



*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**Москва – 2019**

Работа выполнена в Институте высокотемпературных материалов и технологий Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева и в Научно-исследовательском институте «Центр экологической промышленной политики»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Гусева Татьяна Валериановна,  
заместитель директора Научно-исследовательского  
института «Центр экологической промышленной  
политики», г. Москва

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Котляр Владимир Дмитриевич,  
заведующий кафедрой «Строительные материалы»  
Донского государственного технического университета,  
г. Ростов-на-Дону

доктор технических наук, профессор  
Шаяхметов Ульфат Шайхизаманович,  
заведующий кафедрой инженерной физики и физики  
материалов Башкирского государственного  
университета, г. Уфа

доктор технических наук, доцент  
Ившин Константин Сергеевич,  
заведующий кафедрой дизайна Удмурдского  
государственного университета, г. Ижевск

Ведущая организация: Ивановский государственный химико-технологический  
университет, г. Иваново

Защита состоится 28 августа 2019 г. в 12 часов в Конференц-зале на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.204.12, созданного на базе Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева, по адресу: 125047 Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева по адресу: 125047 Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9 и на сайте <https://diss.muctr.ru/> (<https://diss.muctr.ru/author/1108/>)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Н. А. Макаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Керамические изделия изготавливаются и применяются человеком тысячи лет, устойчивость к термическим, химическим и биологическим воздействиям обуславливает 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. Шпенгер, 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, полагая, что изменение симметрии 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 на его производство, в основном определяющихся затратами на формование. Для изделий конкретного вида технологи сформулировали понятие групп сложности, получившее отражение 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, посвященных эволюции керамических материалов на различных стадиях технологии и анализирующих все стадии производства керамики, 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). Форма полуфабриката и изделия в этих работах 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, авторы научных работ особое внимание уделяли оптимизации форм, воспринимающих различные нагрузки во время эксплуатации (топологическая оптимизация); с появлением аддитивных технологий такая оптимизация получила новый импульс к развитию.

Рассмотренные подходы объединяет то, что исследователи сосредоточили внимание в основном на производстве и технологичности формы изделия. Между тем, в последние 30 лет совершенствование 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.

**Объект исследования** соответствует научной специальности 05.17.11 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, а именно: «1.2. Керамические и огнеупорные материалы и изделия на их основе. Получение исходных материалов, в том числе порошков с требуемой структурой (химическим и фазовым составом, формой частиц, размером, распределением по размеру); смешивание компонентов; формование заготовок; процессы обжига и спекания... 2. Физико-химические процессы, происходящие при эксплуатации в материалах и изделиях на основе силикатных и тугоплавких неметаллических материалов» а также научной специальности 17.00.06 Техническая эстетика и дизайн, а именно: «изделия из... керамики...», «методы анализа формообразования...», «методы

проектирования художественных и промышленных изделий с учетом технологических, материаловедческих, эргономических, социологических, психологических, биологических и физико-химических факторов».

Объектом исследования в диссертации служат керамические изделия промышленного дизайна художественного и технического назначения.

**Предмет исследования** соответствует научной специальности 05.17.11 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, а именно: «2. Физико-химические принципы технологии материалов и изделий из силикатных и тугоплавких неметаллических материалов... Конструирование изделий и оснастки... Ресурсо- и энерго-сбережение», а также научной специальности 17.00.06 «Техническая эстетика и дизайн», а именно: «2. Методы художественного проектирования с учетом производственных факторов. 5. Разработка методов производства малоотходных и экологических изделий. 11. Методы анализа свойств формы и материалов в проектируемых изделиях. 12. Методы формообразования и структурообразования художественных и промышленных изделий».

Предметом исследования работы являются закономерности формообразования (на стадиях проектирования, конструирования, изготовления) керамических изделий, а также влияние формы керамических изделий на их 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 поставлены и решены 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 термообработке, 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 три 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 полуфабриката 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 информационно-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 Научно-исследовательским институтом «Центр экологической промышленной политики». Разработанные подходы применены для проектирования и изготовления пористых керамических матриц, о чем имеется акт успешных испытаний ФГАУП «Радон». Результаты работы нашли применение также при выполнении ря-

да российских и международных проектов, что подтверждено документально, а также используются в 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» и получили отражение в учебных пособиях (что также 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).

**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. Российском химико-технологическом университете имени Д. И. Менделеева (г. Москва), конф. руководителей, ведущих специа-

листов 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. «Конструкции 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”, 2013 (Ruse, Bulgaria), 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 «Наукоемкие технологии в машиностроении» МПУ, 2018 (г. Москва).

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 65 научных трудов (из них 22 статьи в изданиях, цитируемых в международных базах Web of Science и Scopus и журналах перечня ВАК Минобрнауки России), получены 3 патента.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертация изложена на 416 с., состоит из введения, 3 разделов, общих выводов, библиографического списка, включающего 401 наименование, приложения, содержит 127 рисунков и 44 таблицы.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обоснована актуальность работы, поставлены ее цель и задачи, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

**В первом разделе** показано, что промышленный дизайн нужно определять как проектную деятельность по созданию продукта массового производства в условиях свободной конкуренции. Объектом проектирования изделия промышленного дизайна должен быть весь жизненный цикл продукта.

Современный этап развития дизайна характеризуется переходом к этапу дизайна умных материалов и основан на стратегии устойчивого развития цивилизации и, прежде всего, на требовании повышения ресурсо- и энергоэффективности производства и потребления и предотвращения негативного воздействия на окружающую среду. В разработке нового поколения материалов возрастает роль керамики, которая всегда занимала одно из важных мест во всех сферах предметного мира человека (рис. 1), благодаря своей термической, химической и биологической устойчивости.

В формах искусственных изделий можно видеть проявление внутренней борьбы стабильности (устойчивости) с изменчивостью форм (симметрии и асимметрии), выражающееся в органоформизме и кристалломорфизме изделий разных исторических эпох. На примере изменения дизайна строительных (кирпич, плитка) и бытовых (посуда) керамических изделий показано, что для утилитарных изделий дизайн определяет их функция, зна-



чительные изменения формы изделий связаны с развитием ресурсоэффективных технологий, в случае облицовочных материалов – с увеличением габаритов.

Современный поход к промышленному дизайну изделий опирается на понятие жизненного цикла (табл. 1, рис. 2), включающего все стадии разработки, производства и эксплуатации изделия. При проектировании изделия необходимо исходить из сочетания экономических, эстетических, экологических требований к продукту, а также, в ряде случаев, требований к его энергоэффективности.

Рисунок 1 – «Круговорот предметной среды» вокруг человека



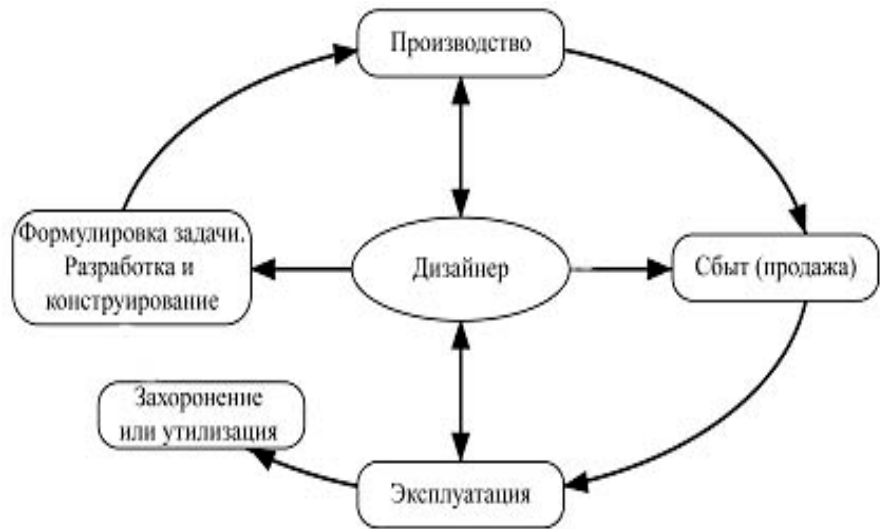
Таблица 1 – Жизненный цикл изделия, формальные зоны ответственности

Звено цикла	Кто отвечает за стадию	Чем начинается стадия	Чем заканчивается стадия
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, отходами
Утилизация	Эколог	Вывозом на полигон или в пункт утилизации	Захоронением или использованием в качестве сырья для создания нового продукта

Формальные зоны ответственности жизненного цикла изделия указаны в табл. 1, однако на практике именно дизайнер на основе дизайн-исследования, включающего как выявление приоритетов потребителей, так и анализ рынка, выдвигает идеи нового продукта. Взаимодействие с технологом позволяет дизайнеру оптимизировать форму и декор изделия, исследование продвижения товара, его продажи и эксплуатации, избежать ошибок в будущем. С другой стороны, технологи все больше участвуют в инжиниринге продукции,

оптимизируя изделия и материалы к условиям эксплуатации. Проектирование изделий и технологии тесно связаны между собой и определяют успех разработки изделия.

Рисунок 2 – Основные этапы жизненного цикла изделия и логическая связь с ними дизайнера



Современный этап развития технологии характеризуется усилением внимания к ресурсоэффективности, использованием критерия сокращения энергозатрат при проектировании и внедрении новых технологических процессов. Снижение материало- и энергоемкости изготовления изделий может быть достигнуто двумя способами:

- проектированием новых технологий и поиском 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 дизайне, прежде всего их функциональности в условиях эксплуатации и обеспечивают приемлемый уровень материало- и энергоемкости.

При анализе областей производства керамических изделий выявлено, что наибольшей энергоемкостью обладают технологии производства изделий сложной формы (посуда и технической керамики), требующих применения высоких температур обжига и многократных технологических переделов (рис. 3).

#### Удельное энергопотребление, ГДж,т

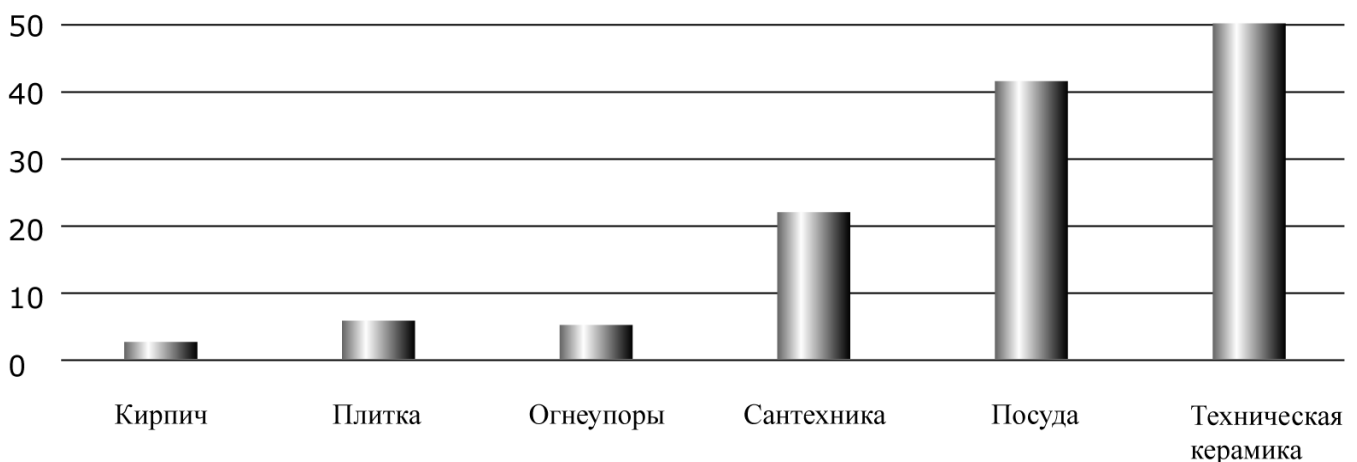


Рисунок 3 – Удельное энергопотребление на тонну продукта для различных производств керамических материалов

Стадия проектирования, определяющая дизайн изделий, занимает ведущее место в ряду стадий жизненного цикла, перспективных в контексте разработок, посвященных повышению энергоэффективности производства и эксплуатации различных видов керамических материалов (рис. 4).

Перенос акцента с производства на проектирование позволяет минимизировать энергозатраты на протяжении всего жизненного цикла изделия.

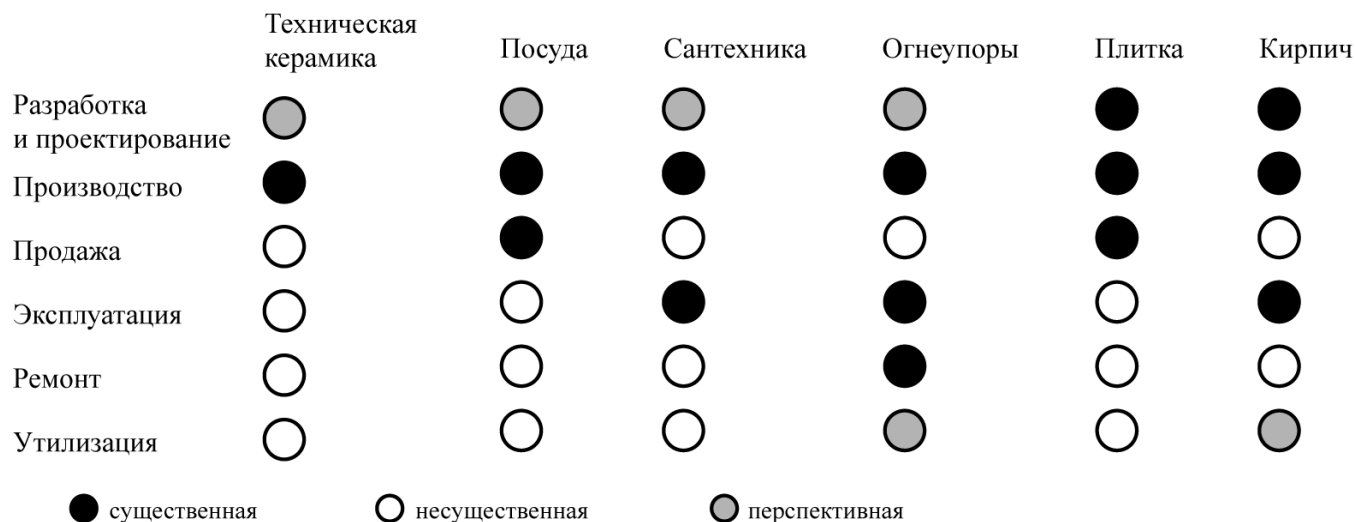


Рисунок 4 – Перспективные для разработок в области энергосбережения стадии жизненного цикла керамических изделий

На стадии производства керамических изделий в числе основных направлений повышения энергоэффективности силикатных и тугоплавких неметаллических материалов отмечают модификацию полуфабриката и изделий. Среди дизайнерских и технологических разработок, посвященных снижению энергозатрат, можно выделить следующие направления:

- увеличение функциональности изделия;
- облегчение конструкции изделия за счет уменьшения толщины и оптимизации формы;
- приближение формы полуфабриката к форме изделия.

В принципиальной схеме разработки технологии керамического изделия (рис. 5) форма изделия определяет выбор способа формования и значительное число технологических стадий, тогда как материал – выбор способа и режима термообработки.

Актуальные требования к ресурсо- и энергоэффективности, технологичности и полифункциональности керамического изделия во многом определяют его дизайн. От учета формы изделия при разработке технологии в значительной степени зависит возможность образования брака и технологичность изделия.

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

Современный этап развития дизайна и технологии керамики связан с цифровыми технологиями, которые позволяют сократить время проектирования и изготовления изде-

лия, спрогнозировать его поведение при производстве и эксплуатации, что улучшает технологичность производства, предотвращает преждевременную потерю потребительских свойств. Аддитивные способы формования керамических изделий, использование нанопорошков открывают перспективы в области создания керамических изделий с полифункциональными свойствами.

### Стадия проектирования

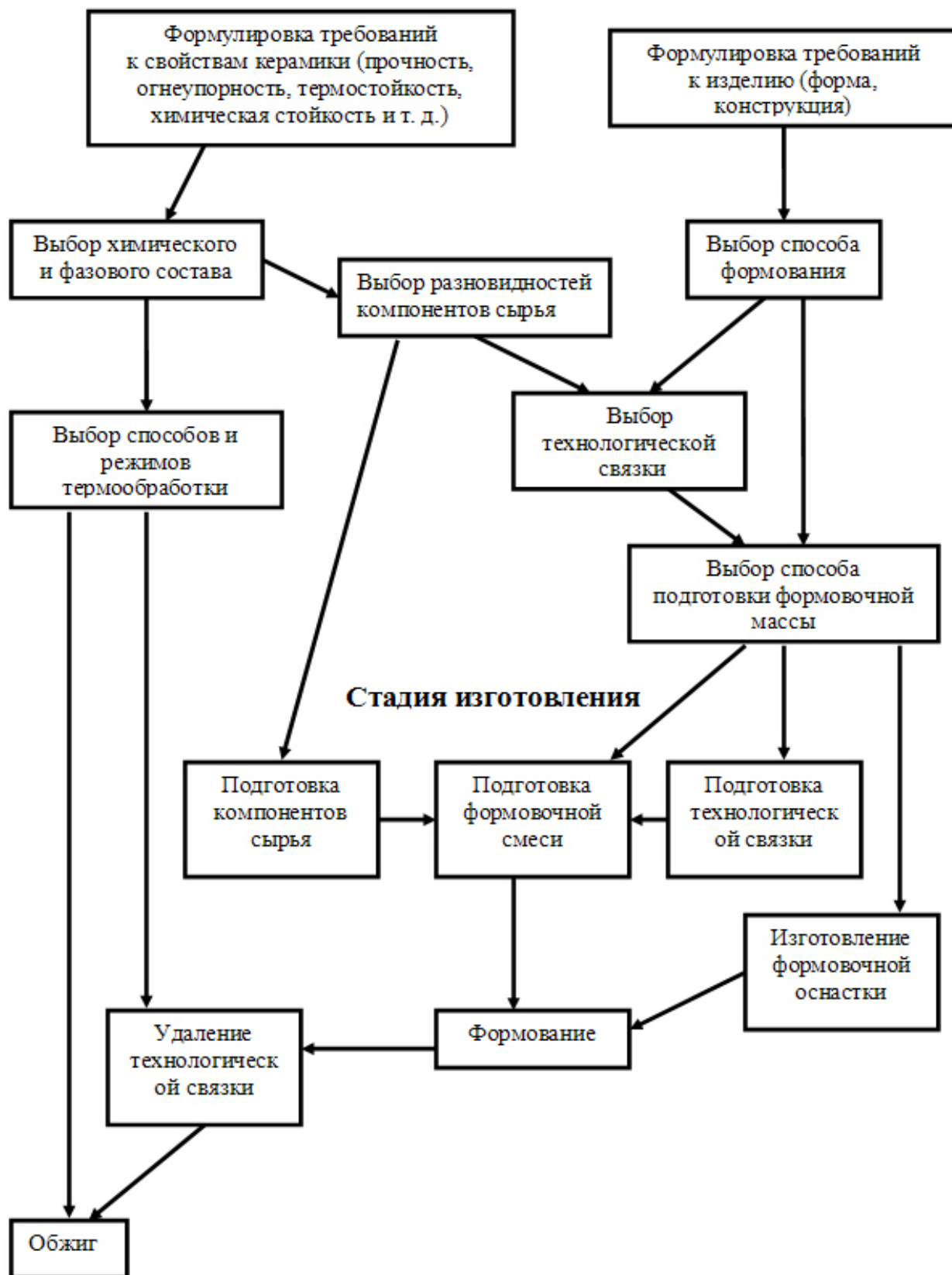


Рисунок 5 – Принципиальная схема разработки технологии керамического изделия

Разработка единых научных подходов к проектированию формы керамических изделий позволит как расширить диапазон дизайнерских решений, так и оптимизировать технологию производства с целью увеличения технологичности изделий.

**Во втором разделе** рассмотрена взаимосвязь состав – структура – свойства материала. Анализируя функциональные свойства изделия, играющие главную роль в его дизайне, необходимо учитывать не только состав и структуру материала, но и само изделие (форму, габариты, конструкцию).

В результате обобщения сведений, изложенных в научных работах, посвященных анализу влияния формы изделия при формовании, термообработке, а также в условиях эксплуатации, когда осуществляется тепло- и массообмен изделия с окружающей средой, сделан вывод о том, что решающее значение приобретает так называемый определяющий размер изделия. Определяющий размер или фактор формы в качестве физического параметра входит в уравнения, описывающие критерии подобия (критерии Пуансона, теплообменные и диффузионные критерии Био, массообменный критерий Кирпичева). Иногда он совпадает с толщиной изделия, но для учета влияния конфигурации изделия используют характерный (определяющий) размер тела или приведенную толщину. Определяющий размер ничего не говорит о собственно форме изделия, его конфигурации и пропорциях, т. е. дизайне изделия. Кроме того, затраты на изготовление изделия увеличиваются с усложнением его конфигурации при одном и том же определяющим размере.

Степень сложности или технологичность изделий промышленного дизайна основном зависит от формы изделия и практичности его изготовления. Классификации изделий по классам сложности как в технологии керамики, так и технологиях пластических масс и металлов, способы формования которых во многом подобны способом формования керамики, основаны как на характеристиках формы изделий, так и на методах их формования. В качестве критериев для оценки сложности изделий 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.

На основе анализа групп сложности изделий из металла, пластика, керамики можно предложить следующие степени сложности:

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

Недостаток рассмотренных критериев (степеней) сложности изделий состоит в том, что основное значение придается стадии формования, безусловно важной, но часто не являющейся критической. Сложность изделий принято определять как величину, обратную технологичности, и оценивать по сложности их геометрической формы. Однако известно,

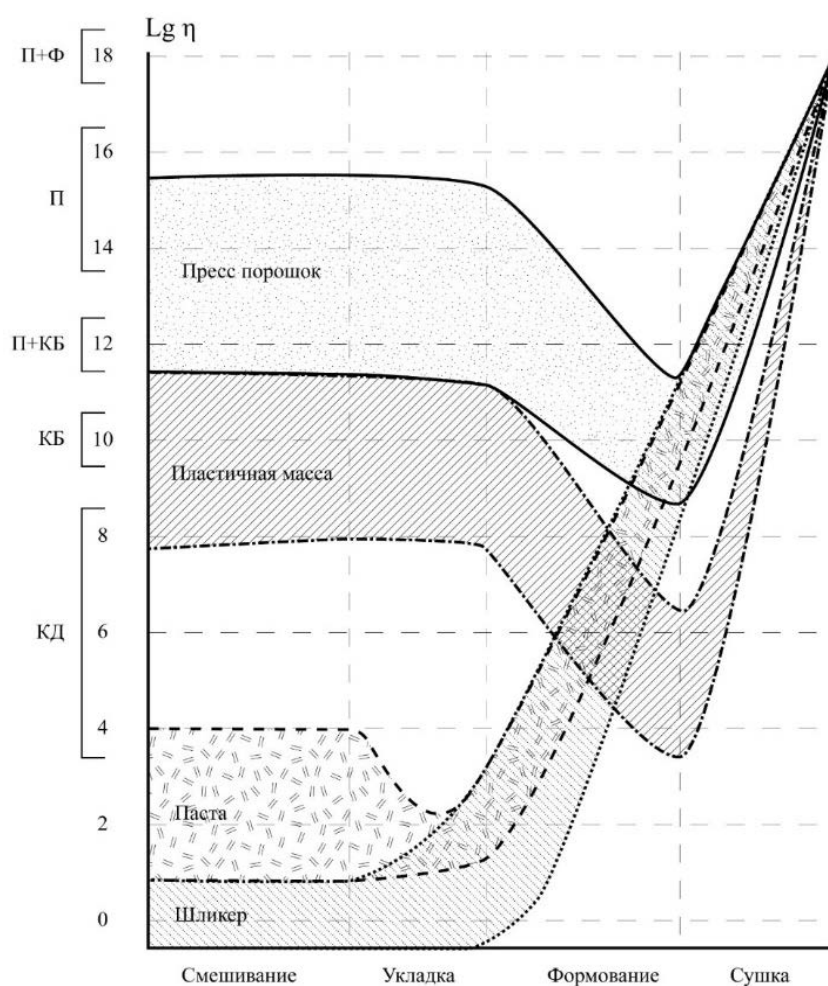
что сушка и обжиг массивных изделий простой формы (термически массивных) требуют усложнения режимов термообработки, что может делать их менее технологичными с учетом всего производственного процесса. Поэтому при разработке дизайна керамических изделий необходимо оптимизировать их форму исходя из следующих требований технологичности и устойчивости к тепловым и механическим нагрузкам:

- соответствие формы формуемого полуфабриката способу формования;
- уменьшение приведенной толщины изделия;
- уменьшение количества концентраторов напряжений.

Оценка сложности формы изделия для всех основных стадий его жизненного цикла должна основываться на обобщенных критериях структуры материала и ее реакции на внешние воздействия.

В работе рассматриваются дефекты керамических изделий как побочный результат энергетических воздействий на материал и форму при формовании, сушке и обжиге. Все основные способы формования керамических изделий (прессование, пластическое формование, шликерное литье) значительно отличаются по эффективной вязкости формуемой системы (рис. 6).

Рисунок 6 – Изменение эффективной вязкости формуемой системы на разных стадиях технологии:  
 ф – фазовые контакты,  
 п – контакты переходного типа,  
 кб – коагуляционные ближние контакты, кд – коагуляционные дальние контакты



Несмотря на значительные различия начального состояния систем, на стадии непосредственно формования частицы сближаются друг с другом и образуют коагуляционные контакты, позволяющие удерживать заданную форму полуфабриката, которые переходят в конденсационные при термообработке.

Три группы способов формования различаются реологическими системами и напряжениями, которые необходимо развить для их деформации (рис. 7). Вязкость всех трех систем в момент формования достигает  $10^8$ – $10^{10}$  Па·с, что характерно для пластичной массы, при деформации которой преобладают сдвиговые напряжения. На рис. 7 также указана область параметров аддитивных технологий.

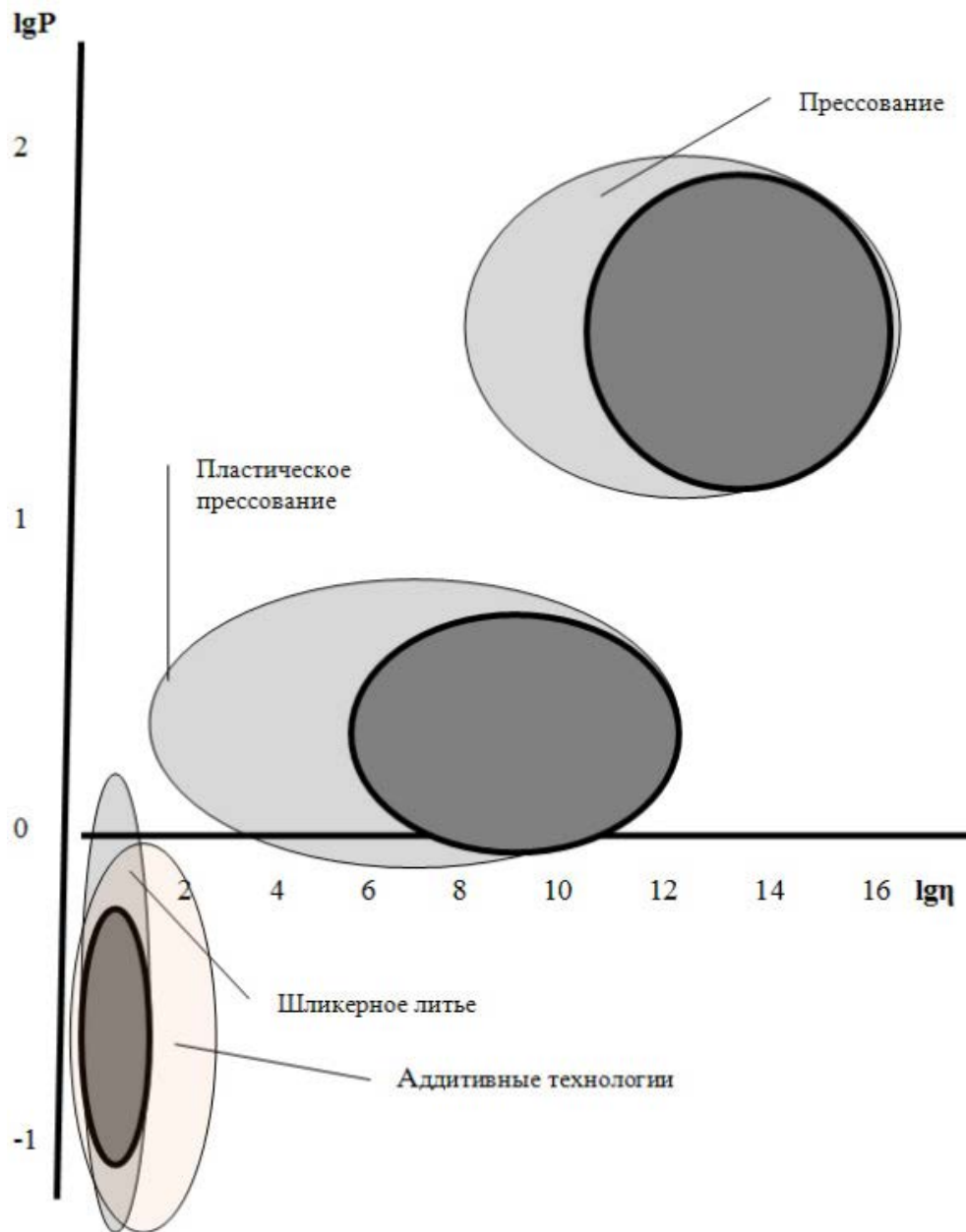


Рисунок 7 – Связь между эффективной вязкостью формуемой системы и давлением формования (интенсивной штриховкой выделены области преимущественных значений)

Для иллюстрации связи между вязкостью формуемой системы и сложностью полуфабриката предложена диаграмма (рис. 8). Шкала сложности изделий (4 степени сложности) соответствует приведенной на с. 11. Увеличение степени сложности керамических изделий требует применения небольших формовочных усилий к системам достаточно низкой вязкости.

В этом же разделе анализируется поведение материала и формы керамического полуфабриката при сушке и обжиге, их реакция на внешние воздействия, которая может приводить к образованию дефектов.



Одна из основных задач, которую необходимо решить при изготовлении изделия, заключается в сохранении однородности материала, достигнутой на стадии подготовки формовочной массы. При формовании возможно образования разнообразных дефектов, проявляющихся в нарушении структуры или формы полуфабриката.

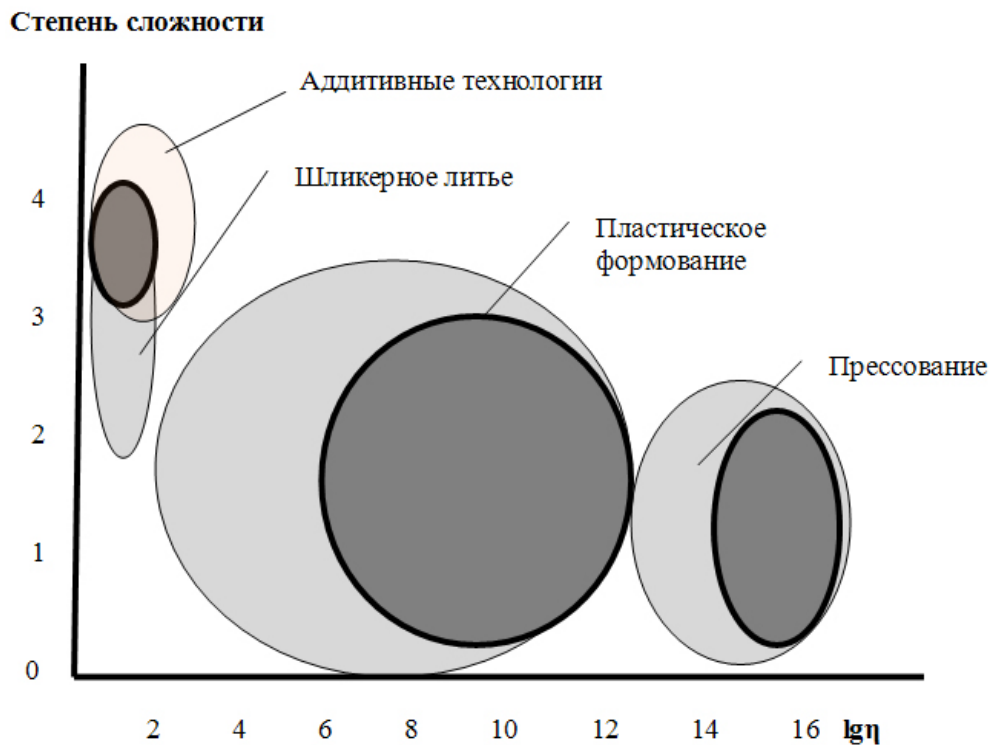


Рисунок 8 – Связь между эффективной вязкостью формуемой системы и степенью сложности заготовки (интенсивной штриховкой выделены области преимущественных значений)

Наиболее распространены классификации дефектов по месту их образования (например, дефекты поверхности). Неисправимые и допустимые дефекты готовых изделий обычно объединяют в две группы: отклонения от физико-технических показателей и дефекты внешнего вида, влияющие на дизайн. Однако такая классификация дефектов подразумевает чисто внешнее различие дефектов по месту образования и ничего не говорит о причинах их образования. Рассматривая единство связи «изделие – материал – технология», можно классифицировать дефекты как результат нарушения соответствия дизайна (формы) изделия, исходного материала и (или) технологических параметров воздействия на него. Такой подход к классификации дефектов дает возможность уйти от узкой направленности их рассмотрения и общей описательности.

Основная причина образования дефектов – несоответствие уровня или условий энергетического воздействия на объект (массу, полуфабрикат, готовое изделие) потенциальным возможностям к адаптации (структуре, реологии, прочности связей и т. д.) к изменившимся внешним условиям. Обмен энергией, массой, информацией является свойством открытой физической системы, в качестве которой можно представлять объект дизайна – керамическое изделие; при этом наиболее всеобъемлющим свойством является энергообмен.

Структура поверхности изделия в значительной степени отличается от структуры самого материала из-за избыточной поверхностной энергии упруго-напряженного поверхно-



стного слоя. Эта энергия частично локализована в дефектах, примесях и новообразованиях, концентрация которых вблизи поверхности тела увеличена. Энергетические воздействия при производстве и эксплуатации могут вызвать не только изменения в структуре поверхности (например, образование трещины) или материале (например, полиморфные превращения), но и привести к изменению формы (деформация) изделия. Рассеивание (диссипация) и поглощение (аккумулирование) подводимой энергии, например, релаксация механических напряжений, будут осуществляться по предпочтительным направлениям, задаваемым как структурой материала, так и формой изделия. Схема взаимосвязей структуры материала и формы изделия при внешних и внутренних воздействиях при изготовлении и эксплуатации изделия представлена на рис. 9.

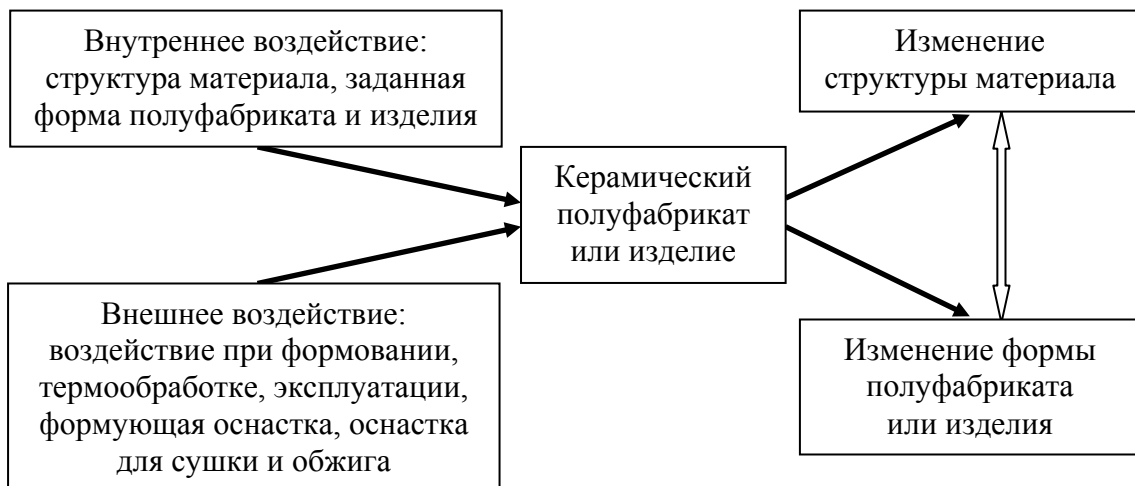


Рисунок 9 – Схема взаимосвязей структуры материала и формы изделия при внешних и внутренних воздействиях

Дефекты, возникающие в материале или полуфабрикате в процессе изготовления изделия, можно подразделить, прежде всего, на дефекты структуры материала и дефекты дизайна или формы (рис. 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 незначительно. К дефектам дизайна – все дефекты, которые в первую очередь изменяют размеры, форму изделия и ее сплошность, определяющие дизайн. Такая классификация облегчает рассмотрение важных для дизайна потребительских свойств изделий, которые в своем большинстве не выделяют дефекты структуры, учитывая их влияние опосредованно (на прочность, термостойкость и т. д.).

Степень и интенсивность внешнего энергетического воздействия (механического при формовании и теплового при сушке и обжиге) на изделия должны соответствовать структурным характеристикам материала и форме полуфабриката. Энергетические воздействия на материал и полуфабрикат на разных стадиях производства изделия и реакцию на них структуры материала представлены в виде схемы (рис. 10). 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, агре-

гация, ведущая к расслаиванию суспензии). Требование соответствия готовности формуемой системы к изменениям формы под влиянием внешних воздействий дает основание рассматривать эффективную вязкость системы «материал – связка – поры» в качестве универсального критерия при анализе поведения системы.

Дефекты структуры и дизайна изделия являются результатом синергетического эффекта взаимодействия внешнего воздействия с внутренними сигналами, влияющими на аккумуляцию, рассеивание или преобразование энергии, – структурой материала, конфигурацией и массой полуфабриката (изделия), и приводят к нарушению однородности структуры и формы. Наиболее распространенные дефекты дизайна изделия – трещины, в основном появляющиеся в процессе сушки полуфабриката, и деформации, преимущественно возникающие в процессе обжига изделия. Помимо параметров внешнего воздействия и внутреннего сигнала большое влияние на синергетический эффект оказывает направленность, т. е. симметрия воздействий.



Рисунок 10 – Схема энергетических воздействий на материал и полуфабрикат на разных стадиях производства изделий

В поисках оптимального дизайна керамических изделий, для которого важна устойчивость их форм к внешним и внутренним сигналам при производстве и эксплуатации, можно обратиться к природным формам неорганической материи, имеющим во многом сходный химический и фазовый состав с традиционной керамикой.

Кристаллические формы материи могут быть охарактеризованы тремя основными типами симметрии: осевой, плоскостной и центральной. Формы реальных кристаллов являются следствием влияния условий кристаллизации. Отклонения от идеальной формы кри-

сталлов (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 суперпозиции симметрии П. Кюри), которая определяется совокупным действием нескольких внешних сил (земного тяготения, потоков воды и т. п.). Принцип П. Кюри позволяет объединить геометрические законы симметрии с направлением воздействия на объект, таким образом, он имеет непосредственное отношение, как к синтезу вещества, так и к созданию изделия.

Проведенный анализ форм керамических изделий позволил предложить классификацию дизайна керамических изделий по трем группам по функциональному признаку, связанному с формой: облицовки, представленные изделиями, имеющими в основе простую форму пластины, емкости (в основе – форма шара или цилиндра) и конструкции, характеризующиеся большим разнообразием форм – от простых (форма куба) до сложных ассиметричных. Группы отличаются фактором формы, габаритами и степенью симметричности входящих в них изделий. Для каждой из групп характерны типы предельной точечной симметрии, предложенных П. Кюри для описания материальных объектов и физических полей, а также использование определенных способов формования (табл. 2).

Формование керамических изделий осуществляется двумя основными способами: уплотнением и (или) формообразованием массы механическими усилиями, передаваемыми на смесь, или использованием эффекта изменения агрегатного состояния смеси, характерным для так называемых коллоидных способов формования.

Способы формования отличаются разной интенсивностью формообразования, совмещенным с уплотнением (прессование, шликерное литье) или без него (пластическое формование). При «медленных» способах на процесс формования могут оказывать влияние гравитационные силы, у формовочных усилий появляется дополнительная осевая составляющая. При «быстрых» способах формования (прессование) – образование относительно однородных структур возможно лишь для тех изделий, у которых симметрия максимально совпадает с симметрией воздействия (рис. 11), поэтому такие способы используют для формования высокосимметричных изделий

Установлено, что симметрия керамических изделий отвечает принципам функциональности, стабильности (устойчивости к внешним воздействиям) и наследует симметрию внешних усилий, согласно принципу суперпозиции симметрий П. Кюри. Разделенные по своему дизайну на три группы керамические изделия описываются разными типами симметрии: облицовочные изделия – плоскостной, осевой и центральной симметрией; емкости – осевой, плоскостной и, редко, центральной и конструкции – плоскостной симметрией и ассиметричные. Для получения бездефектных изделий желательно, чтобы симметрия изделия соответствовала симметрии внешних усилий (симметрии формирующих усилий, термовлажностного поля сушильного агрегата и температурного поля печи). Для получения однородных бездефектных изделий сложной ассиметричной 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.

Таблица 2 – Характеристики основных способов формования керамических изделий

Формовочная смесь	Способ формования	Симметрия формовочных усилий	Виды и симметрия изделий
Суспензия	Традиционное шликерное литье в пористые формы	Симметрия покоящегося шара $\infty/\infty\mathbf{m}$	Тонкостенные емкости. Симметрия покоящегося шара и цилиндра $\infty/\infty\mathbf{mi}$ $\infty/\mathbf{mmm}$
Суспензия	Шликерное литье в пористые формы под давлением	Симметрия покоящегося шара $\infty/\infty\mathbf{m}$	Толстостенные емкости. Симметрия покоящегося шара и цилиндра $\infty/\infty\mathbf{mi}$ $\infty/\mathbf{mmm}$
Суспензия	Горячее шликерное литье	Симметрия покоящегося шара $\infty/\infty\mathbf{m}$	Конструкции малых габаритов с преобладанием плоскостной симметрии $\mathbf{m}$ , $\mathbf{mm}$ , $\mathbf{mmm}$
Пластичная масса	Раскатка в форму шаблоном или роликом	Симметрия вращающегося конуса $\infty\mathbf{mm}$	Емкости. Симметрия вращающегося конуса $\infty\mathbf{mm}$
Пластичная масса	Экструзия через мундштук	Симметрия вращающегося цилиндра $\infty/\mathbf{m}$	Емкости, конструкции с преобладанием осевой и плоскостной симметрии вращающегося ( $\infty/\mathbf{m}$ ) и покоящегося цилиндра ( $\infty/\mathbf{mm}$ )
Пластичная масса	Штамповка в открытые формы	Симметрия покоящегося цилиндра $\infty/\mathbf{mm}$	Облицовка с преобладанием плоскостной симметрии $\mathbf{m}$ , $\mathbf{mm}$ , $\mathbf{mmm}$
Порошок	Прессование штампами в закрытые формы	Симметрия покоящегося цилиндра $\infty/\mathbf{mm}$	Облицовка, конструкции с преобладанием плоскостной симметрии $\mathbf{m}$ , $\mathbf{mm}$ , $\mathbf{mmm}$
Порошок	Квазиизостатическое прессование	Симметрия покоящегося шара $\infty/\infty\mathbf{m}$	Конструкции малых и средних габаритов с преобладанием плоскостной симметрии $\mathbf{m}$ , $\mathbf{mm}$ , $\mathbf{mmm}$ . Емкости с симметрией покоящегося шара и цилиндра $\infty/\infty\mathbf{m}$ и $\infty/\mathbf{mmm}$
Порошок	Изостатическое прессование	Симметрия покоящегося шара $\infty/\infty\mathbf{m}$	Толстостенные емкости, с симметрией покоящегося шара и цилиндра $\infty/\infty\mathbf{mi}$ $\infty/\mathbf{mmm}$ массивные конструкции с плоскостной симметрией $\mathbf{m}$ , $\mathbf{mm}$ , $\mathbf{mmm}$

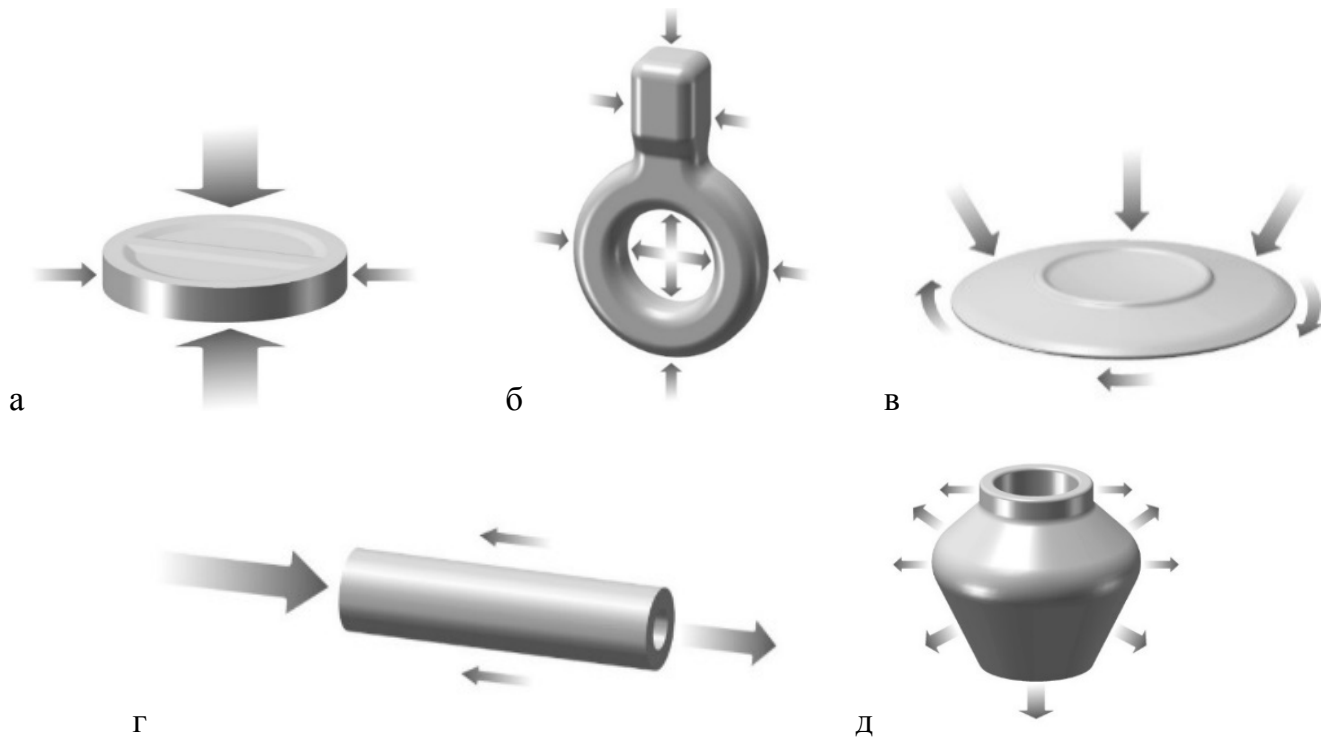


Рисунок 11 – Симметрия формовочных усилий: при прессовании – осевая и плоскостная (симметрия покоящегося цилиндра) – при полусухом прессовании (а); осевая, плоскостная и центральная (симметрия покоящегося шара) – при изостатическом прессовании (б), осевая и центральная (симметрия вращающегося конуса) – при раскатке (в); осевая (симметрия вращающегося цилиндра) – при экструзии (г), центральная и осевая (симметрия покоящегося шара) – при шликерном литье в пористые формы (д)

В результате анализа причин образования технологических дефектов показано, что для стадии формования наибольшую опасность представляют дефекты структуры, обуславливающие неоднородность материала, а для стадий сушки и обжига – дефекты дизайна (трещины и деформации).

**В третьем разделе** описаны объекты и инструменты исследования, в том числе методики физико-химического анализа структуры и свойств материала. Объектами исследований являлись керамические полуфабрикаты и изделия различной формы художественного и технического назначения в основном из глинистых масс (фарфор, полуфарфор, фаянс, майолика). При проведении исследований использованы методы петрографии, сканирующей электронной микроскопии, лазерной гранулометрии, дифференциально-термического, термогравиметрического и дилатометрического анализов, а также стандартные и оригинальные (разработанные автором) методики определения структуры и свойств полуфабрикатов и изделий.

В разделе представлены результаты экспериментов по изучению степени однородности материала как главной характеристики, определяющей качество изделий различного дизайна, на разных стадиях производства. Проанализированы также результаты экспериментов по образованию дефектов дизайна (формы) изделий – трещинообразованию при сушке и прогнозированию деформации изделий при обжиге.

Эффективность способов формования (разные виды холодного шликерного литья, раскатка, изостатическое прессование) полуфабрикатов различных форм оценивали с позиции однородности структуры материала, методами петрографии и электронной микроскопии. Установлено, что однородность структуры керамических образцов разной формы одного состава и, соответственно, образование дефектов структуры зависит от способа формования, при этом наибольшее различие проявляется в поверхностном слое, на который действуют максимальные формовочные усилия.

Однородность образцов из фарфоровой и полуфарфоровой масс, полученных разными способами формования (литьем, пластическим формованием, прессованием) определяли по распределению введенных меток и плотности образцов. Установлено, что высокая степень однородности образцов (наименьшие значения среднеквадратичного отклонения) достигается при формовании методами изостатического прессования и шликерного литья.

Исследовали неоднородность образцов, прошедших сушку и обжиг. Геометрические характеристики образцов описывали отношением их объема к поверхности, через которую передаются формовочные усилия (приведенный фактор формы  $f_f$ ). Приведенный фактор формы может трактоваться как высота формуемого слоя материала, чем больше которая, тем сложнее получить однородный материал, преодолевая внешнее и внутреннее трение.

Для единой оценки условий формования образцов приняли фактор  $G$ , отражающий условия формования (давление формования) и характеристику системы (условную эффективную вязкость).

$$G = P / \eta_{\text{отн}}, \quad (1)$$

где  $P$  – максимальное давление формования;  $\eta_{\text{отн}}$  – относительная вязкость системы, рассчитанная из объемного содержания твердой фазы (от 0,3 при шликерном литье до 0,65 для системы «твердая фаза – связка – воздух» при прессовании).

Рассчитав значения факторов, характеризующих условия формования, характеристику системы ( $G$ ) и геометрические характеристики образца – фактор формы ( $f_f$ ), установили зависимости между произведением этих факторов и величиной неоднородности образцов. 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 и проявляющийся в различиях плотности.

В результате обработки массива экспериментальных данных по однородности распределения меток и плотности материала образцов разных форм (пластин, цилиндров, втулок) было получено выражение

$$\sigma = C + k \ln(G \cdot f_f), \quad (2)$$

где  $C$  и  $k$  – коэффициенты.

Выражение (2) показывает нелинейное увеличение степени неоднородности формуемой смеси с возрастанием приведенного фактора формы образца и с повышением отношения прилагаемого давления к относительной вязкости системы. Фактор  $G$  имеет область предпочтительных значений, за границами которой резко возрастает неоднородность

(формование неэффективно) или усилие недостаточно для образования связанной системы (формование невозможно).

Исследование структуры ранее показало, что наибольшей неоднородностью отличается поверхностный слой образца, поэтому устанавливали зависимость однородности поверхности керамики из фаянса и фарфора от температуры обжига и способа формования. Исследования проводили разработанным автором способом капиллярного всасывания, заключающимся в измерении скорости всасывания жидкости из капилляра, подведенного к поверхности образца любой конфигурации, и позволяющем оценить водопоглощение (рис. 12) на различных участках образца по коэффициенту всасывания (массе поглощенной жидкости, отнесенной к корню квадратному времени всасывания на прямолинейном участке данной зависимости).

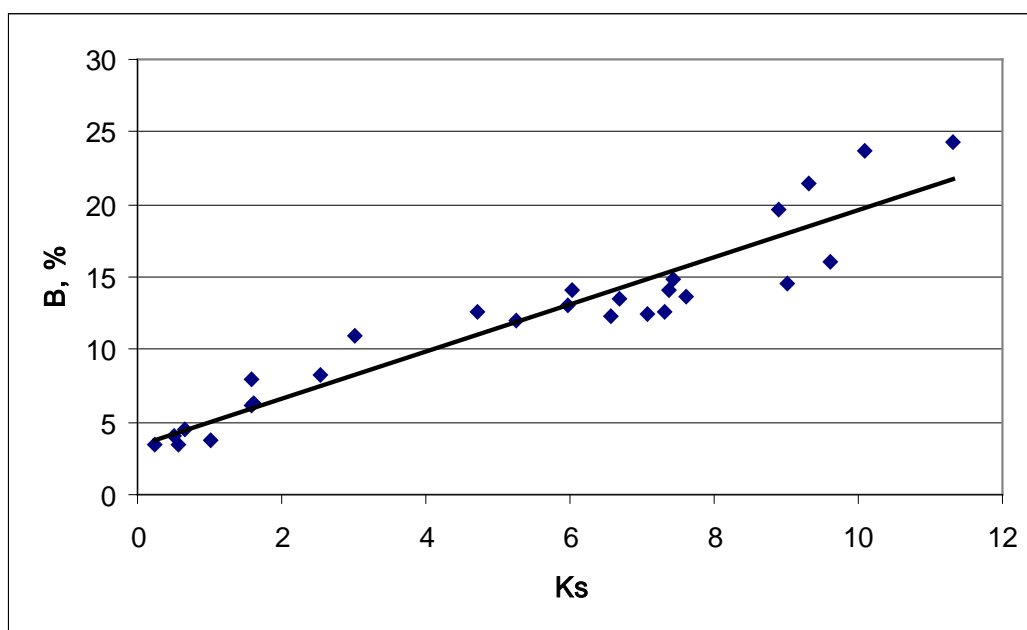


Рисунок 12 – Зависимость между водопоглощением (В) материала (фаянс) и его коэффициентом всасывания  $K_s$

Материалы отличались разными значениями пористости (рис. 13), однако степень неоднородности их поверхности зависела от способа формования и температуры обжига и для большинства исследованных образцов достигала максимума после обжига при 1000-1100 °С (рис. 14).

За коэффициент неоднородности образца принимали максимальное значение отношения разницы между коэффициентами всасывания с учетом расстояния между точками измерения на поверхности образца, выбранное из всех рассчитанных коэффициентов для данного образца. Коэффициенты рассчитывали отдельно по вертикальным (высота) и горизонтальным поверхностям образцов.

Экспериментально подтверждено, что способ формования является определяющим фактором получения изделия с однородными характеристиками поверхности. Установлена связь между усилием формования, вязкостью формируемой системы и геометрическими характеристиками изделий. Наибольшей однородностью поверхности отличаются изделия, полученные способом шликерного литья. Значительное влияние на однородность формо-

ванного полуфабриката оказывает состав материала: независимо от формы однородность образцов с увеличенным содержанием глинистых компонентов сырья (фаянса и полуфарфора) выше, чем у фарфоровых образцов.

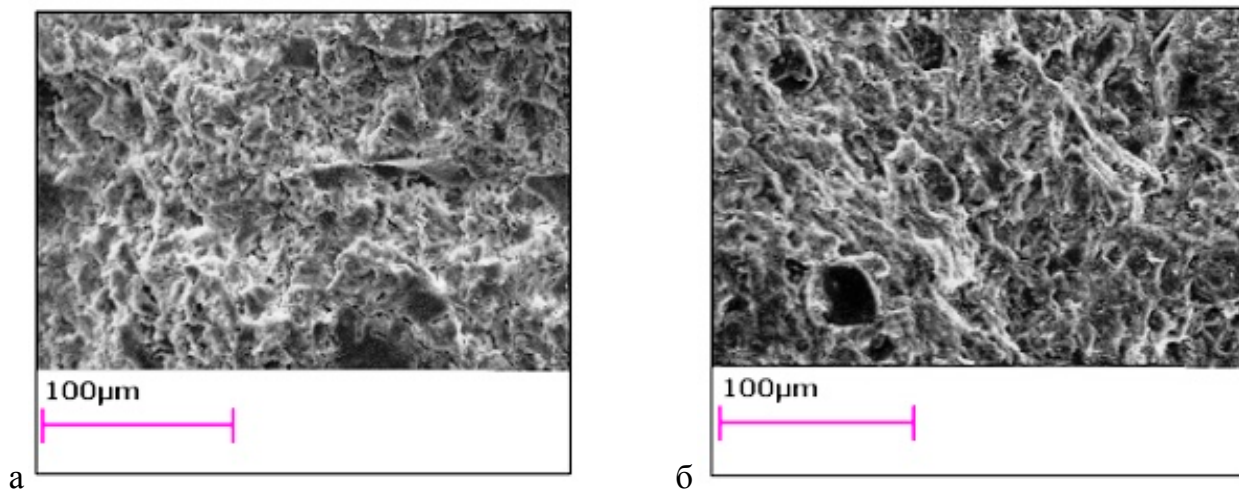


Рисунок 13 – Микроструктура фарфоровых (а) и фаянсовых образцов (б), обожженных при 1200 °С

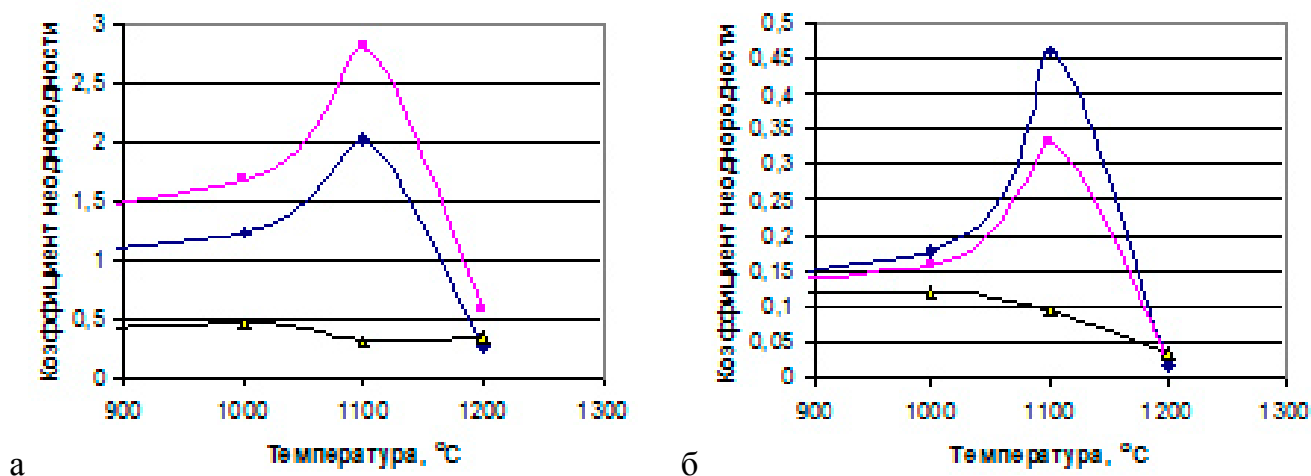


Рисунок 14 – Изменение коэффициента неоднородности поверхности по длине (а) и по высоте (б) для образцов из фарфора в форме пластины, формованных различными способами с увеличением температуры обжига

В результате анализа влияния конфигурации полуфабриката и фактора формы на однородность керамических образцов в виде пластин, дисков, цилиндров, втулок, колец установлено возрастание однородности при уменьшении фактора формы образца и совпадении типа симметрии поля напряжений с типом симметрии образца (согласно табл. 2). Наиболее однородные – изделия всех форм, формованные способом шликерного литья (симметрия покоящегося шара  $\infty/\infty$  mm), пластины, формованные способом прессования (симметрия покоящегося цилиндра  $\infty$ /mm).

Методом капиллярного впитывания предложено оценивать неоднородность поверхности изделий различной структуры и формы, полученных разными способами формования, без разрушения изделия и без сложного и дорогого оборудования. Метод также позволяет быстро оценивать водопоглощение, часто являющееся характеристикой степени



спекаемости керамики. Установлено влияние изменений структуры образцов после обжига при различных температурах на степень их однородности, оцененной по пористости отдельных участков поверхности. Анализ неоднородности образцов на разных стадиях изготовления показал, что после обжига при температурах 1000-1100 °С по сравнению с другими температурами обжига возрастает неоднородность поверхности образцов.

Проанализировано влияние характеристик формы полуфабриката на образование трещин во время сушки полуфабрикатов различной формы, изготовленных из глинистой массы для производства кирпича. Фактор формы полуфабриката изменяли, используя влагоизоляцию его отдельных частей. Сушку осуществляли конвективным способом при разных температурах, измеряя влагосъем с поверхности полуфабриката и фиксируя момент образования трещин. Эксперименты проводили также с использованием способа кондукции (контактной сушки).

Установлено, что приведенный фактор формы (рассчитанный с учетом площади поверхности испарения влаги) полуфабриката оказывает решающее влияние на скорость и продолжительность бездефектной сушки способами конвекции и кондукции, но не является полностью определяющей характеристикой. Для определения безопасной скорости сушки необходимо учитывать форму и симметрию полуфабриката, представляя форму полуфабриката, состоящую из простых форм, максимальные факторы формы которых будут определяющими. Исследования проводили как на образцах простой формы (пластины) из глины и формовочных масс для производства кирпича, так и на образцах сложных форм в виде характерных частей полуфабрикатов эффективного (щелевого) строительного камня. Результаты экспериментов представлены в виде диаграмм трещиностойкости полуфабрикатов (рис. 15-16). Для определения безопасного режима сушки установлены графические и аналитические зависимости продолжительности бездефектной сушки  $\tau$  или максимально безопасного влагосъема  $m$  и определяющего размера изделия – приведенного фактора формы  $f$  (рис. 17). Зависимости различаются в области больших значений фактора формы.

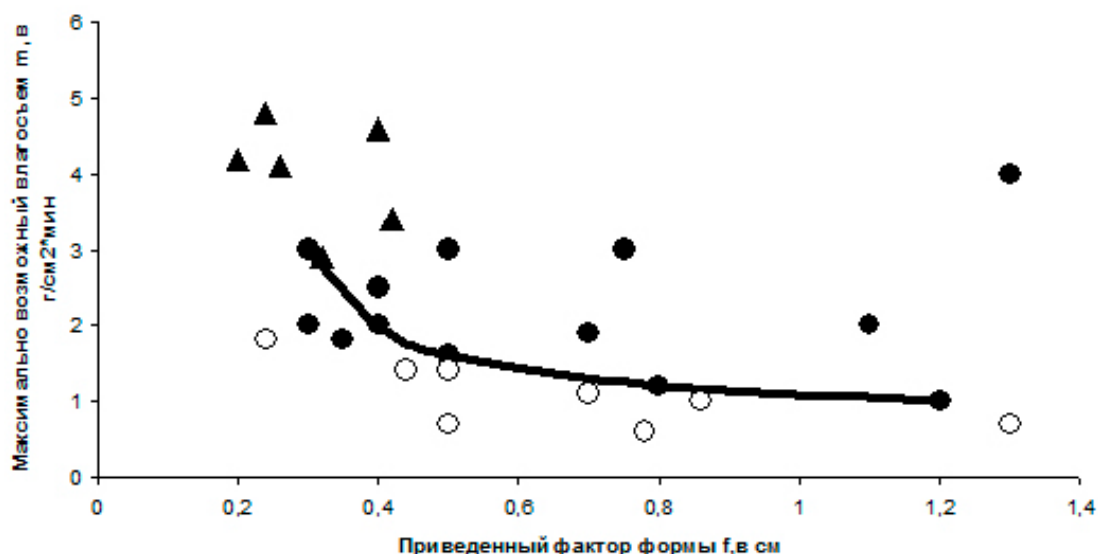


Рисунок 15 – Области безопасных и опасных значений максимального влагосъема для образцов из исследуемой глины: ● – влагосъем с образцов, на которых образовались трещины; ○ – влагосъем с образцов, на которых трещины не образовывались; ▲ – влагосъем с частей, на которых образовались трещины

Анализируя полученные зависимости, следует 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.

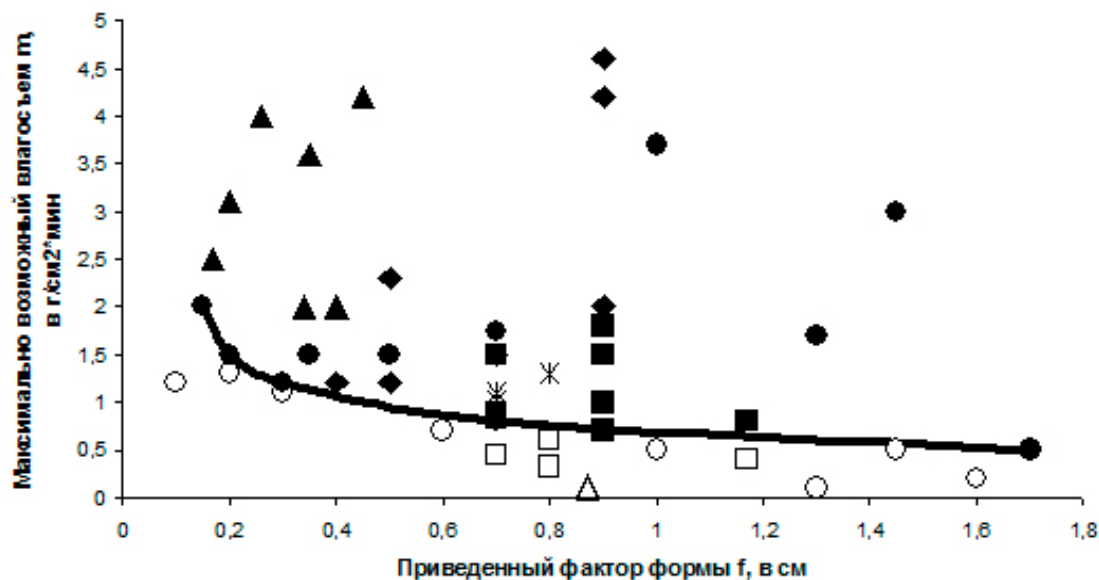


Рисунок 16 – Области безопасных и опасных значений максимального влагосъема для образцов из производственной массы для строительного камня: ● – влагосъем с образцов, на которых образовались трещины; ○ – влагосъем с образцов, на которых трещины не образовывались; ▲ – влагосъем с частей, на которых образовались трещины; ■ – влагосъем с образцов сложных форм; □ – влагосъем с образцов сложных форм на которых не образовывались трещины; ◆ – влагосъем с частей сложных форм, на которых трещины образовывались. △ – влагосъем с целых производственных изделий (с трещинами и без); Ж – влагосъем с частей производственных изделий, на которых образовывались трещины

Выявлена зависимость допустимой интенсивности сушки в производственных условиях от приведенного фактора формы керамических теплоэффективных камней размером 250×120×138 мм. Результаты, полученные в заводских условиях, показали согласование с описанным выше зависимостями.

Анализ характера и месторасположения трещин в образцах в виде пластин показал, что трещины чаще всего располагались в тех характерных частях изделия, где влагосъем превышал допустимо безопасный. При сушке изделий такой формы расчет и подбор режимов следует вести относительно режимов сушки именно этой части.

При проведении экспериментов по СВЧ-сушке полуфабрикатов различной формы на основе глин, было установлено, что при использовании СВЧ-сушки, по сравнению с конвективной, достигается большая однородность материала и снижается сушильная усадка. При этом следует учитывать не симметрию полуфабриката (поля при СВЧ-сушке характе-

ризуются симметрией покоящегося шара  $\infty/\infty$  и определяется симметрией полуфабриката), а его объем.

Основную опасность для изделий на основе глин, спекающихся по механизму жидкофазного спекания, представляют не дефекты, заложенные на предыдущих технологических стадиях – неоднородности, возникающие при формовании, и трещины, образующиеся в процессе сушки (т. к. эти дефекты либо нивелируются при обжиге, либо обнаруживаются до его проведения), а деформации, большая часть которых связана с ошибками в проектировании формы и конструкции изделия, а также деформации изделий из-за неправильно выбранного режима обжига.

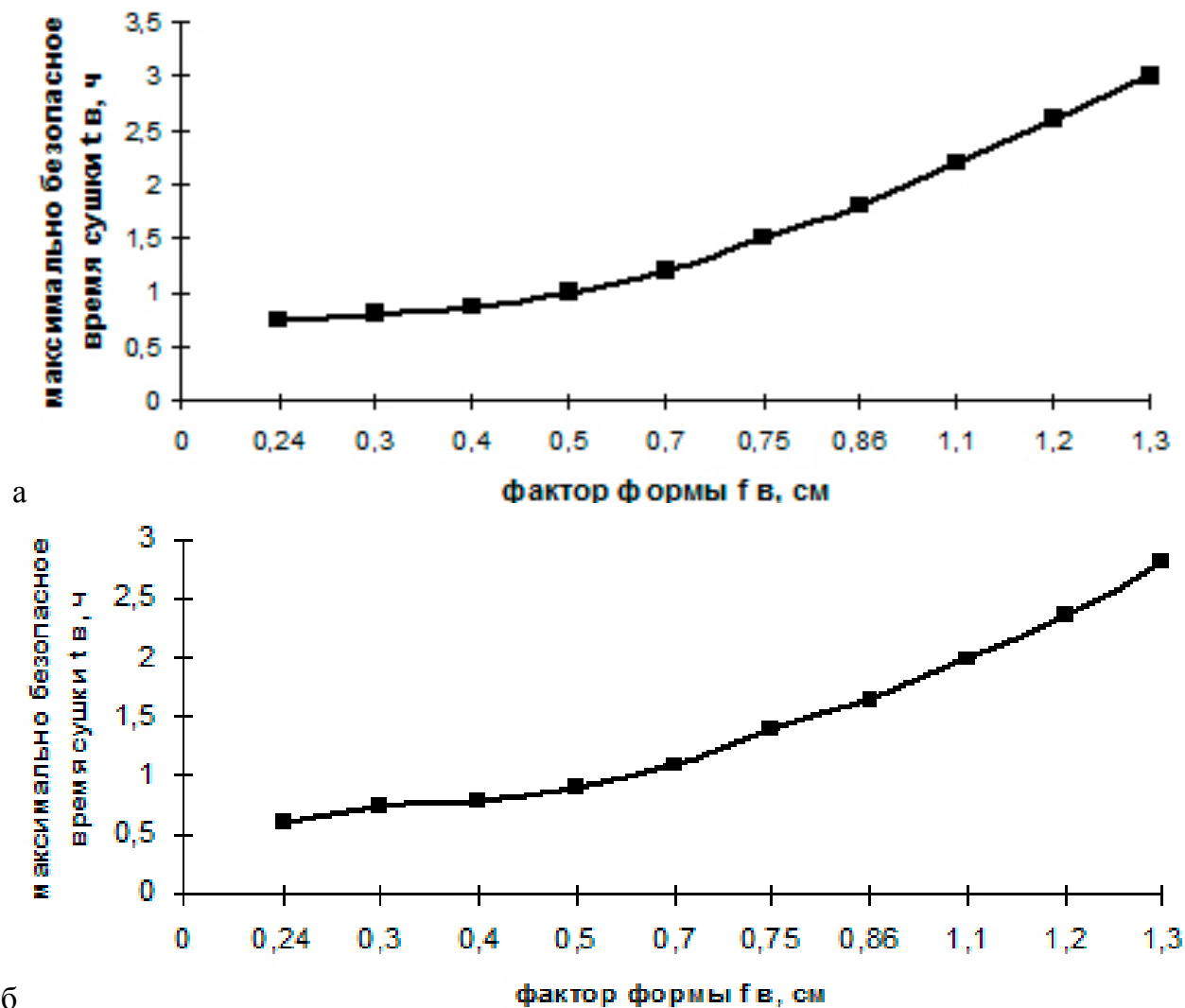


Рисунок 17 – Зависимость максимально безопасной продолжительности сушки от фактора формы образцов из исследуемой глины (а) и производственной массы (б)

В работе в качестве объектов исследования деформации выбраны разные виды фарфора и полуфарфор, из которых изготавливают широкий ассортимент изделий сложной формы (посуду), крупногабаритные изделия (сантехнику и изоляторы).

Деформацию керамических изделий прогнозировали с использованием компьютерных программ по методу конечных элементов (КЭ), который позволяет моделировать любую форму изделия. Использованы феноменологические модели спекания керамики Скорохода-Олевского, для чего определяли высокотемпературную вязкость материалов под нагрузкой методами консольного изгиба, растяжения и кручения (рис. 18, 19).

Опытным путем установлены температурные зависимости эффективной вязкости на образцах различных форм (рис. 18), в том числе на специально сконструированной установке, создающей условия чистого сдвига в результате кручения образцов в виде трубок (рис. 19), построенные по результатам экспериментов по кручению тонкостенных трубок из полуфарфора предварительно обожженных при 900 °С при дополнительном осевом сжатии или растяжении.

Температурные зависимости эффективной вязкости получены при различных видах и величинах нагрузжений (напряжения растяжения и сжатия), имитирующих напряжения, возникающие в изделиях сложной формы под действием собственной массы, что характерно для деформации изделий в процессе обжига (рис. 19).

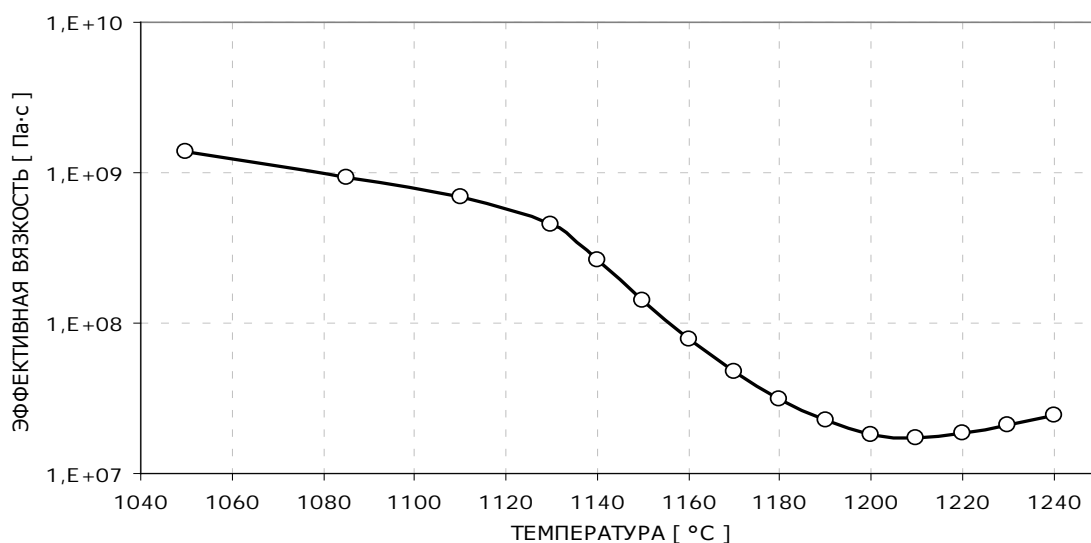


Рисунок 18 – Зависимость логарифма эффективной вязкости образцов мягкого фарфора Bone China (костяного фарфора) от температуры (по результатам консольного нагружения под собственным весом)

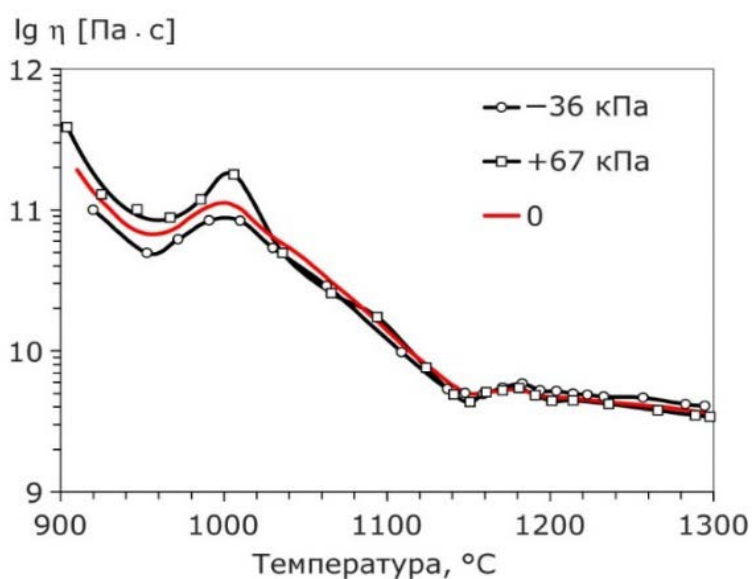


Рисунок 19 – Зависимость логарифма эффективной вязкости образцов полуфарфора от температуры (по результатам кручения образцов в виде трубок)

По реологической модели Ньютона с учетом температурных зависимостей вязкости при чистом сдвиге с касательными напряжениями 5,2 и 82 кПа, определяемым приложенной нагрузкой, построена КЭ-модель консоли. Проведенные с помощью САЕ-программы расчеты позволили спрогнозировать деформацию образцов (стрелу прогиба), которая показала необходимость учета краевых эффектов. Для учета влияния краевых эффектов установлен поправочный коэффициент  $K_{edge}$ , находящийся в прямо пропорциональной зависимости от фактора формы образца  $f$ , описанного выше, с увеличением которого влияние краевых эффектов уменьшается. Величина коэффициента  $K_{edge}$  определена на основе рассчитанного по результатам экспериментов калибровочного коэффициента  $E_{cant}$ , определенного как 0,21 (отклонение на 21 %), с заменой объема  $V$  и площади поверхности  $S$  соответствующими средними габаритами консоли:

$$K_{edge} = \frac{E_{cant}}{f} = \frac{VE_{cant}}{S} \quad (3)$$

Полученный коэффициент  $K_{edge}$  позволил при расчете деформации для одинаковых условий обжига данного материала перейти от чистого сдвига к деформации изгиба с учетом фактора формы  $f$ , определяющего влияние формы элемента конструкции изделия (толщины стенки и т. д.). Для валидации полученной модели проведены расчеты деформации фарфорового образца в виде кольца. Экспериментальная проверка показала расхождение с расчетными данными на 4,7 % с доверительной вероятностью 80 %.

Таким образом, на основе экспериментально полученных температурных зависимостей эффективной вязкости материала с использованием метода КЭ и учетом фактора формы изделия продемонстрирована возможность прогнозирования его деформации в процессе обжига.

В разделе также приведены результаты экспериментов, иллюстрирующие основные положения работы. На примере высокопористых керамических изделий технического назначения, используемых для утилизации радиоактивных отходов, показана оптимизация формы изделия, в соответствии с требованиями дизайна (эргономические показатели) и технологии (снижение фактора формы изделия). Получен акт об успешных испытаниях партии изделий. При проектировании обжига изделий (обжиг образцов нитрида кремния реакционным спеканием в СВС-реакторе) продемонстрировано использование принципа П. Кюри. Увеличением числа функций керамических деталей в проектируемом изделии (в конструкциях водозапорных узлов) достигнуто снижение металлоемкости. При проектировании технологии керамических мешалок, используемых при варке оптических стекол достигнуто сокращение технологических стадий, облегчения массы изделий и сокращение времени их сушки. На примере художественных керамических изделий сложной формы показана эффективность использования аддитивных способов формования.

## ВЫВОДЫ

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 органоформному 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 функциональным 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.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ**

**Статьи в изданиях, которые входят в международные системы цитирования  
Web of Science, Scopus и реферативную базу данных Chemical Abstracts,  
а также в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых  
должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций**

1. **Захаров А. И.** Однородность керамики: связь со способом формования и геометрическими характеристиками изделия [Текст] // Стекло и керамика. 2003. № 9. С. 35-38.

**A. I. Zakharov** Homogeneity of Ceramics: Correlation with Molding Method and Geometrical Parameters of Articles // Glass and Ceram. 2003. Vol. 60. Is. 9-10. Pp. 287-290.

2. **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.

**A. I. Zakharov, I. A. Karnaushchenko** Capillary suction study of the surface homogeneity of semifinished ceramic products and articles // Glass and Ceram. 2008. Vol. 65 Is. 9-10. Pp. 358-361.

3. **Захаров А. И.** Трещинообразование глиняного полуфабриката [Текст] / Гурьянов А. Л., **Захаров А. И.** // Стекло и керамика. 2007. № 2. С. 24-28.

**A. L. Gur'yanov, A. I. Zakharov** Crack formation in a clay semifinished product // Glass and Ceram. 2007. Vol. 64. Is. 1-2. Pp. 58-62.

4. **Захаров А. И.** Деформация фарфоровых изделий [Текст] / Андреев Д. В., **Захаров А. И.** // Стекло и керамика. 2009. № 1. С. 10-12.

**D. V. Andreev, A. I. Zakharov** Deformation of porcelain articles // Glass and Ceram. 2009. V. 66. № 1-2. Pp. 8-10.

5. **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.

**D. V. Andreev, A. I. Zakharov** Ceramic item deformation during firing: effects of composition and microstructure (review) // Refractories and Industrial Ceramics. 2009. Vol. 50. № 4. Pp. 298-303.

6. **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.

**D. V. Andreev, A. I. Zakharov** Structure and rheology of semivitreous porcelain during kilning // Glass and Ceram. 2012. Vol. 68. № 9-10. Pp. 330-336.

7. **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.

**D. V. Andreev, A. I. Zakharov** Study of the rheology of sintered glass ceramic materials by torsion of thin-walled tubes // Refractories and Industrial Ceram. 2012. Vol. 53. № 1. Pp. 31-39.

8. **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.

**D. V. Andreev, A. I. Zakharov** Comprehensive Method of Studying and Predicting the Deformation of Ceramic Products During Sintering // Refractories and Industrial Ceram. 2014, Vol. 54. № 5. Pp. 366-375.

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

**A. V. Belyakov, A. I. Zakharov** Theoretical prerequisites for creating cold-resistant ceramics // Glass and Ceram. 1996. Vol. 53. Is. 10. Pp. 298-300.



10. **Захаров А. И.** Керамика на основе нитрида кремния, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [Текст] / Лысенков А. С., **Захаров А. И.**, Закозжевский В. В. // Стекло и керамика. 2007. № 3. С. 17-19.

S. Lysenkov, **A. I. Zakharov**, V. V. Zakorzhevski Ceramic made from SHS silicon nitride powder // Glass and Ceram. 2007. Vol. 64. Is. 3-4. Pp. 86-88.

11. 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.

V. Yu. Krakhmatova, **A. I. Zakharov**, D. V. Andreev. Methods of Additive Technologies for the Manufacture of Ceramic Products (Review) Glass and Ceramics. 2019. Volume 75. Is. 11-12. Pp. 479-484.

**Статьи в изданиях, входящих в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций**

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

13. **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.

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

15. **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.

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

17. **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.

18. **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.

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

20. **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.

21. **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.

22. **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-4 [Текст] / Гусева Т. В., **Захаров А. И.**, Молчанова Я. П., Вартанян М. А., Акберов А. А. // Строительные материалы. 2016. № 4. С. 4-10.

#### Статьи в изданиях, которые входят в международные системы цитирования Web of Science и Scopus

23. 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. Pp. 351-358.

24. 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. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 347 (2018). 012040 doi:10.1088/1757-899X/347/1/012040. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/347/1/012040/pdf>.

#### Монографии

1. **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.: «ЮрИнфоР-Пресс», 2010. 220 с.

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).

#### Патенты

1. Беляков А. В., **Захаров А. И.** Сменная вентильная головка крана с шиберным дисковым затвором. Пат. РФ № 2097633.

2. Беляков А. В., **Захаров А. И.** Сменная вентильная головка крана с шиберным дисковым затвором. Пат. РФ № 2111317.

3. Боровинская И. П., Закоржевский В. В., **Захаров А. И.**, Каргин Ю. Ф., Лысенков А. С., Попова Н. А. Способ получения спеченных изделий на основе нитрида кремния. Пат. РФ № 24580023 11.03.2011.

**Статьи в других изданиях**

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.** 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.

3. **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.

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

Также опубликованы 32 статьи в сборниках научных трудов конференций.