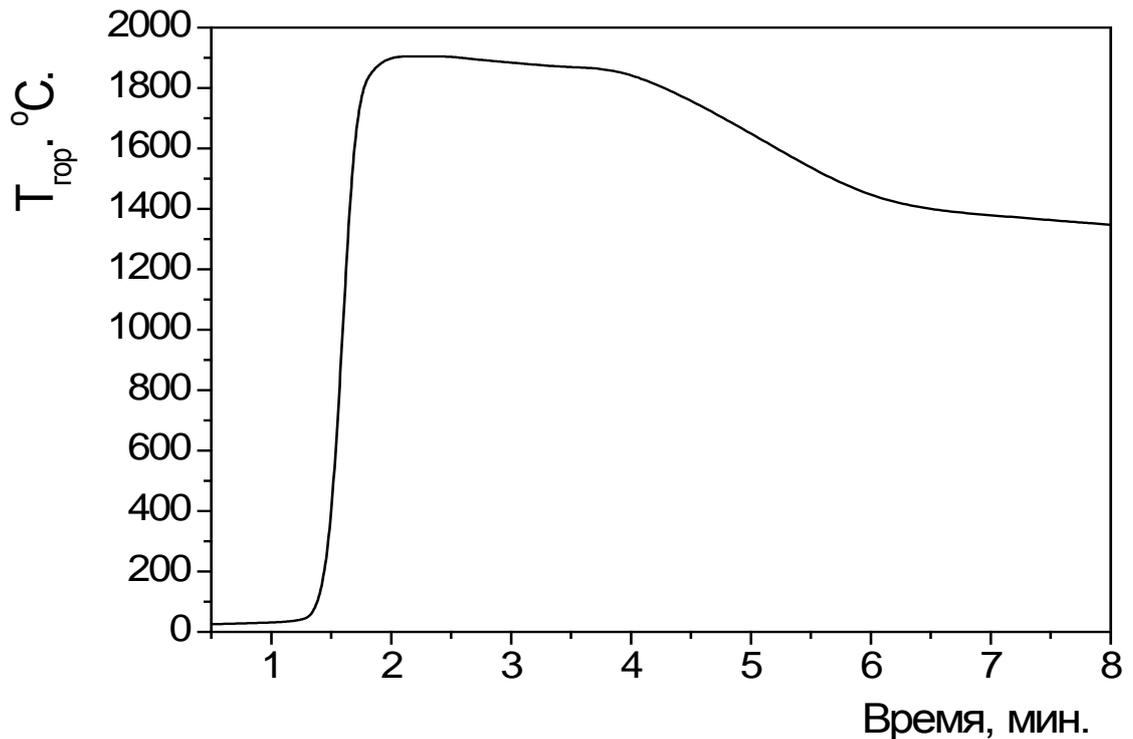


Рисунок 3.69 – Режим нагрева в СВС-реакторе

Основная проблема спекания в СВС-реакторе – большая скорость горения порошка кремния в азоте, волна реакции продвигается вдоль оси реактора со значительной скоростью, скорость нагрева превышает 60 град/с. Кроме того, градиент температуры между центральной и периферийной частью засыпки достигает 250 °C, что может привести к большому разбросу свойств образцов. Для такого неравновесного процесса важно соблюдать условия принципа суперпозиции симметрии, позволяющего, при совпадении симметрии полей воздействия с типом симметрии изделия нивелировать эффект неравновесности.

Полуфабрикаты изготавливали из шихты, содержащей порошки нитрида кремния и технологических добавок, содержащих порошок кремния и оксид (оксиды) алюминия, кремния, иттрия, кальция, магния, муллит, иттрий-алюминиевый гранат, алюминат кальция, алюмосиликат иттрия.

Образцы формовали способом полусухого прессования в виде балок с соотношением сторон 1:1:10. Для образцов такой вытянутой формы в условиях сверхбыстрого нагрева сложно обеспечить спекание, приводящее к однородной структуре. Для этого образцы размещали в реакторе так, чтобы оси симметрии

реактора, корпус которого представлял собой металлическую трубу, и образцов совпадали, т. е. общая симметрия фронта горения покоящегося цилиндра (наличии для оси симметрии и плоскостей симметрии в продольном и поперечном направлении) совпадала с осью симметрии образцов.

Такое расположение образцов при данном способе спекания позволило получить за короткое время спекания изделия с плотностью до 98 % от теоретической и пределом прочности при изгибе до 600 МПа, что показывает достаточно высокую однородность структуры спеченного материала.

### **3.5.3 Увеличение числа функций керамических деталей в проектируемом изделии**

В качестве примера использования в проектировании изделий принципа увеличения числа функций, ведущего к ресурсосбережению, в частности, уменьшению использования металла, можно привести разработанные конструкции двух сменных вентильных головок крана водо- или кислотозапорной арматуры с керамической деталью.

Первая конструкция содержит корпус с впускным и выпускным отверстиями, запорный орган в виде поворотного диска, в котором выполнен соединительный канал, приводной элемент, взаимодействующий с поворотным диском, уплотнения между корпусом и арматурой. Корпус снабжен консолью, поворотный диск размещен под консолью и прижат к корпусу нажимным элементом. На приводном элементе выполнен упор, взаимодействующий с консолью в крайних угловых положениях (рис. 3.70).

Корпус вентильной головки, изображенной на рис. 3.70 снабжен консолью, поворотный диск размещен над консолью, а на приводном элементе выполнен упор, взаимодействующий с консолью в крайних угловых положениях.

Конструкция содержит небольшое количество деталей, достаточно простых в изготовлении. Конструкция вентильной головки облегчает доступ к элементам запорного органа при ремонте.

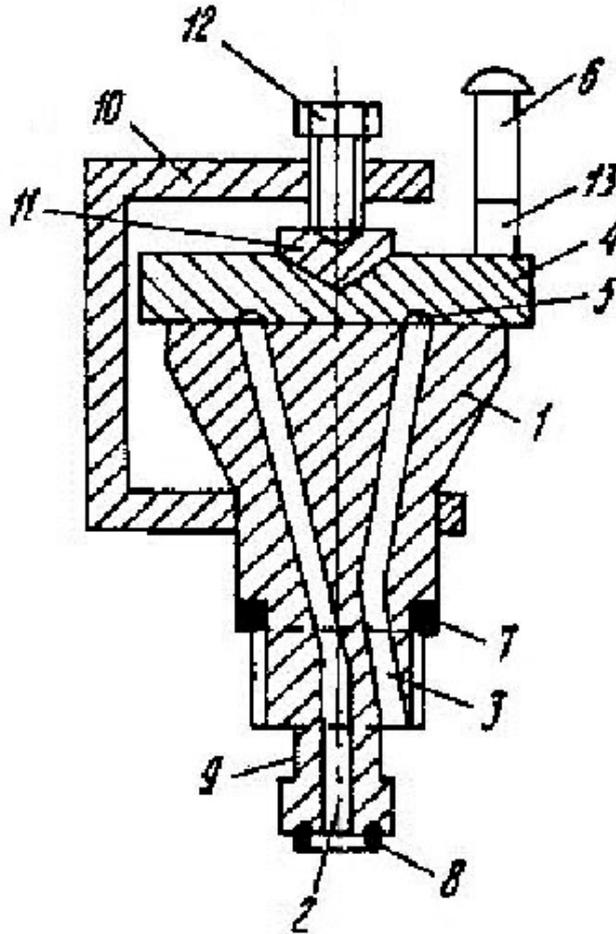


Рисунок 3.70 – Вентильная головка крана с керамической деталью в виде поворотного диска

Сменная вентильная головка содержит корпус (1) с впускным (2) и выпускным (3) отверстиями. На корпусе расположен запорный орган (4) в виде поворотного диска, в котором выполнен соединительный канал (5), соединяющий при повороте диска впускное (2) и выпускное (3) отверстия. С поворотными дисками соединен приводной элемент (6). На корпусе размещены уплотнительные прокладки (7) и (8), контактирующие с корпусом арматуры и образующие герметичные уплотнения.

Выпускной канал (3) сообщен с кольцевой проточкой (9), выполненной в корпусе. На корпусе (1) закреплена консоль (10), а поворотный диск (4) прижат к корпусу посредством шайбы (11) и винта (12), соединенного с консолью резьбой.

Приводной элемент (6) установлен на поворотном диске с возможностью взаимодействия с консолью в крайних положениях диска, соответствующих полностью открытому и полностью закрытому положению вентиля. На приводном элементе (6) выполнен выступ (13), заходящий при полностью закрытом положении вентиляльной головки под консоль (10).

Корпус и поворотный диск или их взаимодействующие части могут быть изготовлены из керамики. Сменная вентиляльная головка работает следующим образом.

В закрытом положении впускное (2) и выпускное (3) отверстия разъединены между собой, и вода к потребителю не поступает, при этом выступ (13) приводного элемента, заходящий под консоль, нажимает на поворотный диск (4) и создает усилие, компенсирующее усилие от давления воды, поступающей по впускному каналу. При повороте диска (5) соединительный канал (5) сообщает между собой впускное (2) и выпускное (3) отверстия. По мере поворота происходит увеличение расхода воды, вследствие увеличивающегося проходного сечения соединительного канала (5).

Применение керамических деталей в виде дисков, совмещающих функции запорной детали и рукоятки крана, позволяет сократить использование металла и упростить конструкцию, что особенно важно для промышленного применения в кислотопроводах и систем перекачки агрессивных жидкостей.

Другая конструкция вентиляльной головки с шиберным дисковым затвором изображена на рис. 3.71. От конструкции, показанной на рис. 3.70, она отличается тем, что корпус вентиляльной головки снабжен двумя консолями с заходом под них и упором вращаемой детали керамического дискового затвора. Маховик непосредственно охватывает эту деталь, обеспечивая ее вращение. Выпускное отверстие корпуса вентиляльной головки выведено в кольцевую проточку, сделанную в его нижней части.

Конструкция содержит корпус с впускным и выпускным отверстиями и консолью, керамический шиберный дисковый затвор (две детали), маховик, три

резиновых уплотнения. Детали достаточно просты в изготовлении. Корпус и маховик могут быть изготовлены из керамики.

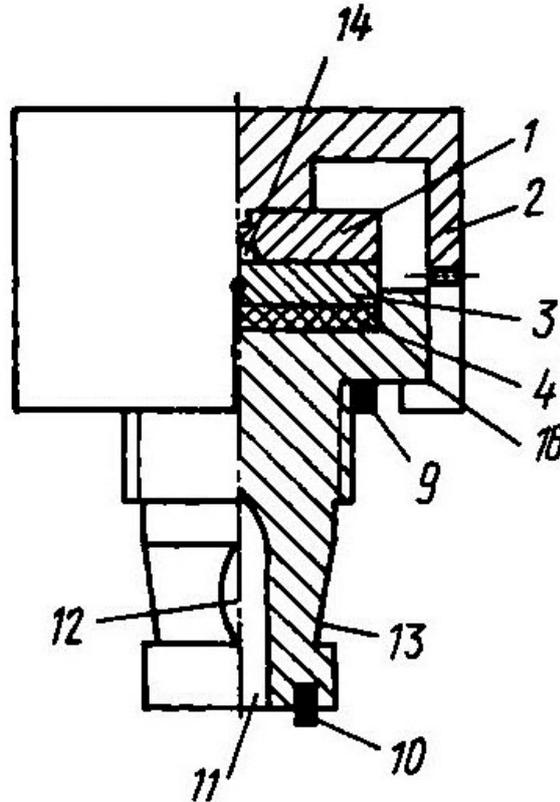


Рисунок 3.71 – Вентильная головка крана с керамической деталью в виде поворотного диска

Шиберный дисковый затвор является запорным элементом и состоит из поворотного керамического диска (1), соединенного с приводным элементом (2), и прижимаемого к нему неподвижного керамического диска (3), герметично соединенного через резиновую прокладку (4) с корпусом вентильной головки (5). Корпус снабжен двумя консолями (6) и (7). Поворотный керамический диск (1) заходит под консоли (6) и (7) и упирается в них. Консоль (7) несколько длиннее консоли (6). Приводной элемент (2) имеет упор (8), который при повороте упирается в консоль (7), что ограничивает угол поворота приводного элемента. Резиновая прокладка (4) прижимает неподвижный керамический диск (3) к поворотному керамическому диску (1). Корпус вентильной головки через резиновые или пластмассовые прокладки (9) и (10) прижат к арматуре крана или смесителя, образуя неподвижное герметичное уплотнение.

Таким образом, показано, что при проектировании керамических изделий (сменных вентильных головок крана водо- или кислотозапорной арматуры) возможно совмещение функций, а именно, маховика, корпуса и запорной детали керамическими деталями. При этом керамические детали заменяют металлические и выполняют 2-3 функции (маховик-запорная деталь, маховик-запорная деталь-корпус).

### **3.5.4 Изготовление керамических изделий сложной формы способом ламинирования**

В разделах 1 и 2 отдельное внимание было уделено аддитивным технологиям формования, которые, за счет последовательного нанесения слоев материала, позволяют избежать развития большинства формовочных и усадочных напряжений и снизить риск образования дефектов для изделий сложной формы. Один из наиболее старых способов аддитивного формования, известных и реализуемых еще до развития цифровых технологий – способ ламинирования – формование путем склеивания заранее изготовленных тонких слоев полуфабриката. Как и другие способы аддитивного формования ламинирование используют для формования изделий определенных сложных форм, например, тонких керамических подложек интегральных схем. Как и другие способы послойного формования, он позволяет формировать изделия, которые нерационально или практически невозможно формировать другими известными способами.

Далее приводится пример изготовления способом ламинирования тонких керамических елочных украшений в виде листьев и насекомых.

Изделия изготавливали из пластичной фаянсовой массы по схеме, представленной на рисунке 3.72, а. Массу предварительно готовили шликерным способом, используя добавку (5-10 %) волокон целлюлозы (продукт «Полицелл» [400], повышающую прочность сырца.

Оптимизировав по определенным технологическим (пластичность, формовочная влажность, прочность полуфабриката, усадка) и физико-химическим (прочность и водопоглощение спеченных образцов) свойствам количество до-

бавки, готовили шликер оптимального состава, обезвоживали до оптимальной формовочной влажности, вылеживали и вальцеванием на глинораскатчике [401] получали тонкие пластинки полуфабриката (0,2-2,0 мм).

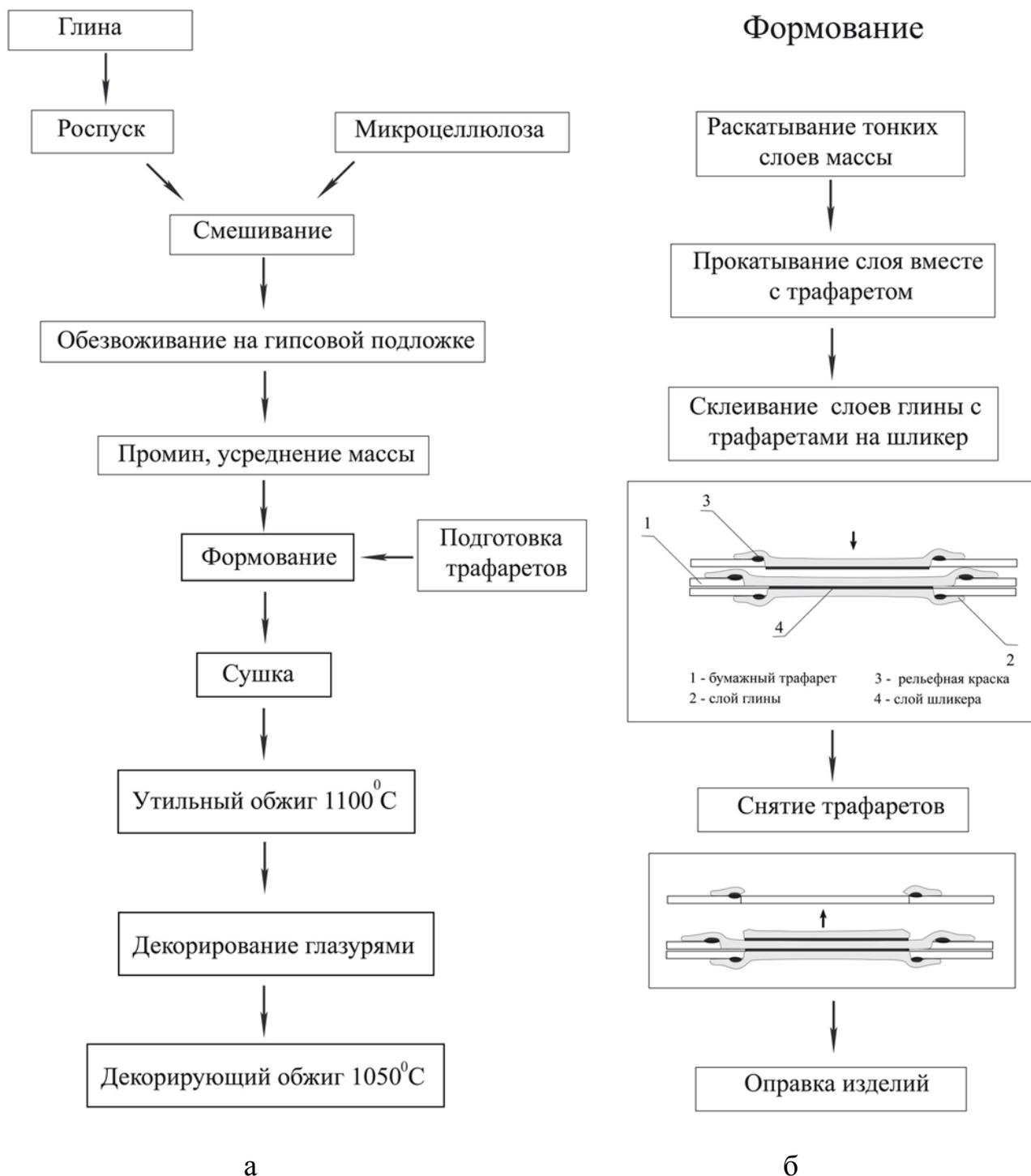


Рисунок 3.72 – Технологические схемы изготовления декорированных керамических пластин сложной формы: а – полная технологическая схема, б – схема формования способом ламинирования

Оптимальная толщина раскатанных пластин, обеспечивающая необходимую прочность) составила 0,8-1,0 мм. Раскатанные пластины склеивали между собой, используя специально приготовленные бумажные трафареты, обеспечивающие образование рельефных изделий за счет наличия краевых рельефов (рис. 3.73, а).

Полученные полуфабрикаты (рис. 3.73, б) состояли из 2-3 слоев, отличались достаточной прочностью в высушенном состоянии (предел прочности при изгибе 1,8 МПа).

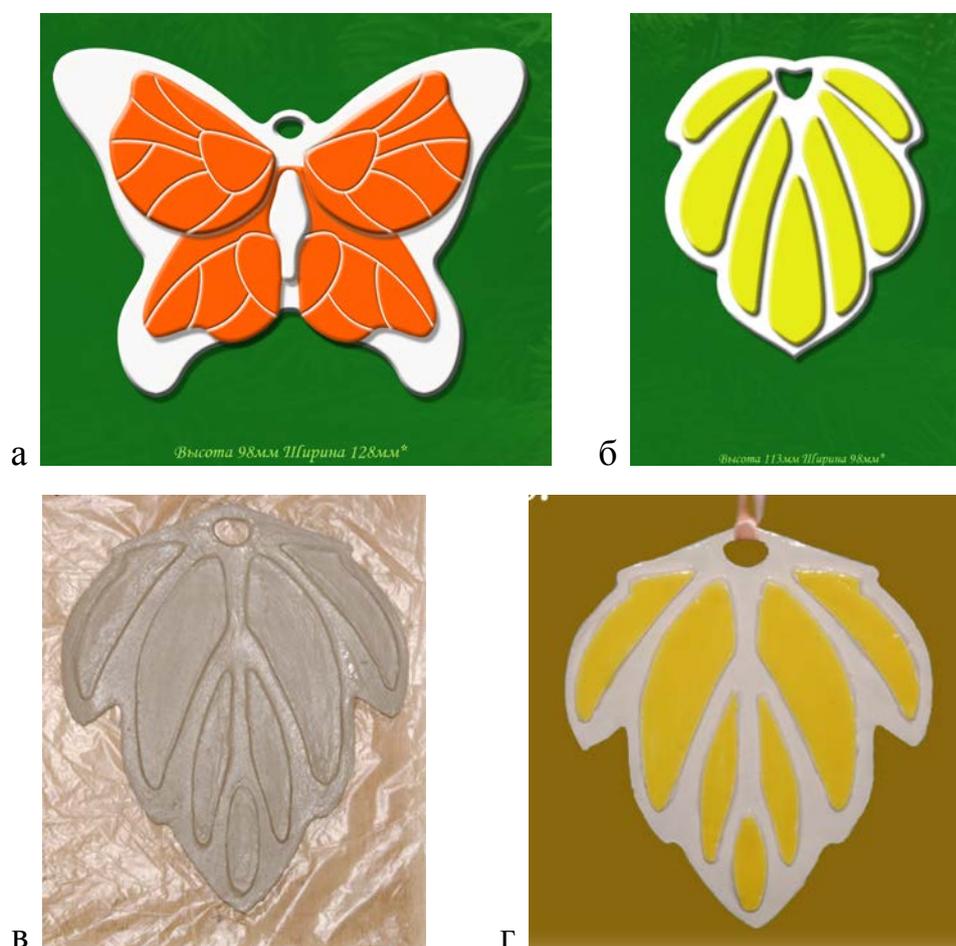


Рисунок 3.73 – Изображения: а, б – проектируемых изделий, в – полуфабрикат, г – готовое изделие, выполненных способом ламинирования

Отформованные полуфабрикаты предварительно обжигали при максимальной температуре 1100 °С с выдержкой 1 час в печи электросопротивления с карбидкремниевыми нагревателями.

После обжига образцы, изготовленные способом ламинирования, имели повышенную механическую прочность (предел прочности при изгибе 32,9 МПа) по сравнению с аналогичными образцами, изготовленными способом вальцевания из единого куска пластичной массы (предел прочности при изгибе 27,5 МПа).

Предварительно обожженные изделия покрывали глазурью и обжигали в подвешенном состоянии при максимальной температуре 1050 °С с выдержкой 0,5 часа.

Способ ламинирования, в числе других способов аддитивного формования дает возможность изготавливать керамические изделия сложной формы. Однонаправленные усилия формования, создающиеся при вальцевании, приводят к созданию направленной текстуры, усиленной волокнами целлюлозы, армирующими полуфабрикат. Усадочные усилия, создающиеся при сушке массы, сравнимые с огневыми (сушильная и обжиговая усадки около 5 %), сосредотачиваются в тонких слоях массы и релаксируют в ее армированной структуре, не вызывая трещин в толще полуфабриката, т. е. не переходя на следующий слой.

### **3.5.5 Сокращение технологических стадий изготовления и уменьшение массы керамического изделия**

В разделе 1 были в качестве основных инструментов ресурсоэффективности указаны совершенствование технологии и уменьшение массы керамических изделий. В этом разделе на примере оптимизации технологии керамической мешалки, применяемой при изготовлении стекла, показана эффективность использования этих инструментов.

Керамические мешалки применяются для перемешивания расплава стекломассы, обеспечивая ее однородность и способствуя удалению воздуха при варке стекла. К материалу и конструкции мешалок предъявляются высокие требования: огнеупорность (рабочая температура 1300-1500 °С), термостойкость и устойчивость к расплаву стекла (стеклоустойчивость).

Огнеупорность зависит от керамического материала, термостойкость можно существенно повысить, уменьшая фактор формы мешалки и совершенствуя ее конструкцию (избегая возникновения концентраторов напряжений). Повышение стеклоустойчивости возможно при нанесении защитного покрытия на поверхность мешалки.

Задачами проводимой работы было улучшение перечисленных выше свойств производимых керамических мешалок за счет:

1) уменьшения массы изделий с существенным сокращением фактора формы – изменения способа формования мешалки с заменой наливного способа, приводящего к образованию массивного полнотелого изделия на сливной, обеспечивающей формования полого изделия;

2) нанесения на поверхность мешалки защитного покрытия способом двухслойного формования шликерным литьем.

Были приготовлены шликеры для формования мешалки и покрытия и проведены исследования реологических свойств, определена скорость набора массы.

Масса для формования мешалки включала в себя глину, каолин и шамот трех фракций с преимущественным содержанием фракции менее 0,25 мм, глину и каолин. Состав покрытия включал в себя те же компоненты (табл. 3.22).

Таблица 3.22 – Состав сырья для изготовления керамической мешалки и покрытия

Компоненты состава	Содержание в составе массы для, %	
	Мешалки	Покрытия
Каолин Глуховецкий	20	-
Глина Часов-Ярская	20	20
Шамот	60	80
Добавка электролита (сверх 100 %)	0,5	0,5

Шликер изготавливали следующим образом: смешивали воду с электролитом, порционно добавляли глину и каолин, перемешивали в течении 20-

30 мин для стабилизации шликера, далее засыпали шамот и вновь перемешивали в течении 20-30 мин.

Для изготовления мешалок для варки высокотемпературных стекол в состав массы вводили добавку глинозема.

Шликер для нанесения покрытия готовили следующим образом: к готовой массе с влажностью 20 % добавляли электролит в количестве 0,5 масс. % на сухое вещество и перемешивали в течение 1 часа.

Для отработки технологических приемов изготовления мешалки с помощью фрезерного станка с числовым программным управлением была изготовлена гипсовая форма в масштабе 1:5 к крупногабаритным мешалкам заводского производства (рис. 3.74). С помощью этой формы изготовили образцы мешалок, на которых определяли необходимые толщины набранного слоя массы и определяли время сушки полуфабриката.



Рисунок 3.74 – Гипсовая форма с формованной заготовкой керамической мешалки

Для изготовления мешалок других пропорций, используемых для варки высокотемпературных стекол, изготавливали гипсовую форму, фрезерованную по построенным 3D-моделям (рис. 3.75).

Оценили реологическое поведение шликеров с помощью ротационного вискозиметра «Реотест» (см. раздел 3.1). На рис. 3.76 представлена зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига.

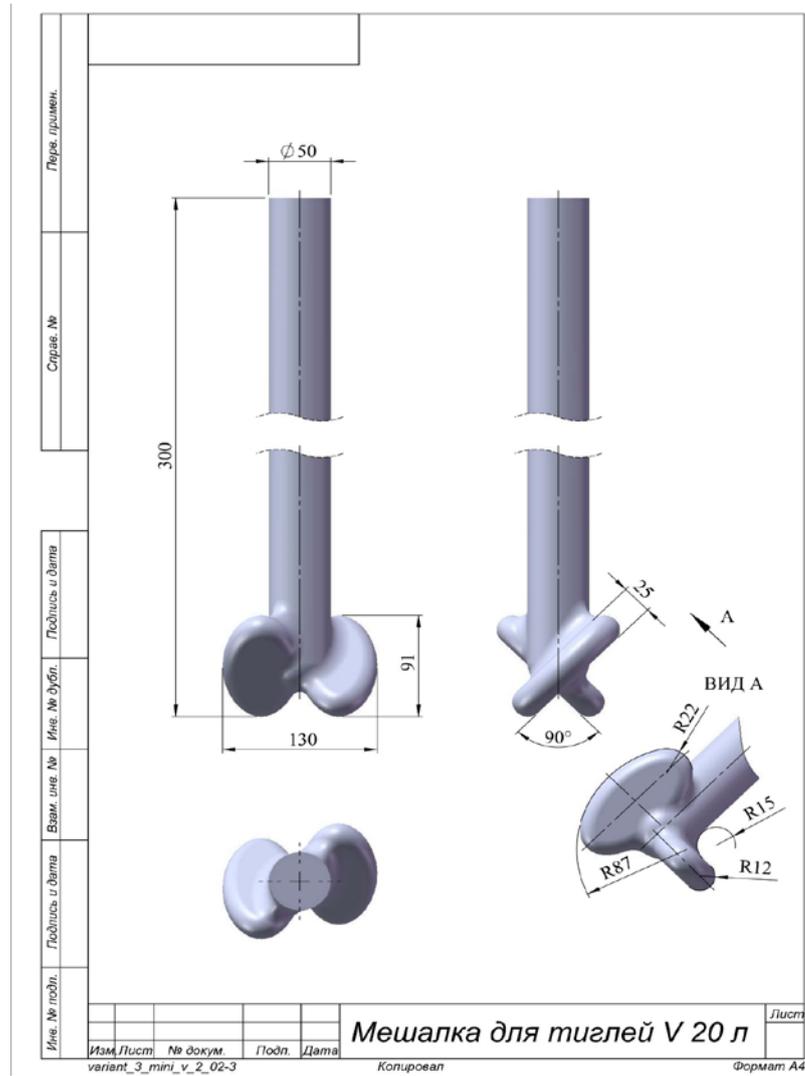


Рисунок 3.75 – 3D-модель рабочей части высокотемпературной мешалки

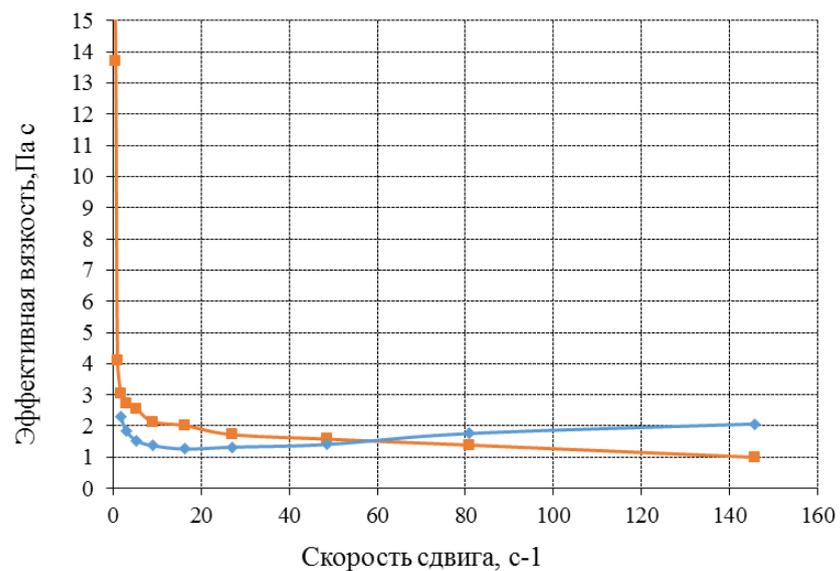


Рисунок 3.76 – Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига шликера для литья ■ – покрытия, ◆ – мешалки

Также были определены зависимости вязкости и скорости сдвига (рис. 3.77) от напряжения сдвига приготовленных шликеров.

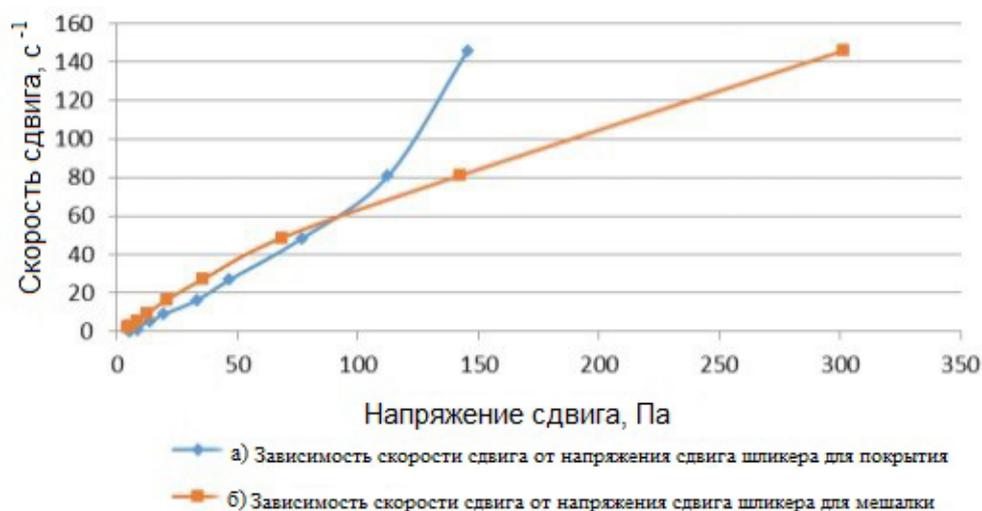


Рисунок 3.77 – Зависимость скорости сдвига от напряжения сдвига шликеров для формования, а – покрытия, б – мешалки

Оба приготовленных шликера отличались подобным реологическим поведением, достаточно низкой эффективной вязкостью и выраженной тиксотропией.

По зависимостям скорости набора массы, представленным на рис. 3.78, можно заключить, что из-за меньшего содержания глинистой составляющей и, соответственно, лучшей фильтрующей способности набор массы шликера для формования покрытия с течением времени быстрее, чем набор массы шликера для получения мешалки.

Этот вывод подтвердил предположение, что нанесение покрытия в процессе шликерного литья керамической мешалки не приведет к существенному увеличению времени формования.

На следующей стадии работы для получения полого изделия обрабатывали способ сливного шликерного литья, для чего было сконструировано простое устройство опрокидывания гипсовой формы, обеспечивающее слив избытка шликера и формование вблизи литникового отверстия формы слоя массы, достаточного для оформления при последующей оправки крепежного замка в виде байонетного затвора.

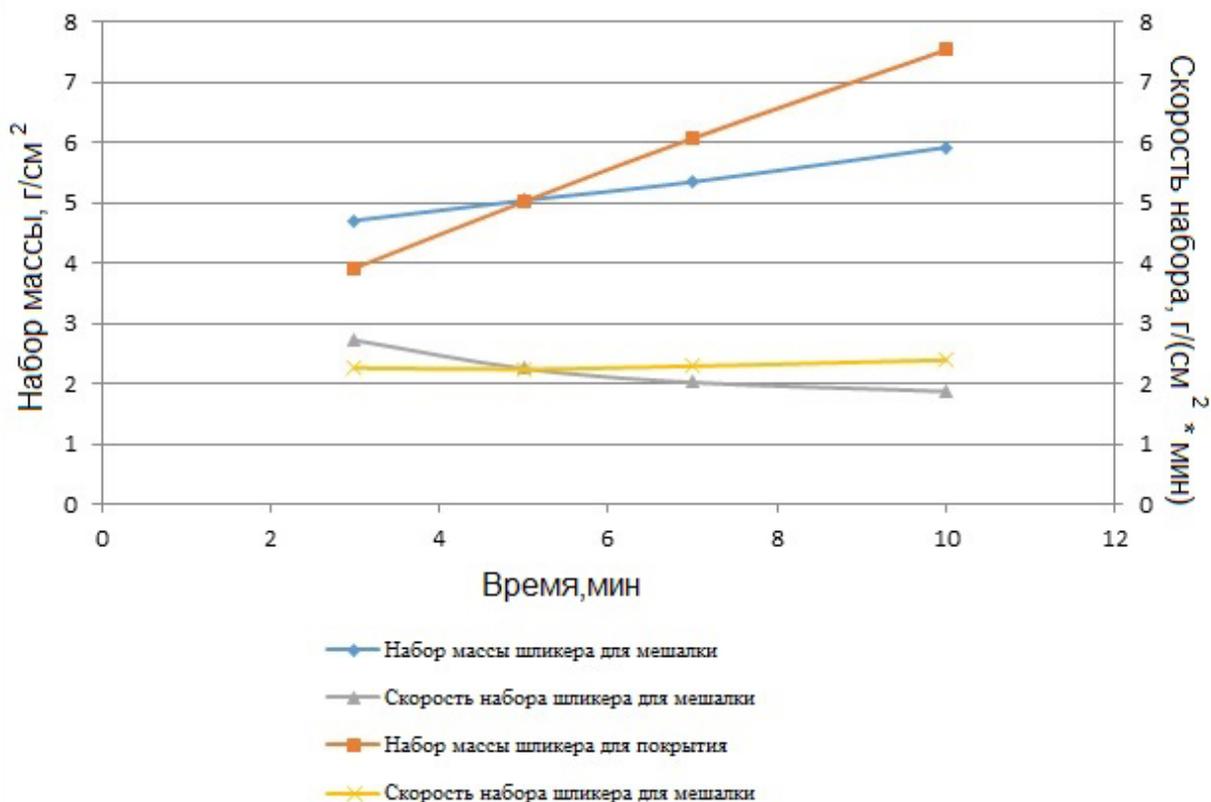


Рисунок 3.78 – Скорость набора массы шликера для литья мешалки и покрытия для неё

Общая технологическая схема формования полых керамических мешалок с покрытием показана на рис. 3.79.

Для отработки параметров формования образцы мешалок получали опрокидыванием формы по истечении 15-25 мин от заливки шликера в форму. Чтобы предотвратить обратное натекание шликера на дно формы и, таким образом, заметное утолщение дна изделия, форму оставляли в опрокинутом состоянии.

Изменение технологии формования (совмещение нанесения защитного покрытия в процессе формования, замена наливного способа шликерного литья на сливное и формирование полости) позволило сократить технологическую схему на 1 стадию (нанесение покрытия), уменьшить массу изделия (его фактор формы) и, соответственно, уменьшить количество используемого сырья в 2 раза. Также в 2 раза сократилось время сушки полуфабрикатов.



Рисунок 3.79 – Технологическая схема изготовления полых керамических мешалок с покрытием

### **Выводы по разделу 3.5:**

1. На примере разработки пористых керамических втулок продемонстрирована эффективность использование фактора формы изделия для оптимизации формы для условий как производства, так и эксплуатации.
2. Учет симметрии температурного поля при СВС-синтезе позволил достичь однородности образцов керамики из нитрида кремния, что выразилось в высоких показателях механической прочности.
3. На примере керамических деталей водозапорных устройств показана возможность увеличения количества выполняемых функций, что приводит к экономии материала.
4. Способом ламинирования получены тонкие фигурные керамические изделия, не проявившие деформаций в процессе изготовления.
5. На примере разработки керамической мешалки с защитным покрытием показано повышение ресурсоэффективности технологи, достигнутое за счет сокращения технологических стадий и уменьшения массы изделия.

### **Основные результаты исследования, приведенные в этом разделе, опубликованы в следующих работах:**

1. **Захаров А. И.** Керамика на основе нитрида кремния, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [Текст] / Лысенков А. С., **Захаров А. И.**, Загоржевский В. В. // Стекло и керамика. 2007. № 3. С. 17-19.
2. **Захаров А. И.** Оптимизация формы пористого керамического изделия [Текст] / **Захаров А. И.**, Андреев Д. В., Андреева Ж. В., Неклюдова Т. Л. // Техника и технология силикатов. 2017. № 4. С. 7-11.
3. Lysenkov A. S., Kargin Yu. F., Titov D. D., Petrakova N. V., Ivicheva S. N., **Zakharov A. I.**, Popova N. A., Zakorzhevskii V. V., Borovinskaya I. P. and Melnikova I. S. Construction ceramics from silicon nitride with calcium aluminates additives received by the sintering method in the SHS-

reactor. Proc. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Volume 347. 012040.

4. Беляков А. В., **Захаров А. И.** Сменная вентиляционная головка крана с шиберным дисковым затвором: пат. 2097633. Рос. Федерация. № 94004658/06; заявл. 09.02.94; опубл. 27.11.97, Бюл. № 33. 4 с.

5. Беляков А. В., **Захаров А. И.** Сменная вентиляционная головка крана с шиберным дисковым затвором: пат. 2111317. Рос. Федерация. № 96113694/03; заявл. 27.06.96; опубл. 20.05.98, Бюл. № 14. 8 с.

6. Боровинская И. П., Загоржевский В. В., **Захаров А. И.**, Каргин Ю. Ф., Лысенков А. С., Попова Н. А. Способ получения спеченных изделий на основе нитрида кремния: пат. 2458023 Рос. Федерация. № 2011108975/03; заявл. 11.03.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22. 5 с.

### Выводы по разделу 3

1. Исследована однородность фарфоровых изделий, формованных различными способами. Показано, что наибольшее различие в структуре материала наблюдается в поверхностном слое.

2. Разработан метод капиллярного всасывания, позволяющий оценивать однородность поверхности полуфабрикатов и керамических изделий сложной формы.

3. Установлена связь между однородностью полуфабрикатов различных форм, формованных разными способами, приведенным фактором их формы, условной вязкостью системы и параметрами формования.

4. В результате исследования поверхности полуфабрикатов из фаянса, фарфора и полуфарфора, обожженного при разных температурах, выявлено, что максимальная неоднородность поверхности наблюдается после обжига при 900-1100 °С.

5. Установлено, что возможность трещинообразования при сушке керамического полуфабриката определяется не только соответствием скорости сушки с его общим фактором формы – для изделий сложных форм необходим учет значений факторов формы отдельных частей полуфабриката.

6. С использованием метода конечных элементов осуществлено прогнозирование деформации фарфоровых изделий сложной формы в обжиге с учетом их фактора формы и температурной зависимости вязкости материала.

7. На примерах разработки форм различных керамических изделий продемонстрированы общие принципы их формообразования, применение которых способствует повышению их функциональности, качества и ресурсоэффективности технологии в целом.

Акт испытаний (от 08.02.2018 г.), подготовленный Федеральным государственным унитарным предприятием «Радон» (приложение 1.3) свидетельствует о том, что научные результаты, изложенные в разделе 3, нашли практическое применение при разработке изделий высокопористых адсорбентов алюмосили-

катного состава, применимых для промышленной переработки отработавшего трибутилфосфата. Использование адсорбентов, в виде втулок оптимизированной формы, прошедших опытно-промышленные испытания, позволяет использовать их для промышленной утилизации отходов с радионуклидами в шахтной печи установки «Плутон».

Научные результаты в части подходов к модификации формы изделий, увеличению их функциональности, рациональному выбору способа производства, изложенные в разделе 3, были использованы при выполнении международного проекта «Стандартизация и сертификация ресурсоэффективности предприятий промышленности строительных материалов в России (письмо координатора проекта об использовании результатов диссертационной работы от 15.02.2012 г. № 2012-17АГ, приложение 1.4).

## Заключение

Керамические изделия, благодаря стойкости материала к различного вида внешним воздействиям, используются человеком, по крайней мере, последние несколько тысяч лет. Значительная доля керамических материалов производится из уникального природного сырья – глин, которые придают формовочной массе пластичность. Занимая по своей структуре промежуточное положение между кристаллами минералов и природными полимерами, глинистые минералы (гидроалюмосиликаты) позволяют с легкостью формировать разнообразные формы – от естественных органоморфных, имеющих в своей основе шар (пример – емкости для приготовления, хранения и использования пищи) до кристалломорфных, имеющих граненную форму (пример – кирпичи и плиты для строительства). Анализ распространенности органоморфных и кристалломорфных форм в различные эпохи показал периодическое преобладание тех или иных форм, зависящее как от сложных социальных процессов, так и от технологии производства. Такие устойчивые формы, как параллелепипед, являющийся основой для строительного модуля (кирпич) в разные эпохи изменял свои пропорции, однако они колебались около неких оптимальных, обусловленных эргономическими характеристиками, связанных с ручной кладкой.

Современный период развития технологии ставит как перед дизайнерами, так и перед технологами задачу энергосбережения, что определяет необходимость рассматривать проектируемые изделия с учетом их полного жизненного цикла, уменьшать их массу и искать технологичные решения в производстве. Для наиболее распространенных керамических изделий, таких как строительные материалы (кирпич, плитка), это определяет не столько уменьшение их массы, как уменьшения их фактора формы или приведенной толщины (отношения массы изделия к площади его поверхности). Общей тенденцией в формообразовании является уменьшение массы изделий в том числе за счет увеличения их полифункциональности, уменьшения фактора формы изделий, сокращения технологических стадий. В решении последних двух задач большую

роль играют аддитивные технологии, позволяющие не только сократить время производства изделий, но и в обозримом будущем перейти к принципиально новым формам, определяемым функциями, а не технологией.

Пока же форма керамических изделий, хотя во многом и определяется функцией, однако такие свойства керамики, как хрупкость, и особенности технологии (прежде всего, необходимость высокотемпературной обработки) накладывают на нее существенные ограничения. В результате технологичность керамических изделий во многом обусловлена правильностью выбора способа формования, но и последующие стадии формования (сушка, обжиг) оказывают на нее существенное влияние.

Обзор способов формования керамических изделий, проведенный с учетом анализа шкал сложности изделий порошковой металлургии и пластических масс, позволил выявить следующие закономерности: сложность формуемых изделий определяется отклонением от простых геометрических форм и симметрии.

Главное условие получения бездефектного керамического изделия – сохранение его однородности на всех стадиях его производства. Анализ возможных технологических дефектов изделий привел к выводу, что их можно классифицировать на две категории – дефекты структуры, связанные с нарушениями однородности материала и дефекты формы. Значительная часть дефектов закладывается на стадии формования и является дефектами структуры материала, которые вызваны несоответствием прилагаемых усилий формования с возможностями диссипации подводимой энергии. Большую роль при этом играет соответствие симметрии поля прикладываемых напряжений конфигурации (симметрии) формуемого полуфабриката. Эффективная вязкость формуемой системы должна соответствовать усилиям формования. Снижение усилий формования при снижении вязкости формуемой системы (различные виды шликерного литья), а также за счет их более равномерного распределения по площади (изостатическое прессование) позволяют снизить неоднородность структуры формуемого материала. Коллоидные способы формования и, в частности,

быстро развиваемые сегодня способы 3D-формования, также позволяют существенно снизить усилия формования за счет чего возможно получение однородных изделий сложных форм.

На стадиях сушки и обжига наблюдается схожая картина, но преобладающими дефектами являются дефекты формы – трещины в деформации, имеющие масштаб изделия.

Эксперименты по исследованию степени неоднородности материала и поверхности полуфабриката, формируемого различными способами, показали существенную роль геометрического фактора формы изделия и относительных усилий формования.

Исследование трещиностойкости керамических полуфабрикатов различной формы показали, что несмотря на то, что продолжительность бездефектной сушки определяется фактором формы, необходимо учитывать распределение массы по объему изделия, которое можно выразить в факторах формы отдельных частей полуфабриката, представляющих объемы простых геометрических форм. Таким образом, необходимо учитывать характеристик симметрии формы.

Прогнозирование деформационного поведения керамического материала при обжиге возможно при учете изменения его вязкости в процессе спекания и учете фактора формы обжигаемого изделия. После получения высокотемпературной зависимости вязкости материала по разработанной методике на специально сконструированной установке были проведены расчеты методом конечных элементов, которые позволили с достаточной точностью определять деформацию фарфоровых изделий.

Формулировка проблемы соответствия полей внешних воздействий, создаваемых на разных стадиях технологии изготовления изделия, его симметрии позволили обратиться к анализу стабильности минеральных форм материи, который показал преимущественную роль симметрии, сформулированную П. Кюри в принципе суперпозиции симметрии. С учетом этого принципа выбору способа формования, сушки и обжига должен предшествовать анализ формы

проектируемого изделия. При проектировании необходимо учитывать, не только известные рекомендации конструирования керамических изделий, но и стремиться уменьшить фактор формы, увеличить симметрию, а также провести анализ полей напряжений, создающихся в условиях эксплуатации изделия.

## Общие выводы по работе

1. Продемонстрировано, что современный этап развития промышленного дизайна характеризуется ужесточением требований к технологиям в области ресурсоэффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду. При рассмотрении всех стадий жизненного цикла керамических изделий установлено, что стадия проектирования изделия является определяющей для обеспечения эффективного использования ресурсов при производстве и эксплуатации.

2. Показано, что керамические изделия, благодаря наибольшей стойкости материала к таким видам внешних воздействий, как термические, химические и механические, играют значительную роль в строительстве, быту и технике. Благодаря общим тенденциям снижения металлоемкости, увеличения доли натуральных материалов, увеличения полифункциональности и эффективности работы в условиях быстро меняющейся и агрессивной среды, значение новых видов керамики и материалов на ее основе возрастает.

3. Проведен анализ тенденций в формообразовании изделий промышленного дизайна на примерах керамических изделий с ретроспективой изменения их форм, в том числе анализ форм современных керамических изделий массового использования на примерах бытовых, огнеупорных и строительных изделий. Показана значительная роль симметрии в изделиях, которые производились в прежнее и выпускаются в настоящее время. Подчеркнуто, что на современном этапе прослеживается тенденция к органоморфному дизайну облегченных керамических изделий, производство которых требует развития новых технологий (способов формования и термообработки). Подчеркнуто значение новых способов формования и спекания керамических изделий для современного этапа развития дизайна и технологии.

4. Предложена общая классификация дизайна керамических изделий (облицовка, емкости, конструкции), учитывающая технологии производства и эксплуатационные требования. Классификация произведена по функциональ-

ным признакам и особенностям формообразования, связанных с симметрией изделий.

5. Разработаны научные подходы к оценке технологичности керамических изделий с позиции их формообразования и критериев сложности формы на основе анализа способов формования керамических изделий и изделий из других искусственных материалов с ретроспективой их развития. Показано, что технологичность керамических изделий определяется отклонением от простых геометрических форм и симметрии. Продемонстрирована роль фактора формы с общей тенденцией к его снижению в дизайне современных изделий.

6. Проведен анализ технологических дефектов керамических полуфабрикатов и изделий на разных стадиях производства, определены дефекты, образование которых зависит от формы полуфабриката. Наибольший эффект может быть достигнут проектированием изделий и технологии, обеспечивающим снижение массы изделий, увеличение количества его функций и сокращение числа технологических переделов. Предложена классификация технологических дефектов; выделены дефекты структуры и дефекты формы изделий (трещины и деформации), оказывающие влияние на дизайн изделий.

7. Разработаны принципы дизайна (формообразования и конструирования) керамических изделий на основе общих критериев технологичности, ресурсосбережения и повышения их функциональной эффективности. Показано, что наибольший эффект может быть достигнут проектированием изделий и технологии, обеспечивающим снижения массы изделий, увеличения количества его функций и сокращение числа технологических переделов. Продемонстрирована возможность использования принципа суперпозиции симметрии П. Кюри при разработке дизайна керамических изделий.

8. Исследована однородность материала при различных способах формования и термообработки как определяющее условие получения бездефектного изделия. Предложен способ определения неоднородности по измерению локальной открытой пористости. Показано влияние фактора формы изделия и относительных усилий формования.

9. Выполнен анализ влияния формы полуфабриката на трещинообразование при его сушке. Показано, что решающую роль играет распределение массы по объему изделия, которое можно выразить в факторах формы отдельных частей полуфабриката, представляющих объемы простых геометрических форм.

10. Проведено моделирование деформационного поведения керамического материала при его обжиге на примере твердого фарфора. Моделирование выполнено методом конечных элементов и основано на предварительно полученной зависимости изменения эффективной вязкости в процессе спекания; учтен также фактор формы обжигаемого изделия. Проведенные расчеты позволили с достаточной точностью определить деформацию фарфоровых изделий, что было подтверждено экспериментально.

11. Продемонстрированы аспекты практической применимости основных принципов формообразования керамических изделий при проектировании изделий с уменьшенным фактором формы при соблюдении соответствия (1) симметрии формы изделия (2) симметрии используемых способов производства и (3) симметрии воздействий при эксплуатации; применение указанных принципов способствует увеличению технологичности изделий и ресурсоэффективности производства.

### Благодарности

Автор благодарен научному консультанту, профессору Т. В. Гусевой за поддержку и помощь в подготовке работы; искренне признателен профессорам Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева – А. В. Белякову и Е. С. Лукину за конструктивные дискуссии во время выполнения работы и полезные советы; благодарен профессору Томского политехнического университета М. С. Кухта за плодотворное сотрудничество; признателен профессору МИРЭА – Российского технологического университета М. Л. Соколовой и профессору Московского политехнического университета М. Ю. Ершову за ценные советы, данные на заключительном этапе подготовки работы; благодарен коллективам кафедр химической технологии керамики и огнеупоров и общей технологии силикатов Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева за многолетнюю дружескую помощь и поддержку.

## Литература

1. Большая советская энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров, 3-е изд. М.: «Советская энциклопедия», Т. 8, Дебитор – Евкалипт, 1972. 592 с.
2. Рунге В. Ф. История дизайна, науки и техники / Рунге В. Ф. Учебное пособие. Издание в двух книгах. Книга 1. М.: Архитектура-С, 2006. 368 с.
3. М. С. Кухта, Л. Т. Жукова, М. Г. Гольдшмидт Основы дизайна. Томск. Издательство Томского политехнического университета, 2009. 288 с.
4. И. А. Розенсон Основы теории дизайна. Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2013. 253 с.
5. World Design Organization / Vision and mission. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://wdo.org/about/vision-mission/> (дата обращения: 21.03.2019).
6. В. Н. Княгинин Промышленный дизайн Российской Федерации: возможность преодоления «дизайн-барьера» / Учебное пособие / Под ред. М. С. Липецкой, С. А. Шмелевой СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 80 с. С. 10 цит. по [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://www.csr-nw.ru/files/publications/zk4.pdf> (дата обращения 21.07.2017).
7. К. Н. Пруслина Русская керамика (конец XIX, начала XX в.). Изд-во Наука, М.: 1974. 136 с.
8. Промышленный дизайн: учебник / М. С. Кухта, В. И. Куманин, М. Л. Соколова, М. Г. Гольдшмидт / Под ред. И. В. Голубятникова, М. С. Кухта, Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 312 с.
9. Калиничева М. М., Жердев Е. В., Новиков А. И. Научная школа эргодизайна ВНИИТЭ: предпосылки, истоки, тенденции становления. М: ВНИИТЭ, Оренбург. ИПК ГОУ ОГУ, 2009. 368 с.
10. Пигальская А. М. Подходы к конструированию истории дизайна и его практики // «Культурологический журнал» 2012/2 (8). [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: [http://www.cr-journal.ru/rus/journals/131.html&j\\_id=10](http://www.cr-journal.ru/rus/journals/131.html&j_id=10).

11. З. Г. Бегенау Функция, форма, качество. Пер. с нем. Ал. Дижера и М. М. Субботина. М.: Изд-во «Мир», 1969. 168 с.
12. Михеева М. М. Дизайн-исследования по курсу «Проектирование и моделирование промышленных изделий (Дизайн-проектирование)» М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2009. 85 с.
13. Норман, Дональд А. Дизайн промышленных изделий. Пер с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2009. 384 с.
14. Е. И. Чалова, В. Л. Жуков Перспективы применения технической конвергенции в области современного дизайна. Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов // Материалы VI-й междунар. научно- практ. конф. вузов России, СПГУТД. СПб: ФГБОУВПО «СПГУТД», 2015. 376 с.
15. Тьялве Э. Краткий курс промышленного дизайна. / Пер. с англ. П. А. Кунина. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.
16. Прахт К. Мебель и архитектура / Пер. с нем. Ю. Б. Тупталова / Под ред. А. В. Иконникова. М.: Стройиздат, 1993. 168 с.
17. Цели развития тысячелетия: доклад за 2013 год [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.un.org/ru/millenniumgoals/pdf/Russian2013.pdf> (дата обращения: 09.04.2015).
18. Pentagon Design / A Strategic Design Agency at your service. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.pentagondesign.fi> (дата обращения: 09.04.2014).
19. Абрахам Маслоу Мотивация и личность / Перевод А. М. Татлыбаевой / Abraham H. Maslow. Motivation and Personality (2<sup>nd</sup> edition) N.Y.: Harper & Row, 1970 / СПб.: Евразия, 1999. / Терминологическая правка В. Данченко. К.: PSYLIB, 2004. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://poznaisbya.com/psylib/books/masla01/index.htm> (дата обращения: 10.08.13).
20. Адриан Форти Объекты желания. Дизайн и общество с 1750 года. М.: Изд-во Студии Артемия Лебедева, 2011. 480 с.

21. Бассейновая программа РОО. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://www.keramcity.ru/stati\\_o\\_plitke/pool\\_rako.php](http://www.keramcity.ru/stati_o_plitke/pool_rako.php) (дата обращения: 09.04.2015).
22. GISAP [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://gisap.eu/ru/node/23465> (дата обращения: 09.04.2015).
23. Перспективные технологии терморегулирования ZI Russia // 1/2015 Кирпич и черепица / Brick and Tile Industry International. с. 34-38.
24. Вольтер Ф. Эстетика. Статьи. Письма. М.: Искусство, 1974. 392 с.
25. А. В. Коротков, И. М. Синяев. Управление маркетингом: учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2005. 463 с.
26. И. Ш. Шевелев, М. А. Марутаев, И. П. Шмелев Золотое сечение. Три взгляда на природу гармонии. М.: Стройиздат, 1990, 345 с.
27. Х. Моде Малая история искусств. Искусство южной и юговосточной Азии. Пер. с нем. А. И. Исаевой. М.: Искусство, 1978. 357 с.
28. Смолина Н. И. Традиции симметрии в архитектуре. М.: Стройиздат, 1990. 344 с.
29. Фрейверт Л. Б. Архетипы художественного формообразования средовых объектов // Вестник ОГУ, 2005, № 6. Приложение. С. 28-34.
30. Л. Б. Фрейверт Архетип в художественном формообразовании современного дизайна // Полигнозис, 3-4(42), 2011.
31. Останина П. А. Метод оценки фактуры материалов как элемента дизайна изделий: автореферат дис. ... кандидата технических наук. СПб.: 2013. 16 с.
32. Соколов А. П., Кухта М. С., Данила К. Г. Анализ процессов формообразования в дизайне декоративных светильников // Дизайн. Материалы. Технология, 2012, 1(12). С. 10-15.
33. В. Б. Мириманов Малая история искусств. Первобытное и традиционное искусство. М.: Изд-во «Искусство» и Verlag der Kunst, 1973. 319 с.
34. Кох Вильфред Энциклопедия архитектурных стилей. Классический труд по европейскому зодчеству от античности до современности / Пер. с нем. М.: БММ АО, 2005. 528 с.

35. Robert B. Heimann *Classic and Advanced Ceramics From Fundamentals to Applications* WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010. С. 3-4.
36. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. С. Barry Carter, M. Grant Norton / Second Editionness Media / Springer Science+Busi New York 2013. 766 p.
37. ФГУП ВИАМ. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://viam.ru/memory\\_materials](http://viam.ru/memory_materials) (дата обращения 02.07.17).
38. Вольтер Ф. Эстетика. Статьи. Письма. М.: Искусство, 1974. 392 с.
39. Мириманов В. Б. Изображение и стиль: Специфика постмодерна. Стилистика 1950–990-х. М.: РГГУ, 1998. 80 с.
40. А. И. Захаров, А. В. Беляков, А. Н. Цвигунов *Формы выделения соединений кремния в рисовой шелухе*. // *Стекло и керамика*, 1993, № 9 10. с. 37-41.
41. В. И. Вернадский *Очерки геохимии четвертое* (2-ое русское издание), ОНТИ НКТП СССР, Государственное научно-техническое ГОРНО-ГЕОЛОГО-НЕФТЯНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО, Москва, Ленинград, Грозный, Новосибирск, 1934. 383 с. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://books.e-heritage.ru/book/10079901> (дата обращения 02.07.17).
42. Щуров А. Ф. *Введение в физику керамики / Учебное пособие для студентов, обуч. по спец. «Физика»*. Н. Новгород: изд-во Нижегородского университета, 1994. 166 с.
43. *Симметрия в твердом теле* Р. Нокс, А. Голд / Пер. с англ. / Под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. М.: Изд-во Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1970. 424 с.
44. Вадим С. Урусов *Правизна-левизна в живой и неживой природе (от В. И. Вернадского до наших дней) // Вернадский и XXI век: геосфера, биосфера, ноосфера и симметрия*, 2013. София: ИК «Св. Иван Рильски», С. 14-25. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://www.bgd.bg/EDITIONS/VERNADSKI/pdf/02\\_Urusov.pdf](http://www.bgd.bg/EDITIONS/VERNADSKI/pdf/02_Urusov.pdf) (дата обращения 02.07.17).
45. П. Эткинс *Порядок и беспорядок в природе / Пер. с англ.* М.: Мир, 1987. 224 с.

46. Богачихин М. М. Керамика Китая. История, легенды, секреты. М.: ООО Фаст-принт, 1998. 386 с.
47. А. Н. Кубе История фаянса. Р.С.Ф.С.Р. Государственное издательство Берлин, 1923. 119 с.
48. А. Б. Салтыков Избранные труды / Художественные формы фарфоровых сосудов. М.: Советский художник, 1962. 727 с. С. 571-616.
49. К. Н. Гаврилин «Глиняный Рим»: новые материалы по истории ранне-римской художественной культуры // Искусство и образование, 2007, №7. С. 58-76.
50. Ruppik M. Use of low-energy pore-forming agents for further quality improvement of lightweight vertically perforated bricks. P. 72-93. Zi-ANNUAL. Annual for the Brick and Tile, Structural Ceramics and Clay Pipe Industries. Edited by Annet Fischer. Bauverlag BV GmbH Guterloh. 2008. 304 p.
51. П. Н. Мусиенко Керамика в архитектуре и строительстве. Издательство украинской академии архитектуры Украинской ССР. Киев: 1953. 127 с.
52. Кирпич: Архитектурная история / Пер. с нем. James W. P. Campbell & William Pрусе, Кирпич. Архитектурная история: от истоков создания до наших дней. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.uktus.ru> (дата обращения 1.06.2015).
53. А. М. Салахов, В. И. Ремизникова, О. В. Спирина, А. Ю. Молчанова Производство строительной керамики. Казань: Центр инновационных технологий, 2003. 292 с.
54. Лапунова К. А., Котляр В. Д. Дизайн и виды керамического кирпича в строительной истории человечества // Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции по специальности технология художественной обработки материалов / Ростов-на-Дону, 2009, с. 80-85.
55. ГОСТ 530-2012 Кирпич и камни керамические. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 39 с.
56. И. В. Блохина Всемирная история архитектурных и стилей. М.: АСТ, 2014. 400 с.

- 57.** CERASPAÑA 2014 / КЕРАМИКА / АРХИТЕКТУРА / ДИЗАЙН. 33. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.tileofspain.ru/upload/iblock/49e/CERASPA%C3%91A%2033%20RUSO%20DEF.pdf> (дата обращения 09.04.2010).
- 58.** Томаев Г. Н. Резная майоликовая мозаика в архитектуре Средней Азии. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951. 120 с.
- 59.** Н. А. Сазонова Государственный музей Востока. Искусство Ирана. М.: РА «СОРЕК», 1994. 47 с.
- 60.** Т. С. Семенова, К. Г. Огаджанов и др. Керамический гранит в архитектуре. М.: Ард-Центр, 2011. 232 с.
- 61.** Инновации больших плит начинаются с «малых форматов» Andrea Gozzi Sistem Lamina (Fiorano, Italy) // Ceramic Word Review Batimat Russia 2017. С. 24-28.
- 62.** Reh H. The Ranking of the European Ceramic Industry in the Ever Increasing Globalisation Process. P. 11-24. Ceramic Forum International Yearbook 2005. Edited by Hubertus Reh. Goller Verlag Baden-Baden. 2005. 174 p.
- 63.** Chiara Bruzzichelli Серьезный вызов группы Iris-GraitiFiandre // Ceramic Word Review / Технология, новости, рынок. Русское издание. / Batimat Russia & MosBild 2015. С. 18-20.
- 64.** Г. Грубе, Д. Кучмар Путеводитель по архитектурным формам. Справочник / Пер. с нем. М. В. Алешечкиной. М.: Стройиздат, 1990. 216 с.
- 65.** Л. Кибалова, О. Гербенова, М. Ламарова Иллюстрированная энциклопедия моды. / Пер. на русский язык И. М. Ильинской, А. А. Лосев. Прага: Изд-во Артия, 1966. Первое изд. на русском языке 1986. 608 с.
- 66.** Кухта М. С. История искусств: учебник / М. С. Кухта Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 269 с.
- 67.** Brick'06 Brick Award 2006. The very best of European brick architecture. 2006. Verlag Georg D. W. Callwey GmbH & Co. KG, München. 223 p.

68. Brick'10 Brick Award 2010. Verfarg Georg D. W. Callwey GmbH & Co. KG, München. 238 p.
69. Public private ephemeral. Ceramic in architecture. ASCER. EU. 2008. 157 p.
70. Moulding. Assembling. Designing. Ceramic in architecture. ASCER. EU. 2009. 158 p.
71. Rhythms, Cycles, Performances. Ceramic in architecture. ASCER. EU. 2010. 157 p.
72. CERASPAÑIA/22/2009/ КЕРАМИКА / АРХИТЕКТУРА / ДИЗАЙН Облачение из керамики для офисного здания. С. 26-29.
73. CERASPAÑIA/21/2009/ КЕРАМИКА / АРХИТЕКТУРА / ДИЗАЙН Керамическое покрывало дворца конгрессов в Арагоне. С. 12-15.
74. CERASPAÑIA/26/2010/ КЕРАМИКА / АРХИТЕКТУРА / ДИЗАЙН Экономика современной архитектуры. С. 20-22.
75. CERASPAÑIA/24/2010/ КЕРАМИКА / АРХИТЕКТУРА / ДИЗАЙН Набережная Поньенте в городе Бенидорм удостоена первой премии «Керамика» в области архитектуры. С. 10-13.
76. CERASPAÑIA/34/2014/ КЕРАМИКА / АРХИТЕКТУРА / ДИЗАЙН Несовершенная гармония. С. 3-6.
77. CERASPAÑIA/36/2016/ КЕРАМИКА / АРХИТЕКТУРА / ДИЗАЙН В ритме керамики: стены и полы с эффектом движения. С. 3-5.
78. ИСО 9004-1-94 Управление качеством и элементы системы качества. Часть 1. Руководящие указания. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://www.gosthelp.ru/text/ISO9004194Upravleniekache.html>.
79. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005 Системная инженерия Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ, 2006. 54 с.
80. ГОСТ Р ИСО 14040 Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. М.: Стандартинформ, 2010. 18 с.
81. Центры и структура издержек Питер Ф. Друкер Глава из книги «Эффективное управление предприятием». [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://www.cfin.ru/management/finance/cost/structure.shtml>.

- 82.** ГОСТ Р 15.000-94 Система разработки и постановки продукции на производство. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2008. 10 с.
- 83.** ГОСТ Р 53791-2010 Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2011. 8 с.
- 84.** Методические основы экологической оценки строительных материалов. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://art-con.ru/node/2709> (дата обращения 09.04.2010).
- 85.** Уваров А. В. Экологический дизайн: опыты исследования процессов художественного проектирования: автореферат дис. ... кандидата искусствоведения. М.: 2010. 18 с.
- 86.** А. А. Арутюнян Искусство дизайна: этический и экологический аспекты // Вестник СПбГУКИ. № 3 (28), 2016. С. 155-158.
- 87.** Павлова А. Е. Рост наукоемкости производства и изменения в структуре затрат // Креативная экономика. 2012. № 12 (72). С. 118-124. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.creativeconomy.ru/articles/26621/>.
- 88.** Reference Document on Best Available Techniques in Ceramic Manufacturing Industry. The European IPPC Bureau, 2007. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Materialwissenschaft\\_2/brevier.pdf](http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Materialwissenschaft_2/brevier.pdf) (дата обращения 12.04.2015).
- 89.** Информационно-технический справочник «Производство керамических изделий». М.: Бюро НДТ, 2015. 222 с. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=498&etkstructure\\_id=1872](http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=498&etkstructure_id=1872).
- 90.** А. В. Можжерин, А. П. Маргишвили, В. А. Мусевич, А. П. Дука Совершенствование дизайна и материалов футеровок сталеразливочных ковшей // Новые огнеупоры, 2015, № 8. С. 31-33.
- 91.** Vasco Mazzanti Сложности литья под высоким давлением // Ceramic Word Review / Технология, новости, рынок. Русское издание. / Batimat Russia & MosBild 2015, с. 26-28.

- 92.** Tableware plants. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.sama-online.com/en-US/Products/Complete-plants-for-Tableware.aspx?idC=66366&LN=en-US> (дата обращения 09.04.2010).
- 93.** ГОСТ 14.205-83 Технологичность конструкции изделий Термины и определения М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР. 26 с.
- 94.** Бегак М. В., Гусева Т. В., Боравская Т. В., Руут Ю., Молчанова Я. П., Захаров А. И., Сивков С. П. Наилучшие доступные технологии и комплексные экологические разрешения: перспективы применения в России / Под ред. М. В. Бегака. М.: ООО «ЮрИнфоР-Пресс», 2010. 220 с.
- 95.** ИКЕА. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://www.ikea.com/ms/ru\\_RU/this-is-ikea/democraticdesign/index.html?icid=itl|ru|adv\\_block|201507201023389132\\_18](http://www.ikea.com/ms/ru_RU/this-is-ikea/democraticdesign/index.html?icid=itl|ru|adv_block|201507201023389132_18) (дата обращения 03.04.2011).
- 96.** SlimmKer. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <https://www.inalco.es/slimmker-gastro/> (дата обращения 09.10.2016).
- 97.** Лукич Г. Е. Конструирование художественных изделий из керамики. М.: Высшая школа, 1979. 182 с.
- 98.** Т. И. Кашина Керамика культуры Яншао. Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1977. 168 с.
- 99.** Акунова Л. Ф., Приблуда С. З. Материаловедение и технология производства художественных керамических изделий. М.: Высшая школа, 1979. 216 с.
- 100.** КЕРАМИКА. Выдълка фаянсовыхъ, фарфоровыхъ, терракотовыхъ, маіоликовыхъ, каменныхъ, изделий, мундштуковъ, трубокъ, пуговиць и т. п., выдълка черепицы различныхъ сортовъ. Производство печныхъ изразцовъ и проч. Составил инженер М. Новгородский. С.-ПЕТЕРБУРГЪ ИЗДАНИЕ В. И. ГУБИНСКОГО, 1912. 110 с.
- 101.** Сентенс Б. Керамика. Путеводитель по традиционным техникам мира. М.: АСТ-Астрель, 2005. 216 с.

- 102.** Wedgwood style. Three Centuries of Distinction. Hamilton Darby Peery / Introduction by Lord Wedgwood. Josiah Wedgwood & Sons Limited. Barlaston Stoke-on-Trent England, 2001. 255 p.
- 103.** А. Г. Добровольский Шликерное литье Изд. 2-ое, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1977. 240 с.
- 104.** The Potter's Dictionary of materials and techniques. Fifth edition Frank and Janet Hamer. A&C Black•London University of Pennsylvania Press•Philadelphia. 2004. 437 p.
- 105.** Kingery W. D., Vandiver P. B. Ceramic Masterpieces. Art, Structure and Technology. New-York – London: Free Press, 1986. 339 p.
- 106.** Процессы керамического производства / Пер. с англ. А. М. Черепанова / Под ред. П. П. Будникова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. 280 с.
- 107.** О выборе технологии производства керамических масс / Быхова А. Ф., Ничипоренко С. П., Хилько В. В. Киев: Наук. Думка, 1980. 52 с.
- 108.** Процессы изостатического прессования / Под ред. Джеймса П. Дж. / Пер. с англ. Папинова И. И. и Пахомова Я. Д. М.: Металлургия, 1990. 192 с.
- 109.** Лукин Е. С., Андрианов Н. Т. Технический анализ и контроль производства керамики. М.: Стройиздат, 1986. 272 с.
- 110.** Handbook of Advanced Ceramicsю Materials, Applications, Processing, and Propertiesю Second Edition Shigeyuki Somiya, Editor-in-Chief Professor Emeritus of Tokyo Institute of Technology, Japan AMSTERDAM – BOSTON – HEIDELBERG – LONDON NEW YORK – OXFORD – PARIS – SAN DIEGO SAN FRANCISCO – SINGAPORE – SYDNEY – TOKYO Academic Press is an Imprint of Elsevier, 2013. 386 p.
- 111.** Jürgen G. Heinrich Introduction to the principles of ceramic forming. 2004. 84 p. [Электронный ресурс]: Режим доступа: DVD-ROM.
- 112.** Пивинский Ю. Е. Теоретические аспекты технологии керамики и огнеупоров. // Избранные труды Т. 1. Санкт-Петербург: Стройиздат, 2003. 544 с.
- 113.** CERAMICS AND COMPOSITES PROCESSING METHODS EDITED BY Narottam P. Bansal, Aldo R. Voccaccini A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLI-

CATION Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Published simultaneously in Canada. 585 p.

**114.** Jennifer A. Lewis Colloidal Processing of Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2000. 83 [10]. P. 2341-59.

**115.** A. Gebhardt Vision Rapid Prototyping. Generative Manufacturing of Ceramic Parts – A Survey // CLI/ DKG 2006. No. 13 (83). P. 7-12.

**116.** Kraft T. Optimizing press tool shapes by numerical simulation of compaction and sintering – application to a hard metal cutting insert / T. Kraft // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 2003. № 11. P. 381-400.

**117.** Kaufmann U., Ritzhaupt-Kleissl H-J., Harrysson U., Johander P FASTFAB – a Process for the Free-form Fabrication of 3D Ceramic Components // cfi/Ber. DKG/ 2006. No. 13 (83), P. 13-17.

**118.** В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, М. Ю. Федоров, Е. А. Остриков Технологическое обеспечение операций лазерного формообразования керамических деталей // Новые огнеупоры, 2017, № 3. С. 43-44.

**119.** Использование 3D-принтеров в обучении САПР. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://picaso-3d.com/ru/press/sapr\\_picaso3d/](http://picaso-3d.com/ru/press/sapr_picaso3d/) (дата обращения 08.08.2016).

**120.** Н. М. Максимов Аддитивные технологии в строительстве: примеры и перспективы применения (часть 2) // Аддитивные технологии, 2018, № 1. С. 36-42.

**121.** Alaadien Khalyfa, Wolfgang Meyer, Matthias Schnabelrauch, Sebastian Vogt, Hans-Jurgen Richter Manufacturing of Biocompatible Ceramic Bone Substitutes by 3D-Printing // Rapid Prototyping Special Edition Peter Greil, Andreas Roosen, Nahum Travitzky cfi/ Ber. DKG. 2006. 83. P. 23-26.

**122.** WASP предлагает печатать костные имплантаты из глины. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://3dtoday.ru/industry/wasp-predlagaet-pechatat-kostnye-implantaty-iz-gliny.html> (дата обращения 19.04.2017).

- 123.** Печать домов на 3D-принтере [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <https://make-3d.ru/articles/3d-printer-dlya-pechati-domov/> (дата обращения 04.01.2018).
- 124.** Н. М. Максимов Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы // Аддитивные технологии, 2017, № 4. С. 54-62.
- 125.** Н. М. Максимов Мировой рынок аддитивных технологий // Аддитивные технологии, 2017, № 2. С. 17-23.
- 126.** Давиденко А. А. Аддитивное производство набирает обороты // Аддитивные технологии, 2017, № 1. С. 24-28.
- 127.** Производство электронно-лучевой палочкой. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://3dprofy.ru/proizvodstvo-ehlektronno-luchevoj-pla/> (дата обращения 09.04.2010).
- 128.** DMLS Direct Metal Laser Sintering. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://dmls.net/> (дата обращения 11.11.2017).
- 129.** 3D Printing Industry. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://3dprintingindustry.com> (дата обращения 19.11.2017).
- 130.** Технологии 3D-печати [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.modelin3d.ru> (дата обращения 09.04.2010).
- 131.** Технологии 3D-печати [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <https://can-touch.ru/3d-technologies/> (дата обращения 19.11.2017).
- 132.** Все что нужно знать о профессиональной 3D-печати [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://3d.globatek.ru/world3d/osnovy\\_3D\\_pechati/](http://3d.globatek.ru/world3d/osnovy_3D_pechati/) (дата обращения 19.11.2017).
- 133.** K. K. B. Hon, L. Li, I. M. Hutchings Direct writing technology – Advances and developments CIRP Annals // Manufacturing Technology, 2008, № 57. P. 601-620.
- 134.** С. А. Чижик Состояние и перспективы аддитивных технологий в республике Беларусь. Аддитивные технологии: материалы и конструкции. // Материалы научно-техн. конф. (Гродно, 5-6 октября 2016) Нац. Академ. Наук Беларуси [и др.]. Гродно: ГрГУ, 2016. 274 с.

- 135.** ISO / ASTM52900 – 15 Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en> (дата обращения 19.11.2017).
- 136.** George V. Franks, Carolina Tallon, André R. Studart, Mitchell L. Sesso and Silvia Leo Colloidal Processing: Enabling Complex Shaped Ceramics with Unique Multiscale Structures // Journal of the American Ceramic Society: EATURE ARTICLES Version of Record online: 28 JAN 2017. 33 p.
- 137.** Nahum Travitzky, Alexander Bonet, Benjamin Dermeik, Tobias Fey, Ina Filbert-Demut, Lorenz Schlier, Tobias Schlordt and Peter Greil Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials // ADVANCED ENGINEERING MATERIALS, 2014, 1-26.
- 138.** Zocca A., Colombo P. Gomes CM., Günster G. Additive manufacturing of ceramics: issues, potentialities, and opportunities. // J. Am. Ceram. Soc. 2015, № 98. P. 1983-2001.
- 139.** Qi Li and Jannifer A. Lewis Nanoparticle inks for Direct Assembly by Three-Demansion Periodic Structures // Adv. Mater. 2003, 15, No 19. P. 1639–43.
- 140.** Kunpeng Cai, Benito Romaín-Manso, Jim E. Smay, Ji Zhou, Mari´a Isabel Osendi, Manuel Belmonte, and Pilar Miranzo Geometrically Complex Silicon Carbide Structures Fabricated by Robocasting // J. Am. Ceram. Soc. 2012, P. 1-7.
- 141.** Кукушкин В. А. Аддитивные технологии в машиностроении // Аддитивные технологии, 2017, № 1. С. 20-23.
- 142.** Тананаев И. В. Состояние и перспективы развития физико-химического анализа // V Всесоюзное совещание по физико-химическому анализу. Тезисы докладов. М.: Наука, 1976. С. 3-4.
- 143.** ISO 10545-4:2014(en) [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10545:-4:ed-3:v1:en> (дата обращения 09.04.2014).

- 144.** ГОСТ 15167-93 Изделия санитарные керамические. Общие технические условия. М.: Межгосударственная техническая комиссия по стандартизации и техническому нормированию в строительстве, 1999. 10 с.
- 145.** Г. Г. Азгальдов Численная мера и проблема красоты в архитектуре. М.: Стройиздат, 1978. 92 с.
- 146.** Технологичность конструкции изделия: Справочник / Ю. Д. Амиров, Т. К. Алферова, П. Н. Волков и др.: Под общ. ред. Ю. Д. Амирова. 2-ое изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.
- 147.** Н. В. Баничук Введение в оптимизацию конструкций. М.: Наука, 1986. 304 с.
- 148.** Сагалаев Г. В., Абрамов В. В., Кулезнев В. Н., Власов С. В. и др. Справочник по технологии изделий из пластмасс. Химия, 2000. 424 с.
- 149.** Кондаков А. И. Выбор заготовок в машиностроении. М.: Машиностроение, 2007. 560 с. Цит. по Кокорин В. Н. Прессование деталей и заготовок с использованием механических смесей с различным фазовым состоянием. Ульяновск: УлГТУ, 2009. 51 с.
- 150.** С. С. Кипарисов, О. В. Падалко Оборудование предприятий порошковой металлургии. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1988. 448 с.
- 151.** А. П. Пантелеев, Ю. М. Шевцов, И. А. Горячев. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. М.: Машиностроение, 1986. 400 с.
- 152.** В. Н. Моргунов Основы конструирования отливок. Параметры точности и припуски на механическую обработку: Учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. Ун-та, 2004. 164 с.
- 153.** ГОСТ 8691-73 Изделия огнеупорные общего назначения. Форма и размеры. М.: Стандартиформ, 2005. 18 с.
- 154.** Огнеупорные материалы. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [www.ogneupor.ru](http://www.ogneupor.ru) (дата обращения 09.04.2010).

- 155.** Высокоогнеупорные изделия из чистых оксидов. Каталог / Под общей редакцией Д. С. Рутмана. М.: Центральное бюро технической информации, 1963. 56 с.
- 156.** ГОСТ Р 54575-2011 Посуда фарфоровая. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 8 с.
- 157.** ГОСТ 6787-2001 Плитки керамические для полов. Технические условия. М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 2002. 12 с.
- 158.** ГОСТ 13996-93 Плитки керамические фасадные и ковры из них. Технические условия. Минск: Межгосударственная техническая комиссия по стандартизации и техническому нормированию в строительстве, 1995. 14 с.
- 159.** ГОСТ 6141-91 Плитки керамические глазурованные для внутренней облицовки стен. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов 2002. 12 с.
- 160.** ГОСТ 30493-96 Изделия санитарные керамические. Типы и основные размеры. М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 2006. 13 с.
- 161.** Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник / Под общ. ред. К. М. Великанова. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1990. 448 с.
- 162.** М. А. Шерышев Производство изделий из полимерных листов и пленок. М.: Научные основы и технологии, 2011. 556 с.
- 163.** Кобзев Д. С. Влияние технологии формообразования на дизайн изделий сложной формы: автореферат дис. ... кандидата технических наук. М.: 2015. 22 с.
- 164.** Литье по выплавляемым моделям. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://metalurgu.ru/lite-v-razovyye-formyi/lite-po-vyiplavlyaemyim-modelyam.html> (дата обращения 3.08.2013).

- 165.** К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин Технология огнеупоров. М.: Metallurgy, 1978. 376 с.
- 166.** А. А. Шумилин Сушка огнеупоров. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1952. 489 с.
- 167.** Пикунов М. В., Балашова Н. П. О расчете показателей процесса затвердевания отливок различной конфигурации // Изв. вузов Чер. Metallurgy. 2006, № 1. С. 51-54.
- 168.** Ю. А. Гулоян Формование стекла и стеклоизделий в кн. Технология стекла. Справочные материалы. М.: ОАО Научно-исследовательский институт технического стекла ЗАО НПО «Стромизмеритель», ООО «Научно-производственное предприятие «А и СТ», 2012. 847 с.
- 169.** Литье по выплавляемым моделям / В. Н. Иванов и др. Под общ. ред.: Я. И. Шкленник, В. А. Озеров. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. 403 с.
- 170.** Баринов С. М., Шевенко В. Я. Прочность технической керамики. М.: Наука, 1996. 159 с.
- 171.** Кашеев И. Д., Стрелов К. К., Мамыкин П. С. Химическая технология огнеупоров: учебное пособие. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 752 с.
- 172.** В. Михеев, Г. Б. Строганов, А. Г. Ромашин Керамические и композиционные материалы в авиационной технике. М.: С. Альтекс, 2002. 276 с.
- 173.** А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев, С. С. Семенов керамика для машиностроения. М.: Издательство «Научтехлитиздат», 2003. 384 с.
- 174.** Н. Т. Андрианов, В. Л. Балкевич, А. В. Беляков и др. Химическая технология керамики: Учебное пособие для вузов / Под ред. проф. И. Я. Гузмана. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2012. 496 с.
- 175.** Breviary Technical Ceramics, Association Germany Ceramics Industry, Information Centre TECHNICAL CERAMICS, Printed by Fahner Verlag, Duck GmbH, Lauf 1 Edition, 2001. 197 p.

- 176.** Грибовский П. О. Горячее литье керамических изделий. М.: Госэнергоиздат, 1961. 400 с.
- 177.** Беляков А. В., Бакунов В. С. Стабильность качества изделий в технологии керамики // Стекло и керамика, 1998, № 2. С. 101-105.
- 178.** А. П. Зубехин, А. Г. Ткачев, О. Н. Ткачева Управление качеством керамики. // Стекло и керамика, 1999, № 2. С. 3-4.
- 179.** Лотов В. А., Алексеев Ю. И. Параметр для оценки спекания керамических материалов // Стекло и керамика, 1995, № 1-2. С. 27-30.
- 180.** Лотов В. А. Контроль процесса формирования структур в технологии керамических и силикатных материалов // Стекло и керамика, 1999, № 5. С. 21-25.
- 181.** Лотов В. А. Взаимосвязь водно-физических, структурно-механических и теплофизических свойств влажных дисперсных материалов // Стекло и керамика, 2000, № 5. С. 18-21.
- 182.** Лотов В. А. Фазовые характеристики в технологии материалов на основе силикатных дисперсных систем // Стекло и керамика, 2002, № 12. С. 14-18.
- 183.** Урьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 320 с.
- 184.** Осипов В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во Моск. ун-та., 1979. 235 с.
- 185.** Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. М.: Химия, 1988. 464 с.
- 186.** DE BOER. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.deboermachines.nl/nl/> (дата обращения 07.08.2015).
- 187.** В. П. Харламов, Ю. А. Гулюян, В. И. Лаптев Формование изделий из стекла. М.: Легкая индустрия, 1980. 176 с.
- 188.** Физико-химические основы производства оптического стекла / Под ред. Л. И. Демкиной. Л.: Химия, 1976. 456 с.
- 189.** Технологические свойства стекла: учебное пособие / Н. Ю. Михайленко. М. А. Семин. РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2014. 128 с.

- 190.** Dr. Othmar Latief Керамические массы для производства санфаянса – разработка реологически стабильных суспензий // CFI/Ber. DKG 2013 № 90 special Russia. P. 38-41.
- 191.** A BASIC GUIDE TO THE RHEOLOGY OF SANITARYWARE CASTING SLIPS Imerys sanitaryware 2010. 20 p.
- 192.** Carolina Tallon, Monika Limacher, George V. Franks Effect of particle size on the shaping of ceramics by slip casting // Journal of the European Ceramic Society 2010, № 30. P. 2819-2826.
- 193.** J. A. Lewis. Colloidal Processing of Ceramic. // J. Am. Ceram. Soc., 2000. 83 [10] C. 2341-59.
- 194.** Ji Xu, Yanan Qu, Xiaoqing Xi, and Jinlong Yang. Properties of Alumina Coagulated Bodies Prepared by Direct Coagulation Casting via High Valence Counter Ions (DCC-HVCI) // J. Am. Ceram. Soc. 2012. 95 [11]. P. 3415-3420.
- 195.** F. F. Lange. Powder Processing Science and Technology for Increased Reliability // J. Am. Ceram. Soc. 1989. 72 [1]. P. 3-15.
- 196.** X. Zhao, J. R. G. Evans, M. J. Edirisinghe, J. H. Song, Formulation of a ceramic ink for a wide-array drop-on-demand ink-jet printer // Ceram. Int. 2003. 29. 887-892.
- 197.** Andrea Zocca, Paolo Colombo, Cynthia M. Gomes Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities 2015 // J. Am. Ceram. Soc. 2015. 98 [7]. P. 1983-2001.
- 198.** Bhatti A. R., Mott M., Evans J. R. G., and Edirisinghe M. J., PZT Pillars for 1-3 Composites Prepared by Ink-jet Printing // J. Mater. Sci. Lett., 2001. 20. P. 1245-1248.
- 199.** Хасанов О. Л., Соколов В. М., Двилис Э. С., Похолков Ю. П. Ультразвуковая технология изготовления конструкционной и функциональной нанокерамики // Перспективные материалы, 2002, № 1. С. 76-83.
- 200.** Н. Н. Круглицкий Физико-химические основы регулирования свойств дисперсий глинистых минералов. Киев: Изд-во Наукова думка, 1968. 320 с.

- 201.** В. А. Алеко Электрический нагрев керамической массы во время формования // Стекло и керамика, 2003, № 8. С. 16-17.
- 202.** А. И. Нестеров Особенности полужесткого формования керамики. // Стекло и керамика, 2002, № 8. С. 12-13.
- 203.** Ralf Hillebrand Оптимизация шликеров добавками на примере керамической массы для санфаянса стандартного состава // CFI/Ver. DKG 2013. 90 Special Russia. P. 49-59.
- 204.** Попильский Р. Я., Пивинский Ю. Е. Прессование порошковых керамических материалов. М.: Metallurgiya, 1983. 176 с.
- 205.** Верниковский В. Е. Развитие теории прессования изделий из полусухих масс для строительства тепловых агрегатов: дис. ... доктора технических наук. СПб.: 1994. Цит. по Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.dissercat.com/content/razvitie-teorii-pressovaniya-izdelii-iz-polusukhikh-mass-dlya-stroitelstva-teplovykh-agregat#ixzz3wx5xE4I7> (дата обращения 19.07.2017).
- 206.** O. L. Khasanov, Jae-Shin Lee, Yu. P. Pokholkov, E. S. Dvilis, V. M. Sokolov, Byung-Gi An INFLUENCE OF THE SHAPE FACTOR ON EFFICIENCY OF THE GREEN COMPACT ULTRASONIC COMPACTING AND PROPERTIES OF SINTERED ZIRCONIA CERAMICS // Proc. Of the 4<sup>th</sup> Korea-Russia Int. Symp. On Science and Technology KORUS 2000. Part 3. Machine Parts and Materials Processing. University of Ulsan, Korea, IEEE. 2000. P. 231-234.
- 207.** В. Ю. Прокофьев Методологический подход к выбору оптимальных свойств формовочных масс для экструзии (обзор) // Стекло и керамика, 2011, № 1. С. 11-16.
- 208.** Ф. Я. Бородай, Ю. В. Липовцев, М. Ю. Русин, А. С. Хамицаев Исследование процесса водного литья сложнопрофильных керамических изделий // Новые огнеупоры, № 6, 2006. С. 25-32.
- 209.** Чижский А. Ф. Сушка керамических материалов и изделий. М.: Стройиздат, 1971. 177 с.

- 210.** Гинзбург Д. Б., Деликишкин С. Н., Ходоров Е. И., Чижский А. Ф. Печи и сушилка силикатной промышленности. М.: Государственное издательство литературы по строительству, 1963. 340 с.
- 211.** Э. Стужина Китайское ремесло в XVI-XVIII веках. М.: Изд-во Наука, Главная редакция восточной литературы, 1979. 264 с.
- 212.** Никулин Н. В., Кортнев В. В. Производство электрокерамических изделий Учебник для подготовки рабочих на производстве. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1976. 255 с.
- 213.** Кунавин М. М. Методика расчета режима обжига термически массивных изделий из керамики // Стекло и керамика, 1996, № 9. С. 16-19.
- 214.** А. Э. Энглунд Рациональный расход сырьевых материалов в фарфорофаянсовой промышленности. М.: Легпромбытиздат, 1986. 56 с.
- 215.** ГОСТ 28833-2016 Дефекты огнеупорных изделий. Термины и определения М.: Стандартинформ, 2016. 15 с.
- 216.** СТ СЭВ 3979-83 ПЛИТКИ КЕРАМИЧЕСКИЕ Термины и определения, 1984. 5 с.
- 217.** ГОСТ Р 54868-2011 Посуда керамическая термины и определения М.: Стандартинформ, 2012. 12 с.
- 218.** Посуда хозяйственная из низкотемпературного фарфора (полуфарфора) Технические условия ГОСТ Р 54396-2011. М.: Стандартинформ, 2012. 8 с.
- 219.** ГОСТ 286-82 Трубы керамические канализационные. Технические условия. М.: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1982. 12 с.
- 220.** А. Н. Егоров, Г. К. Терещенко, Г. П. Филинцев Виды брака в фарфорофаянсовом производстве / Под ред. Инж. Н. Ф. Полещука. М.-Л.: Народный комиссариат местной промышленности РСФСР, 1938. 239 с.
- 221.** А. П. Пыжова, В. В. Коробкина, В. С. Косов Дефекты тонкокерамических изделий: причины возникновения и способы устранения. М.: Легпромбытиздат, 1993. 174 с.
- 222.** М. И. Тимохова Некоторые виды брака при статическом прессовании технической керамики // Стекло и керамика, 2003, № 12. С. 21-25.

- 223.** Процесс производства керамической плитки: применяемые технологии и новые разработки / Курс обучения для специалистов керамической промышленности. Москва-Россия: Институт Внешней Торговли Италии, АСИМАС, 26-29 января 2004 г. 306 с.
- 224.** О. Б. Гольцева, В. С. Клековкин, О. Б. Наговицин, Н. Л. Дмитриев Причинно-следственные связи брака при обжиге кирпича в туннельных печах // Стекло и керамика, 2005, № 3. С. 26-28.
- 225.** Т. В. Неклюдова, Н. С. Русович Особенности дефекта «литьевое пятно» // Стекло и керамика, 2010, № 12. С. 20-21.
- 226.** Булавин И. А., Августиник А. И., Жуков А. С. Технология фарфорового и фаянсового производства. М.: «Легкая индустрия», 1975. 448 с.
- 227.** ГОСТ ISO 9000-2011 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-iso-9000-2011> (дата обращения 09.04.2010).
- 228.** Бакунов В. С., Беляков А. В. Перспективы повышения воспроизводимости структуры и свойств керамики // Огнеупоры и техническая керамика, 1998, № 2. С. 16-21.
- 229.** Беляков А. В. Синергетический и квазихимический подходы в технологии керамики (обзор) // Стекло и керамика, 2003, № 9. С. 21-27.
- 230.** Хакен Г. Синергетика / Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 400 с.
- 231.** Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин и др. / М.: Наука, 1994. 383 с.
- 232.** Беляков А. В., Захаров А. И., Целыковская Т. В. Дефект глазури типа «сборка» с позиции синергетики // Стекло и керамика, 1998, № 11. С. 23-25.
- 233.** П. П. Будников, А. М. Гинстлинг Реакции в смесях твердых веществ. Издание 3-е исправленное и дополненное. М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. 488 с.
- 234.** Стрелов К. К. Структура и свойства огнеупоров. М.: Metallurgia, 1972. 280 с. А. М. Салахов, Р. А. Салахова Керамика: Исследование.

- 235.** Кингери У. Д. Введение в керамику / Пер. с англ. М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1967. 500 с.
- 236.** Бакунов В. С., Беляков А. В. К вопросу об анализе структуры в керамике // Неорганические материалы, 1996, Т. 32, № 2. С. 243-248.
- 237.** Оксидная керамика. Спекание и ползучесть: учебное пособие / Бакунов В. С., Беляков А. В., Лукин Е. С., Шаяхметов У. Ш. / Под ред. В. С. Бакунова. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2007. 584 с.
- 238.** В. С. Бакунов, Е. С. Лукин, У. Ш. Шаяхметов Высокотемпературная деформация керамики и огнеупоров / Под ред. В. С. Бакунова. Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. 252 с.
- 239.** Frank and Janet Hamer The Potter's Dictionary of materials and techniques. Fifth edition A&C Black. London University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 2004. 437 p.
- 240.** З. А. Носова Чувствительность глин к сушке. М.: Бюро технической информации, 1946. 49 с.
- 241.** Ходаков Г. С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 307 с.
- 242.** Беляков А. В. Явления массообмена в открытых системах в технологии керамики. Формование, спекание, ползучесть, трещиностойкость // Техника и технология силикатов, 2008, № 4. С. 7-15.
- 243.** R. J. Henderson, H. W Chandler, A. R Akisanya, H Barber, B Moriarty Finite element modelling of cold isostatic pressing // Journal of the European Ceramic Society, 2000, Vol. 20, Is. 8. P. 1121-1128.
- 244.** S. C. Lee, K. T. Kim A densification model for powder materials under cold isostatic pressing – Effect of adhesion and friction of rubber molds // Materials Science and Engineering, 2008, Vol. 498, Is. 1-2. P. 359-368.
- 245.** ГОСТ Р 54395-2011 Посуда фаянсовая. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 9 с.
- 246.** Й. Алленштейн и др. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справочник / Под ред. Г. Роучка, Х. Вунату / Пер. с нем. М.: Интермет Инжиниринг, 2010. 392 с.

- 247.** А. И. Миклашевский Технология художественной керамики (практическое руководство в учебных мастерских) Изд-во литературы по строительству Л.: 1971. 302 с.
- 248.** ГОСТ Р 52918-2008 Огнеупоры. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2008. 26 с.
- 249.** ГОСТ Р ИСО 528-2009 Огнеупоры. Определение эквивалентного пирометрического конуса (огнеупорности). М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
- 250.** Н. В. Соломин Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций. М.: Машиностроение, 1980. 128 с.
- 251.** У. Л. Брэгг, Г. Ф. Кларингбулл Кристаллическая структура минералов. Москва: Издательство «МИР», 1967. 390 с.
- 252.** М. Х. Карапетьянц, С. И. Дракин Строение вещества. Учебное пособие для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: «Высшая школа», 1978. 304 с.
- 253.** И. И. Шафрановский Лекции по кристалломорфологии. Изд-во Высшая школа, 1968. 174 с.
- 254.** Шафрановский И. И. Симметрия в природе. Л.: «Недра», 1985. 168 с.
- 255.** В. С. Урусов Симметрия-диссимметрия в эволюции Мира: От рождения Вселенной до развития жизни на Земле. М.: Книжный дом «ЛИБЕРКОМ», 2012. 266 с.
- 256.** Н. С. Кравченко Принцип Кюри как регулирующий механизм эволюции в бифуркационных процессах (на примере геологических систем) // Философия науки, 1998, № 4. С. 5.
- 257.** Д. Ю. Пушаровский Структурная минералогия силикатов // Соровский образовательный журнал, 1998, № 3, С. 83-91.
- 258.** Барыбин А. А. Физико-технологические основы макро-, микро- и нано-электроники / Барыбин А. А., Томилин В. И., Шаповалов В. И. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2011. 784 с.
- 259.** Знамцев Ю. М. Принцип П. Кюри как средство анализа управляемых динамических систем // Докл. 2-й Рос. конф. «Вектор. энерг. в техн., биол. и соц. Системах», Балаково, 18-22 окт. 1999 г. Т. 1. С. 9-11.

- 260.** Кузьминов Ю. С. Принцип симметрии Кюри и рост монокристаллов // Кристаллография, 2007, Т. 52, № 5. С. 937-944.
- 261.** Володин П. А., Мишнев С. В., Талашкевич И. П. Относительность прочности и пластичности // Естеств. и техн. Науки, 2010, № 4. С. 244-247.
- 262.** Л. М. Артюшин, Л. Г. Горбич Принцип Кюри и ограниченная диффузией агрегация // Письма в ЖТФ, 2003, т. 29, вып. 13. С. 36-42.
- 263.** Гасанов К. А., Вишталов Р. И. Исследование температурного режима остывания бетона конструкций из разогретой смеси. // Компьютерные технологии в строительстве: Всерос. научно-техн. конф., Махачкала, 2012. С. 59-60.
- 264.** Бойко В. Ф., Николенко С. В., Климова Л. А., Власова С. М., Комарова Г. П. Принцип суперпозиции плотностей распределения порошковых материалов // Огнеупоры и техн. керамика, 2005, № 7. С. 39-43.
- 265.** Бойко В. Ф., Николенко С. В. Использование суперпозиции плотностей распределений в задачах приготовления шихты // Материаловедение, 2006, № 12. С. 14-17.
- 266.** В. И. Соломатов, Л. О. Шейнич Оптимизация технологии бетона на плотных заполнителях с использованием законов симметрии // Строительство, Сер. Известия вузов, 1991, № 10. С. 61-64.
- 267.** В. И. Соломатов, Л. О. Шейнич, Г. В. Румына Оптимизация интенсивной раздельной технологии бетона с использованием законов симметрии // Строительство, Сер. Известия вузов, 1992, № 7-8. С. 57-60.
- 268.** Шейніч Л. О. Использование принципов симметрии в технологии строительных материалов. Використання принципів симетрії в технології будівельних матеріалів. // Хім. пром-сть України, 1996, № 6. С. 31-33.
- 269.** Шейнич Леонид Александрович Структура и технология строительных композитов с пониженной анизотропией свойств: автореферат дис. ... доктора технических наук. Одесса. 1994. 31 с.
- 270.** Я. В. Лазарева, В. Д. Котляр, К. А. Лапунова, Г. Н. Ерёменко Основные направления развития дизайна и технологии производства керамической черепицы // Дизайн. Материалы. Технология, 2016, № 3 (45). С. 78-81.

- 271.** Ханс-Юрген Стерли, Хорст Беттгер, Хейно Вальтер Все о кровле из керамической черепицы / Пер. с нем. Алексей Степкин. М.: Издательский дом «Бизнес Медиа», 2007. 400 с.
- 272.** Antike Gefäße Eine Auswahl bearbeitet von Konstantinos Yfantidis Kataloge der Staatlichen Kunstsammlungen Kassel Nr. 16, Druckerei und Verlag Gutenberg , Melsungen, 1990. 307 p.
- 273.** Александр Поверин Гончарное дело. Чернолощенная керамика. М.: Культура и традиции, 2002. 93 с.
- 274.** Керамика Раку: космос в чайной чашке. Выставка из японских собраний Каталог. СПб: Изд-во Государственного Эрмитажа, 2015. 328 с.
- 275.** Э. В. Сайко Техника и технология керамического производства Средней Азии в историческом развитии. М.: Изд-во Наука, 1982. 210 с.
- 276.** Официальный интернет-магазин Дулевского фарфяорового завода. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://dulevo.ru/> (дата обращения 10.01.2018).
- 277.** ГОСТ 28874-2004 Огнеупоры. Классификация. М.: Стандартинформ, 2005. 16 с.
- 278.** Карклит А. К., Пориньш Н. М., Каторгин Г. М. и др. Огнеупорные изделия, материалы и сырье: Справ. изд. / Изд. 4-е., перераб. и доп. М.: Metallургия, 1990. 416 с.
- 279.** Смесительная система. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.eirich.ru/ru/advantages-of-the-mixing-system> (дата обращения 09.10.2017).
- 280.** Ф. Я. Бородай, В. В. Платонов, М. А. Волков Особенности формования конусообразных керамических изделий из водных шликеров // Новые огнеупоры, 2010, № 12. С. 27-32.
- 281.** Пивинский Ю. Е. Керамические и огнеупорные материалы. Избранные труды. Том. 2 / Ю. Е. Пивинский. СПб: Стройиздат СПб, 2003. 688 с.
- 282.** Fred F. Lunge Powder Processing Science and Technology for Increased Reliability // J. Am. Ceram. Soc., 1989. 72 [I]. P. 3-15.

- 283.** Carolina TALLON and George V. FRANKS Recent trends in shape forming from colloidal processing: A review // J. Ceram. SOC Jap., 2011 No. 119 [3] P. 147-160.
- 284.** Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ. / Под ред. Н. В. Баничука. М.: «Мир», 1984. 428 с.
- 285.** Omori M. Basic Research and Industrial Production Using the Spark Plasma System (SPS) / M. Omori // Mater. Sci. Eng. 2000. P. 183-188.
- 286.** Andrey Yurkov Refractories for Aluminium. Electrolysis and Cast House Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London 2015. 254 p.
- 287.** Zschimmer&Schwarz, DOLAPIX PC-67. Россия, 2016. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.zschimmer-schwarz.com> (дата обращения: 13.05.2017).
- 288.** Власов А. С. Лабораторный практикум по микроскопическим и рентгеновским методам исследования керамики / А. С. Власов, В. Н. Дрогин, Т. В. Ефимовская. М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1980. С. 64.
- 289.** ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша» // Отдел нанотехнологий. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.nanoker.ru> (дата обращения 30.05.2013).
- 290.** Л. М. Ковба и В. К. Трунов Рентгенофазовый анализ. Изд-во Московского унив., 1969. 159 с.
- 291.** А. С. Власов, Н. А. Макаров Лабораторный практикум по микроскопическим и рентгеновским исследованиям керамики. Учебное пособие. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2004. 80 с.
- 292.** Власов А. И. Электронная микроскопия: учеб. пособие / А. И. Власов, К. А. Елсуков, И. А. Косолапов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 168 с.
- 293.** Н. Т. Андрианов, А. В. Беляков, А. С. Власов и др. Практикум по технологии керамики. Учебное пособие для вузов / Под ред. проф. Гузмана И. Я. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2005. 336 с.

- 294.** Дилатометрия (ДИЛ) [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/ru/produkty-reshenija/dilatometrija/dil-402-expedis-classic/> (дата обращения 15.04.2017).
- 295.** Ротационный вискозиметр Rheotest RV2.1, 2001. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://granat-e.ru/rheotest\\_rv21.html](http://granat-e.ru/rheotest_rv21.html) (дата обращения: 13.05.2017).
- 296.** Т. Б. Шаталова, О. А. Шляхтин, Е. Веряева Методы термического анализа М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. 72 с.
- 297.** V. Beltran, A. Escardino, C. Feliu Liquid suction by porous ceramic materials // British Ceramic Transactions, 1988, № 87. P. 64-69.
- 298.** Неклюдова Т. Л., Масленникова Г. Н. Особенности структуры фарфоровых изделий, изготовленных методом шликерного литья // Стекло и керамика, 2011, № 2. С. 16-19.
- 299.** И. Д. Кашеев, И. А. Павлова зависимость свойств кислотоупорных изделий от способа формования // Стекло и керамика, 2006, № 13. С. 17-19.
- 300.** Лучининова Н. И., Христофоров К. К., Омельченко Ю. А. и др. Исследование текстуры заготовок термографическими методами // Стекло и керамика, 1979, № 12. С. 16-18.
- 301.** Степаненко А. В., Богинский Л. С., Гируцкий И. И., Павловская Л. Ф. Определение плотности пористых материалов гамма-просвечиванием // Порошковая металлургия, 1984, № 7. С. 42-46.
- 302.** Ковзиридзе З. Д. Применение ультразвука для изучения свойств керамики // Стекло и керамика, 1983. № 12. С. 20-21.
- 303.** Ю. Н. Крючков Контроль однородности гетерогенных материалов (Обзор) // Стекло и керамика, 2000, № 1. С. 15-17.
- 304.** О. Н. Каныгина, А. Г. Четверикова Формирование фазового состава и пористости кремнеземистой керамики в процессе термической обработки // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета КРСУ, 2003, № 2. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.krsu.edu.kg/vestnik/2003/v2/index.html> (дата обращения 09.09.2010).

- 305.** Бендовский Е. Б., Мосин Ю. М. Влияние метода формования на прочностные свойства керамики // *Стекло и керамика*, 1992, № 11-12. С. 27-29.
- 306.** Крючков Ю. Н. Расчет нестационарного поля давления в отливке при шликерном литье керамических изделий // *Стекло и керамика*, 1990, № 1. С. 25-26.
- 307.** Беляков А. В., Брыгина Е. А. Локальные уплотнения при спекании керамики и воспроизводимость структуры // *Стекло и керамика*, 1998, № 10. С. 10-13.
- 308.** Манита А. Д. Теория вероятностей и математическая статистика: Уч. пособие. М.: Издат. Отдел УНЦ ДО, 2001. 120 с.
- 309.** Стрелов К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1985. 480 с.
- 310.** Балынин М. Ю., Кипарисов С. С. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1978. 183 с.
- 311.** ГОСТ 18442-80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. 56 с.
- 312.** Сопов В. П., Ушеров-Маршак А. В. Количественная оценка параметров поровой структуры капиллярно-пористых материалов на примере цементного камня // *Коллоидный журнал*, 1994, Т. 56, № 4. С. 600-603.
- 313.** Бутт Ю. М., Тимашев В. В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1973. 504 с.
- 314.** Лурье М. Ю. Сушильное дело. М.: Госэнергоиздат, 1948. 348 с.
- 315.** Лыков А. В. Теория сушки. М.: «Энергия», 1968. 472 с.
- 316.** Августинник А. И., Буренин Р. И. Определение режимных параметров радиационно-конвективной сушки // *Стекло и керамика*, 1971, № 2. С. 26-29.
- 317.** И. М. Пиевский, В. В. Гречина, Г. Д. Назаренко, А. И. Степанова Сушка керамических стройматериалов пластического формования. Киев: «Наукова думка», 1985. 144 с.
- 318.** Техническая керамика. В. Я. Шевченко, С. М. Баринов. М.: Наука, 1993. 187 с.

- 319.** СВЧ-энергетика: в 2-х т. / ред. Э. Окресс, ред. Э. Д. Шлифер, пер. В. Г. Алыбин, пер. Э. Я. Пастрон. М.: Мир, 1971. 272 с. 2 т.
- 320.** Microstructural uniformity and homogeneity in alumina sintered by microwave (hybrid) heating at 2.45 GHz De, Arindam; Ahmad, Iftikhar; Whitney, E. Dow; Clark, David E. Dep. Materials Sci., Eng., Univ. Florida, Gainesville, FL, 32611, USA Transactions of the Indian Ceramic Society (1995), 54(4), 156-161.
- 321.** Д. Л. Рахманкулов, И. Х. Бикбулатов, Н. С. Шулаев, С. Ю. Шавшукова Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов. М.: Химия, 2003. 220 с.,
- 322.** Яфаров Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2009. 216 с.
- 323.** Туманов Ю. Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах. М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2010. 968 с.
- 324.** Н. П. Глуханов, И. Г. Федорова Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд., 1983. 160 с.
- 325.** Brosnan D. A. Introduction to drying of ceramics with laboratory exercises / D. A. Brosnan, G. C Robinson. The American Ceramic Society, 2003. 278 p.
- 326.** Microwave Hybrid Drying. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.ceramicindustry.com> (дата обращения 14.07.17).
- 327.** О. Тихи Обжиг керамики / Пер. с чеш. В. П. Поддубного / Под ред. Л. В. Соколовой. М.: Стройиздат, 1988. 344 с.
- 328.** Я. Е. Гегузин Физика спекания. М.: Изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1967. 360 с.
- 329.** Н. Т. Андрианов, Е. С. Лукин Термическое старение керамики. М.: Металлургия, 1979. 100 с.
- 330.** Масса керамическая ПФЛ-1. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <https://ceramgzhel.ru/katalog/keramicheskie-massyi-poroshkovyie-keramicheski/753.html> (дата обращения 09.04.2010).

- 331.** Methods of analysis and production controls, WELKO s.r.l., INDEX CHAPTER XIII Main defects noticeable in the different production phases. 1986. XIII-01-46 p.
- 332.** Огородникова О. М. Введение в компьютерный конструкционный анализ: методические указания по курсу «Компьютерная диагностика». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 47 с.
- 333.** Ansys. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://seniga.ru/index.php/sapr/tsapr/81-ansys> (дата обращения 19.08.2013).
- 334.** Abaqus. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://tesis.com.ru/software/abaqus> (дата обращения 09.01.2013).
- 335.** Coube O. Numerical simulation of metal powder die compaction with special consideration of cracking / O. Coube, H. Riedel // Powder Metallurgy, 2000, Vol. 43, № 2. P. 123-131.
- 336.** Bordia R. K. On constrained sintering-II, comparison of constitutive models / R. K. Bordia, G. W. Scherer // Acta Metall, 1988, Vol. 36, № 9. P. 2399-2409.
- 337.** Pan J. Finite element calculation of sintering deformation using limited experimental data / J. Pan, R. Huang // Materials Science Forum, 2009, Vol. 606. P. 103-118.
- 338.** Федотов А. Ф. Моделирование процесса прессования порошковых материалов в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А. Ф. Федотов, А. П. Амосов, В. П. Радченко. М.: Машиностроение, 2005. 282 с.
- 339.** Gaillard J. M. Prediction of tableware deformations using a finite elements analysis and the measurements of physical parameters in process conditions / J. M. Gaillard, C. Gault, J. C. Glandus [et al.] // Ceram. Today – Tomorrow's Ceram, 1991, № 66A. P. 333-341.
- 340.** Kraft T. Numerical simulation of die compaction and sintering / T. Kraft, H. Riedel // Powder Metallurgy, 2002, Vol. 45, № 3. P. 227-231.
- 341.** Kraft T. Compaction and sintering of a ceramic seal: modeling and experimental response / T. Kraft, H. Riedel, O. Rosenfelder // Int. J. Powder Metall, 2003, Vol. 39, № 6. P. 27-34.

- 342.** Kraft T. Simulation des Brennprozesses bei der Herstellung von Gebrauchskeramiken / T. Kraft, H. Riedel, F. Raether, F. Becker // *Keramische Zeitschrift*. 2002. Bd. 54. S. 374-381.
- 343.** Kraft T. Numerical simulation of solid state sintering – model and application / T. Kraft, H. Riedel // *J. Europ. Ceram. Soc.* 2004, № 24. P. 345-361.
- 344.** Reiterer M. Finite element simulation of cold isostatic pressing and sintering of SiC components / M. Reiterer, T. Kraft, U. Janosovits, H. Riedel // *Ceramics International*, 2004, № 30. P. 177-183.
- 345.** Kingery W. D. Densification during sintering in the presence of a liquid phase. I. Theory / W. D. Kingery // *J. Appl. Phys.* 1959, № 30. P. 301-306.
- 346.** Скороход В. В. Реологические основы теории спекания / В. В. Скороход. Киев: Наукова думка, 1972. 151 с.
- 347.** Olevsky E. A. Theory of sintering: from discrete to continuum / E. A. Olevsky // *Mater. Sci. Eng.* 1998, Vol. R23. P. 41-100.
- 348.** Olevsky E. A. Multi-scale study of sintering: a review / E. A. Olevsky, V. Tikare, T. Garino // *J. Am. Ceram. Soc.* 2006, Vol. 89, № 6. P. 1914-1922.
- 349.** Olevsky E. A. Effect of gravity on dimensional change during sintering, II. Shape distortion / E. A. Olevsky, R. M. German, A. Upadhyaya // *Acta Mater.* 2000, № 48. P. 1167-1180.
- 350.** Kwon Y. S. High temperature densification forming of alumina powders – constitutive model and experiments / Y. S. Kwon, K. T. Kim // *Trans. ASME J. Eng. Mater. Tech.* 1996. Vol. 118. P. 448-455.
- 351.** McHugh P. E. A liquid phase sintering model: application to  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and WC-Co / P. E. McHugh, H. Riedel // *Acta Mater.* 1997, № 45. P. 2995-3003.
- 352.** Ganesan R. Finite element modeling of distortion during liquid phase sintering / R. Ganesan, A. Griffio, R. M. German // *Metall. Mater. Trans.* – 1998, № 29. P. 659-664.
- 353.** Gasik M. A constitutive model and FE simulation for the sintering process of powder compacts / M. Gasik, B. Zhang // *Comp. Mater. Sci.* 2000, № 18. P. 93-101.

- 354.** Markondeya R. P. Anisotropic shrinkage during sintering of particle-oriented systems – numerical simulation and experimental studies / R. P. Markondeya, A. Odulena, W. R. Cannon // *Acta Mater.* 2002, № 50. P. 2559-2570.
- 355.** Kwon Y. S. Simulation of the sintering densification and shrinkage behavior of powder Injection molded 17-4PH stainless steel / Y. S. Kwon, Y. Wu, P. Suri, [et al.] // *Met. Mat. Trans. A.* 2004, Vol. 35A. P. 257-263.
- 356.** Zavaliangos A. Constitutive models for the simulation of P/M processes / A. Zavaliangos // *Int. J. Powder Metall.* 2002, № 38. P. 27-39.
- 357.** Matsubara H. Computer simulation studies on sintering and grain growth / H. Matsubara // *J. Ceram. Soc. Japan.* 2005, Vol. 113, № 4. P. 263-268.
- 358.** Mohanram A. Measurement of viscosity of densifying glass-based systems by isothermal cyclic loading dilatometry / A. Mohanram, G. L. Messing, D. J. Green // *J. Am. Ceram. Soc.* 2004, Vol. 87, № 2. P. 192-196.
- 359.** Mohanram A. A novel use of constrained sintering to determine the viscous Poisson's ratio of densifying materials / A. Mohanram, S.-H. Lee, G. L. Messing [et al.] // *Acta Materialia.* 2005, № 53. P. 2413-2418.
- 360.** Blaine D. C. Critical use of video-imaging to rationalize computer sintering simulation models / D. C. Blaine, R. Bollina, S.-J. Park [et al.] // *Computers in Industry.* 2005. Vol. 56, № 8. P. 867-875.
- 361.** Келер Э. Определение упругих и остаточных деформаций керамических материалов на сдвиг / Э. Келер. Л.: Печатня, 1939. 48 с.,
- 362.** Finnie I. Method for predicting creep in tension and compression from bending tests / I. Finnie // *J. Am. Ceram. Soc.* 1966, Vol. 49, № 4. P. 218-220.
- 363.** Hollenberg G. W. Calculation of stresses and strains in four-point bending creep tests / G. W. Hollenberg, G. R. Terwilliger, R. S. Gordon // *J. Am. Ceram. Soc.* 1971, Vol. 54, № 4. P. 196-199.
- 364.** Кайнарский И. С. Корундовые огнеупоры и керамика / И. С. Кайнарский, Э. В. Дегтярева, И. Г. Орлова. М.: Metallurgy, 1981. 168 с.
- 365.** Venkatachari K. R. Shear deformation and densification of powder compacts / K. R. Venkatachari, R. Raj // *J. Am. Ceram. Soc.* 1986, Vol. 69, № 6. P. 499-506.

- 366.** Jakus K. Creep deformation of ceramics in four-point bending / K. Jakus, S. M. Wiederhorn // *J. Am. Ceram. Soc.* 1988, Vol. 71, № 10. P. 832-836.
- 367.** Cai P. Z. Determination of the mechanical response of sintering compacts by cyclic loading dilatometry / P. Z. Cai, G. L. Messing, D. J. Green // *J. Am. Ceram. Soc.* 1997, Vol. 80, № 2. P. 445-452.
- 368.** Zuo R. Viscous Poisson's coefficient determined by discontinuous hot forging / R. Zuo, E. Aulbach, J. Roedel // *J. Mater. Res.* 2003, Vol. 18, № 9. P. 2170-2176.
- 369.** Zuo R. Experimental determination of sintering stresses and sintering viscosities / R. Zuo, E. Aulbach, J. Rödel // *Acta Mater.* 2003, № 51. P. 4563-4574.
- 370.** Lee S. H. Bending creep test to measure the viscosity of porous materials during sintering / S. H. Lee, G. L. Messing, D. J. Green // *J. Am. Ceram. Soc.* 2003, Vol. 86, № 6. P. 877-882.
- 371.** Mohanram A. Densification and sintering viscosity of low-temperature co-fired ceramics / A. Mohanram, G. L. Messing, D. J. Green // *J. Am. Ceram. Soc.* 2005, Vol. 88, № 10. P. 2681-2689.
- 372.** Ollagnier J.-B. Viscosity of LTCC determined by discontinuous sinter-forging / J.-B. Ollagnier, O. Guillon, J. Rödel // *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2006, Vol. 3, № 6. P. 437-441.
- 373.** Шаяхметов У. Ш. Измерение высокотемпературной деформации и ползучести безобжиговых огнеупоров / У. Ш. Шаяхметов, В. С. Бакунов, И. М. Валеев // *Новые огнеупоры*, 2006, № 4. С. 121-125.
- 374.** Hague D. C. Sinter-forging of nanocrystalline zirconia: I, experimental / D. C. Hague, M. J. Mayo // *J. Am. Ceram. Soc.* 1997, Vol. 80, № 1. P. 149-156.
- 375.** А. А. Ильюшин, В. С. Ленский Соппротивление материалов. М.: Физматлит, 1959. 374 с.
- 376.** Bollina R. In situ evaluation of viscosity during sintering of boron doped stainless steel using bending beam technique. Proceedings sintering 2004 / R. Bollina, R. M. German (eds). – Pennsylvania: Pennsylvania State University, 2003. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [www.cavs.msstate.edu/publications/2004-29.pdf](http://www.cavs.msstate.edu/publications/2004-29.pdf) (дата обращения 09.04.2010).

- 377.** Sura V. M. Viscosity of porous glasses / V. M. Sura, P. C. Panda // J. Am. Ceram. Soc. 1990, Vol. 73, № 9. P. 2697-2701.
- 378.** Rahaman M. N. Creep and densification during sintering of glass powder compacts / M. N. Rahaman, L. C. De Jonghe, G. W. Scherer // J. Am. Ceram. Soc. 1987. Vol. 70, № 10. P. 766-74.
- 379.** Rahaman M. N. Sintering of spherical glass powder under a uniaxial stress / M. N. Rahaman, L. C. De Jonghe // J. Am. Ceram. Soc. 1990, Vol. 73. № 3. P. 707-712.
- 380.** Ducamp V. C. Shear and densification of glass powder compacts / V. C. Ducamp, R. Raj // J. Am. Ceram. Soc. 1989, Vol. 72, № 5. P. 798-804.
- 381.** Johnson D. L. Finding and utilizing the master sintering curve. Sintering 2003 / D. L. Johnson. 2003. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.mri.psu.edu/conferences/sint03/#p1> (дата обращения 09.04.2010).
- 382.** Park S. J. Master sintering curve for densification derived from a constitutive equation with consideration of grain growth: application to tungsten heavy alloys / S. J. Park, S. H. Chung, J. M. Martin [et al.] // Metall. Mater. Trans. A. 2008, Vol. 39A. P. 2941-2948.
- 383.** Кунавин М. М. Рациональный обжиг термически массивных изделий из керамики: автореферат дисс. ... кандидата технических наук. М.: 2002. 19 с.
- 384.** Reduction of the firing time of large ceramic units // Fraunhofer ISC annual report, 2006. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: [http://www-gb.isc.fraunhofer.de/english/improfil/presse/publikationen/jb\\_2006/media/66-69\\_2006.pdf](http://www-gb.isc.fraunhofer.de/english/improfil/presse/publikationen/jb_2006/media/66-69_2006.pdf) (дата обращения 09.04.2010).
- 385.** Gillia O. Viscosity of WC-Co compacts during sintering / O. Gillia, C. Josserrond, D. Bouvard // Acta Mater. 2001, № 49. P. 1413-1420.
- 386.** Орданьян С. С. Особенности взаимодействия компонентов фарфоровой массы с полевошпатовым расплавом / С. С. Орданьян, О. С. Герасимова, Н. А. Андреева // Огнеупоры и техническая керамика, 2004, № 2. С. 2-7.

- 387.** Olhero S. M. Feedstock formulations for direct consolidation of porcelains with polysaccharides / S. M. Olhero, G. Tari, J. M. F. Ferreira // *J. Amer. Ceram. Soc.* 2001, Vol. 84, № 4. P. 719.
- 388.** Miura M. Evaluation of softening deformation behavior in porcelain bodies during firing / M. Miura, T. Shimadzu, H. Shin [et al.] // *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 1999, Vol. 20, № 2. P. 99-111.
- 389.** Porte F. Creep viscosity of vitreous china / F. Porte, R. Brydson, B. Rand [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* 2004, Vol. 87, № 5. P. 923-928.
- 390.** П. П. Будников, А. А. Варужанян, М. П. Воларович и др. Исследование влияния среды водяных паров на изменение вязкости глин при нагревании // *ЖПХ*, 1966, № 39. С. 2111-2114.
- 391.** Štubòà I. Anisotropic mechanical properties of textured quartz porcelain / I. Štubòà, A. Lintnerová, L. Vozár // *Ceramics-Silikáty*, 2008, Vol. 52, № 2. P. 90-94.
- 392.** Boch P. Development of bodies and techniques enabling a decrease of the deformations occurring in porcelain bodies during shaping and firing / P. Boch, J. Boisson, D. Vandermarcq // *Bull. Soc. Fr. Ceram.* 1978, № 121. P. 3-16.
- 393.** Якушка В.-П. П. Особенности ползучести керамики и огнеупоров при разных видах нагружения: автореферат дис. ... кандидата технических наук. Каунас, 1983. 16 с.
- 394.** Ильюшин А. А. Пластичность. Часть первая. Упругопластические деформации / А. А. Ильюшин. М.: ОГИЗ, 1948. 378 с.
- 395.** А. С. Беркман Пористая проницаемая керамика. Государственное издательство литературы по строительству архитектуре и строительным материалам. М.: 1959. 172 с.
- 396.** Ю. Л. Красулин, А. Н. Асонов, С. М. Баринов и др. Пористая конструкционная керамика. М.: Металлургия, 1980. 99 с.
- 397.** Nanoporous materials. Advanced Techniques for Characterization, Modeling and Processing. Edited by Nick Kanellopoulos. 2011 by Taylor and Francis Group, LLC. 562 p.

- 398.** Эргономика в упаковке. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://eqinfo.ru/blog/details?newsId=24> (дата обращения 04.08.2015).
- 399.** Левашов Е. А., Рогачев А. С., Юхвид В. И., Боровинская И. П. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Издательство БИНОМ, 1999. 176 с.
- 400.** Полицелл ПЦ. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://polycell.ru/product/11-reagenty-dlya-stroitelstva/23-politsell-pts.html> (дата обращения 09.04.2010).
- 401.** Раскатчик (раскаточный стол) КГ-1. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://ceramgzhel.ru/katalog/oborudovanie/raskatchiki-glinyi/1656.html> (дата обращения 09.04.2010).

**Приложения**

**П. 1   Документы, подтверждающие использование результатов  
диссертационной работы**