

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«МАТИ - РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.Э. ЦИОЛКОВСКОГО»

АУНГ Тху Хан

АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИХ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ МЕТОДОМ СВАРКИ

Специальность: 05.17.06 – «Технология переработки полимеров и
КОМПОЗИТОВ»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор Г.В. Комаров

Москва 2014

Содержание

Введение.....	4
Глава 1 Состояние вопроса. Анализ сведений о проблемах ремонта изделий из полимерных конструкционных материалов	8
1.1 Общие подходы к ремонту полимерных композиционных материалов	11
1.2 Виды дефектов и повреждений	14
1.3 Проблемы ремонта деталей и изделий из полимерных композиционных материалов	21
1.3.1 Ремонтные материалы	22
1.3.2 Геометрические параметры и структура ремонтной зоны	30
1.3.3 Технология ремонта	33
Выводы по главе 1	44
Список использованных источников	45
Глава 2 Анализ свойств полимерных материалов, влияющих на их поведение при ремонте и на возможность восстанавливать несущую способность изделия	56
2.1 Состав и структура ПМ как влияющие на ремонт факторы	57
2.2 Механические свойства ПМ как влияющие на ремонт факторы ...	62
2.3 Теплофизические свойства как влияющие на ремонт факторы	75
2.4 Другие свойства	77
Список использованных источников	81
Глава 3 Методы обнаружения и анализ дефектов в сварных изделиях из ПМ	84
3.1 Контроль качества сварных соединений	85
3.2 Анализ дефектов сварных соединений	94
3.2.1 Дефекты соединений встык, изготовленных сваркой нагретым инструментом	98
3.2.2 Дефекты соединений труб в раструб, изготовленных сваркой нагретым инструментом с помощью муфты	100
3.2.3 Дефекты соединений, изготовленных сваркой закладным нагревательным элементом в виде спирали	102
3.2.4 Дефекты соединений, изготовленных сваркой нагретым газом с присадочным материалом	102
3.2.5 Дефекты соединений, изготовленных экструзионной сваркой	106
3.2.6 Дефекты соединений встык, изготовленных инфракрасной сваркой	107
3.3 Дефекты сварных соединений термопластичных композиционных материалов	108
3.3.1 Дефекты соединений, изготовленных сваркой нагретым газом.....	111
3.3.2 Дефекты соединений, изготовленных сваркой нагретым инструментом.....	114
3.3.3 Дефекты соединений, изготовленных сваркой закладным на-	

гревательным элементом.....	116
3.3.4 Дефекты соединений, изготовленных ультразвуковой сваркой	118
3.3.5 Дефекты соединений, изготовленных сваркой трением.....	123
Выводы по главе 3.....	125
Список использованных источников	126
Глава 4 Исследование ремонтной сварки термопластичного композиционного материала	132
4.1 Исследование сварки нагретым инструментом косвенным нагревом	140
4.2 Исследование сварки растворителем термопластичного композиционного материала	143
4.2.1 Выбор растворителя и состава присадочного материала	143
4.2.2 Изготовление и испытание на прочность сварных соединений	145
4.2.3 Исследование влияния режимов и условий сварки на свойства свариваемого материала	150
4.2.4 Исследование возможности упрочнения сварных соединений	153
4.3 Исследование ремонтной сварки присоединением усиливающей накладки к дефектной детали	156
Список использованных источников	163
Общие выводы	165
Приложения	167

Введение

Актуальность работы. В последние годы в авиа- и машиностроении большое внимание уделяется внедрению полимерных композиционных материалов (ПКМ), и в первую очередь композиционных материалов (ПКМ). Применение таких материалов актуально и для развивающихся стран, к числу которых относится государство Мьянма.

Целым рядом ценных как технологических, так и эксплуатационных свойств обладают композиционные материалы на основе термопластов (ТКМ), в том числе возможностью ремонта сваркой в расплаве. возможность реализации высокой степени автоматизации процесса формования; возможность вторичной переработки гибкой, штамповкой и т.п.; возможность ремонта деталей сваркой в расплаве.

В процессе производства и эксплуатации изделий из них возможно появление дефектов типа расслоений, сквозных отверстий, трещин, царапин, забоин, разрывов и искривлений волокон и т.д. Учитывая высокую стоимость ТКМ, особенно на основе полиароматических матриц, следует считать актуальным ремонт изделий из них. Освоение современных технологий ремонта деталей из ПКМ и в том числе из ТКМ весьма востребовано в ведущих авиационных фирмах.

Одним из основных требований к ремонту конструкций из ПКМ является восстановление их исходной прочности в пределах назначенного срока службы деталей. При этом применительно к авиационным конструкциям чаще всего ставится задача ремонта в полевых условиях, что означает реализуемость метода при одностороннем подходе к устраняемому дефекту. Такое требование ограничивает выбор метода ремонта. Обращаясь к опыту ремонта металлических изделий, можно констатировать, что одним из наиболее приемлемых для многих отраслей техники является сварка с присоединением к дефектному участку ремонтной накладки. Возможности такого метода сварки с целью восстановления несущей способности дефектных деталей из ТКМ

не охарактеризованы и требуют проведения дополнительных исследований. В связи с этим проведение исследований ремонтной сварки деталей из полимерных материалов (ПМ) для авиационного машиностроения является актуальным.

Целью работы была разработка технологии ремонтной сварки для восстановления несущей способности типового изделия из ПМ типа обшивка, в частности из термопластичного композиционного материала, имеющего наиболее значимые для работоспособности изделий дефекты типа сквозное отверстие или разрыв материала.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- провести анализ повреждаемости и ремонтпригодности деталей из ПМ;
- изучить свойства конструкционных ПМ, влияющие на способность восстановления несущей способности дефектных изделий;
- изучить данные о методах контроля качества и о дефектах сварных соединений деталей из ПМ;
- оценить возможность ремонта деталей из ПМ с применением различных методов сварки;
- предложить физическую модель ремонтной сварки, на основании которой выбрать метод ремонта модельных образцов из одного типа ТКМ и разработать ремонтный материал;
- исследовать технологию ремонтной сварки образцов из ТКМ;
- исследовать влияние конструкции соединения и типа ремонтного материала на степень восстановления несущей способности модельных образцов из ТКМ, имеющих дефекты.

Научная новизна:

1. При анализе свойств ПМ, влияющих на возможность восстанавливать их свойства в процессе ремонта, впервые отмечено, что при выборе метода ремонта необходимо учитывать как структуру, состав, так и весь ком-

плекс механических, теплофизических и химических характеристик материала изделия.

2. Разработанная физическая модель сварки ПМ растворителем позволила обосновать построение технологического процесса и выбор режимов процесса ремонта с применением этого метода сварки. При сварке растворителем присадочный материал в отличие от склеивания жидким клеем достаточно нанести на одну из соединяемых поверхностей. Это отличие в технологиях объясняется различием механизмов склеивания и сварки растворителем. Большая, чем у клея, не содержащего растворитель, текучесть присадочного материала и взаимодействие его с полимером на поверхности ТКМ исключают образование пор на границе присадка/субстрат, которые удаляются только при двухстороннем нанесении клея.

3. Установлено, что в сварном нахлесточном соединении напряжения сдвига концентрируются по краям перекрытия. Это позволяет применить методы повышения прочности соединения, известные в родственной сварке технологии склеивания. Присоединением накладок в зоне Т-образного шва тонкостенного ТКМ можно существенно повысить прочность соединения при растяжении.

4. Получены экспериментальные данные по степени восстановления несущей способности дефектных деталей из ТКМ на основе матрицы, способной растворяться в органическом растворителе, присоединением по диффузионному механизму на дефектный участок накладок, имеющих различную геометрию.

Практическая значимость:

1. Разработана технология сварки растворителем полисульфонового стеклотекстолита, позволяющая достичь прочности соединения, близкой к прочности при сдвиге соединяемого материала.

2. Разработана технология ремонта деталей из ТКМ, содержащих дефекты типа разрыва или отверстия, с использованием диффузионного соеди-

нения накладки из препрега на основе раствора матрицы ТКМ в органическом растворителе, с материалом деталей.

3. При разработке технологии сварки растворителем устанавливать продолжительность сварки целесообразно по результатам испытания Т-образных соединений. Использование методики испытания при растяжении параллельного соединения позволяет оценивать влияние режимов сварки растворителем на изменение структуры и свойств ПМ.

5. Разработанная технология ремонта прошла апробацию на базе ООО «НПО Самос», что подтверждено соответствующим актом.

6. Материалы диссертации могут быть использованы в условиях государства Мьянмы для решения проблем ремонта изделий из ПМ и для подготовки соответствующих специалистов.

Апробация работы:

Материалы работы изложены на 7 научно-технических конференциях, в том числе на V Междунар. конф. «Новые перспективные материалы и технологии их получения НПМ-2010» (Волгоград, Волг ГТУ, 2010), на XXXVI, XXXVIII - XL Международных молодежных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, МАТИ, 2010, 2012- 2014 г.г.), на Всероссийских НТК «Новые материалы и технологии – НМТ» (Москва, МАТИ, 2010 и 2012 г.г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 9 работах, в том числе в 1 ведущем рецензируемом журнале, входящем в перечень ВАК РФ. Список публикаций приведен в конце реферата.

Объем диссертации и её структура. Диссертация изложена на 166 страницах машинописного текста и 31 страницах Приложения, содержит 31 рисунок и 24 таблицы. Работа состоит из введения, 4 глав, приложения и общих выводов. Списки литературы приведены после каждого раздела диссертации.

Глава 1 Состояние вопроса. Анализ сведений о проблемах ремонта изделий из полимерных конструкционных материалов

Акцентировать внимание в мире на ремонте изделий из полимерных конструкционных, в том числе композиционных материалов (ПКМ) начали лишь в последние годы. Причин тому может быть несколько:

- все большее применение взамен традиционных стеклопластиков более дорогих угле- и органопластиков, от изделий из которых требуется по возможности более длительный срок эксплуатации;

- увеличение объема выпуска изделий из ПКМ, которые изменяют экологическую обстановку и в соответствии с этим ставят сложные задачи по утилизации вышедших из строя конструкций;

- появление новых ПКМ на основе термопластичных матриц, способность многократно размягчаться которых требовала оценки возможности ремонта с применением сварки, широко распространенной в ремонте металлических конструкций;

- отсутствие данных для ответа на вопросы, возникающие в практике ремонта новых для ряда производств материалов.

Техническая наука о ремонте изделий из ПКМ в последние годы продвинулась вперед, но всё еще можно считать, что она находится на стадии развития, поэтому сложившихся классификаций и стандартов в этой области технологии пока еще нет. Исследования касаются преимущественно отдельных ее вопросов. В государстве Мьянма проблемы ремонта изделий из ПКМ в исследованиях, в том числе применительно к авиационной отрасли практически не затронуты. Поэтому при разработке технических решений по ремонту изделий из ПКМ анализ имеющегося мирового опыта позволит, как представляется, более целенаправленно подойти к постановке и решению задач работы.

Делая философское обобщение, легко придти к выводу, что ремонт изделий и сборка изделий по сути своей очень близки друг к другу. Как при ремонте, так и при сборке один или несколько элементов присоединяются к

другим, чтобы обеспечить требуемое функционирование изделия или конструкции. Близость проблем ремонта и сборки сделала логичным проведение семинаров одновременно по этим двум темам “Соединение и ремонт композиционных материалов” [1]. Как при ремонте, так и при сборке важнейший вопрос - выбор способа соединения или сочетания материалов.

Первые данные по применению ПМ в ремонтных работах были получены при устранении повреждений и износа в металлических изделиях. Систематические, начатые еще в конце 50-х годов исследования в этой области, направление которых получило название “Технология склеивания, литья смол и ламинирования”, выполнены в Германии [2-10]. Первоначально в этих работах разрабатывали технологии устранения различных дефектов и повреждений в металлических отливках [2], корпусах и деталях механизмов и аппаратов, относящихся к сельскохозяйственной технике [4,6-8,10], химической промышленности [3], горной технике [9], станкостроению. В настоящее время ПМ внедрены в ремонт авиационной техники из алюминия [11-17], автомобилей (начало положено в 1980 г.) [18-22], при ремонте в стоматологии, при ремонте одежды и т.д.

В середине 70-х годов в лаборатории Aeronautical Research (г. Мельбурн, Австралия) впервые для ремонта металлических авиационных конструкций применили накладки из ПКМ [14,17,23-25].

Авторы процитированных работ из всех способов соединения металлов с ПМ отдали предпочтение адгезионным соединениям. К выводу о высокой эффективности и широких технических возможностях этих же соединений с применением ПМ при выполнении ремонта разнообразных металлических изделий [26-32], авиационной [33,34] и космической техники [35], бетонных конструкций [90] давно пришли российские исследователи. Именно при использовании адгезионных соединений в наибольшей степени проявились технологические достоинства ремонтных ПМ:

- возможность переработки в широком интервале температур, в том числе лежащих ниже комнатной температуры;

- возможность формирования контакта с ремонтируемыми поверхностями, в том числе сложной конфигурации без приложения избыточного давления;
- возможность достижения консистенции, удовлетворяющей различным процессам переработки;
- возможность осуществления процесса ремонта за минимально короткое время;
- возможность обеспечения нужной их сохранности.

Благодаря этим достоинствам ПМ ремонт можно производить с помощью простой аппаратуры и оснастки. Адгезионные соединения, выполняемые с помощью ПМ, обеспечивают высокую экономичность ремонта. Причем применение 1 кг ПМ в ремонтных работах дает экономический эффект в 15 раз больший, чем эффект от использования 1 кг клея при сборке нового изделия [4].

На эффективность усиления металлических конструкций, в частности сотовых конструкций, приклеиваемыми накладками пытались вновь обратить внимание в исследовании, проведенном в ВЗИ текстильной и легкой промышленности, так называемого «восстановительного» ремонта [109]. Правда, о конкретных устраняемых дефектах в этой работе ничего не сказано. В целом в ней повторилось то, что уже было давно известно из работ по усилению дефектных деталей.

Знания, накопленные в области ремонта металлических изделий с применением ПМ, несомненно, уже послужили и могут служить хорошей базой для развития технологии ремонта изделий из ПКМ. Более того, опыт, полученный при ремонте, помог создать новые технологии изготовления изделий, более устойчивых при эксплуатации, а потому в меньшей степени нуждающихся в восстановлении и ремонте. К таким технологиям, например, относятся клеевая сборка тормозных колодок или колодок сцепления с корпусными деталями и упрочнение накладками из ПКМ металлических элементов или бетонных изделий. Однако, как и при ремонте металлических изделий, при аварийном ремонте ПКМ, например, до прибытия изделия на ремонтное предприятие и/или для устранения пробоин, проемов и т.п. интерес могут

представлять и механические соединения с помощью металлических крепежных элементов из-за высокой скорости их выполнения.

Принципиально новых по сравнению с “полимерным” ремонтом металлов проблем в ремонте ПКМ можно было не ожидать. Ремонтопригодность является одним из требований к современным ПКМ, хотя, вероятно, неремонтируемых конструкционных материалов нет. Речь здесь можно, очевидно, вести не об отсутствии способных ремонтироваться ПКМ, а о неустраняемых в данной экономической или производственной ситуациях дефектах (погрешностях). Новизна решаемых в области ремонта ПКМ множества частных задач обусловлена главным образом спецификой структуры и состава этих материалов.

Ремонт независимо от типа материала изделия преследует в общем случае следующие возможные цели:

- устранение дефекта или повреждения и восстановление исходных характеристик изделия;
- компенсация ослабления, вызванного наличием дефекта, который сохраняется в изделии;
- торможение дальнейшего разрушения изделия.

1.1 Общие подходы к ремонту полимерных композиционных материалов

В настоящей работе рассматривается решение главным образом технических проблем ремонта изделий из ПКМ. Технические проблемы ремонта изделий из любых материалов многоплановы:

- определение допустимости ремонта изделия;
- выбор метода ремонта;
- выбор ремонтных материалов;
- оптимизация конструкции ремонтируемого участка;
- прогнозирование работоспособности подвергнутого ремонту изделия.

Уровень решения этих проблем во многом определяется видом дефекта или повреждения, условиями проведения ремонта, степенью развития технологии соединения ПКМ и тем, насколько совместно работают конструктор, материаловед и технолог.

Несомненно, ответ на вопрос, ремонтировать поврежденную деталь или ее заменять, во многом зависит от экономических аспектов. Резерв снижения трудоемкости ремонта - механизация отдельных его операций. Когда механизация недоступна, ручной ремонт может быть дороже замены поврежденной детали на новую деталь.

Определение допустимости ремонта изделия целиком относится к компетенции конструктора: он решает, допустимо ли с точки зрения восстановления или поддержания на заданном уровне работоспособности изделия устранение повреждения или дефекта данного вида и размера и расположенного в данном месте изделия. В российской технике документ, регламентирующий допустимость ремонта, называется ремонтной картой изделия. Выработать какие-то общие рекомендации в этом вопросе весьма сложно: все зависит от конкретной ситуации. Лишь практика эксплуатации отремонтированного изделия может служить окончательным критерием оценки правильности выбора какого-то решения.

Положительная роль совместной с конструктором работы технолога и материаловеда может сводиться к предсказанию влияния состава материала и технологических параметров формования детали на дефектность и связанное с ней поведение ПКМ при механическом нагружении, а также технологических параметров процесса ремонта, например, кратности нагрева на изменение характеристик ПКМ.

Устранение дефектов производят в случае, когда их наличие приводит к снижению работоспособности изделия ниже допустимого уровня. Полученные в университете г. Касселя (ФРГ) относительно новые данные о влиянии пористости в слоистых волокнистых ПКМ на их поведение при различных видах нагружения показали, что увеличение их пористости в большей

степени может отразиться на работоспособности ПКМ при сдвиге, нежели на работоспособности стенки изделия при статическом растяжении [36]. Падение на 50 % прочности при межслоевом сдвиге углепластика с увеличением содержания пор от 0 до 6 объемн. % установлено в работе [37].

Вопрос о влиянии кратности нагрева на свойства ремонтируемого материала возникает при оценке возможности многократного проведения ремонта одного и того же участка изделия. Применительно к ремонту ПКМ целенаправленных исследований по этому вопросу проведено мало. Опираясь на данные работы [38], можно констатировать, что слоистые стеклопластики и органопластики на основе фенольной смолы после восьми циклов отверждения (температура 140°C, выдержка по 1 ч) в целом сохранили свои механические свойства.

Некоторыми исследователями задачи по разработке новых ремонтных технологий в Российской авиационной технике ставились и в конце 20 века [110, 111], когда в литературе сведений о существующих технологиях было предостаточно. Но, видимо, эта задача оказалась не под силу заявителям. В процитированных работах новые технологии не были обозначены. По всей видимости, принципы ремонтных технологий с применением ПКМ уже достаточно ясны. Речь, наверное, может идти лишь о совершенствовании некоторых известных технических решений.

Так, для оценки выбранных методов ремонта ПКМ до сих пор продолжают разрабатывать методики исследования их эффективности, в первую очередь в странах, где начинают осваивать передовые технологии. О такой методике сообщается в работе [93]. Сущность методики заключается в выполнении экспериментов, согласно которым к поверхности материала конструкции приклеиваются тонкие слои материала накладки, а затем они подвергаются воздействию различных эксплуатационных факторов. Через определенное время выдержки проводили испытание соединения на сдвиг при кручении. Если разрушение происходило при нагрузке, ниже заданной, то это указывало, что клеевое соединение или сама накладка деградировали и

должны быть заменены. Однако, чтобы воспользоваться такой методикой для подъема технологической готовности до уровня, пригодного для применения в авиации, требуется усовершенствовать базу данных и увеличить объем экспериментальной проверки.

1.2 Виды дефектов и повреждений

Дефекты и повреждения изделий из ПКМ могут находиться как в стенке детали, так и в зоне соединения деталей или в самом соединительном шве (таблица 1.1).

Таблица 1.1

Дефекты и повреждения в изделиях из ПКМ

По месту расположения				
В стенке детали		В зоне соединения деталей	В соединительном шве	
Внутренние	Наружные			
По характеру				
Отклонения от заданных размеров		Нарушения целостности	Инородные включения	Отклонения в составе и структуре материала
Вмятина	Изменение формы и размеров			
По причине появления				
Производственные			Эксплуатационные	

По месту расположения их можно также разделить на внутренние и поверхностные. Они могут быть производственными или эксплуатационными и обнаруживаются:

- проведением операций контроля качества после формования детали и сборки изделия;
- в процессе профилактического осмотра или проверки технического состояния узлов;
- после аварийной ситуации с изделием (столкновения, удары и т.п.).

В общем случае все виды дефектов в зависимости от их характера могут быть сведены в 4 группы:

- отклонения от заданных размеров,
- нарушения целостности,
- инородные включения,
- отклонения от заданного состава или структуры.

Отклонения от заданных размеров (размерные дефекты) могут касаться всего изделия или его частей. К размерному дефекту может быть отнесена легко образующаяся у всех полимерных материалов вмятина (рисунок 1.1). Вмятина может образоваться в зоне головки крепежного элемента, сопровождаясь выпучиванием вокруг этой головки [94]. Появление размерного дефекта может сопровождаться существенным изменением формы изделия (рисунок 1.2).

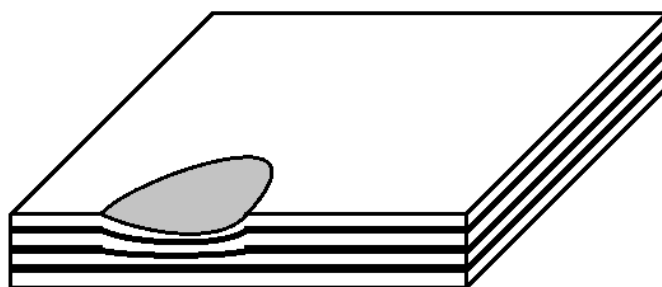
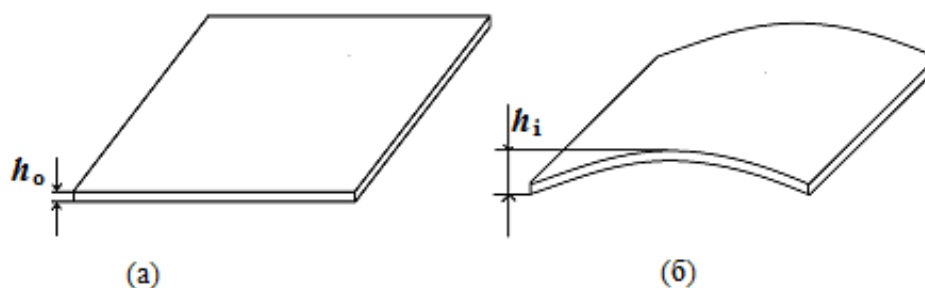


Рисунок 1.1 - Дефект в виде вмятины.



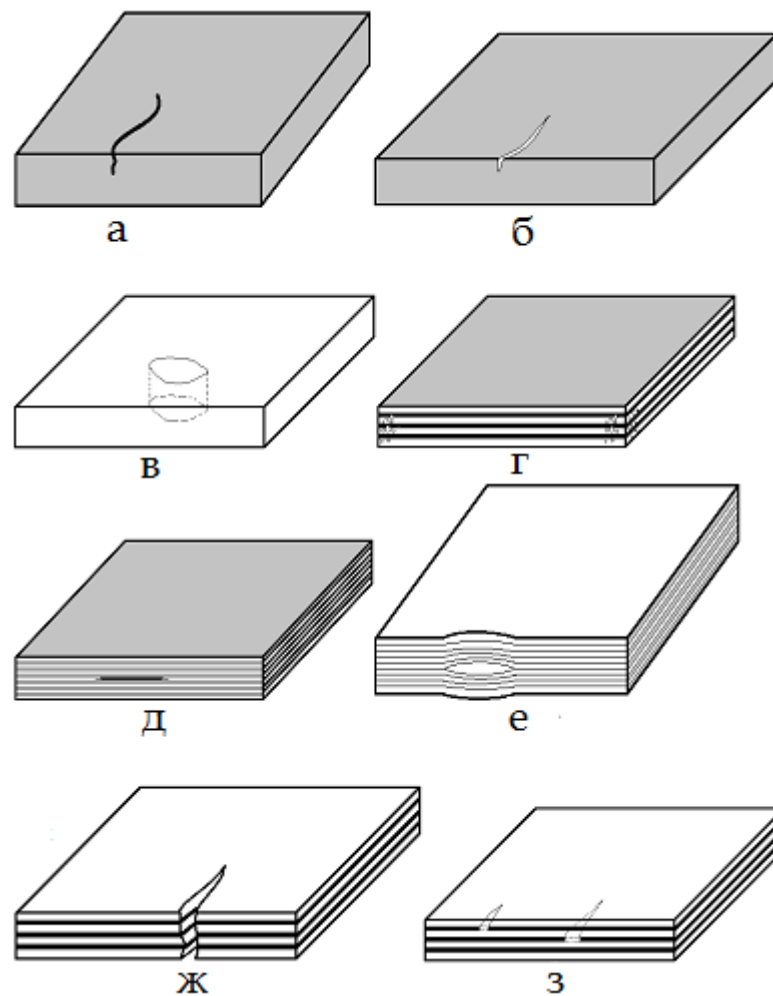
a – требуемая форма; *б* – получившаяся форма.

Рисунок 1.2 - Размерный дефект, выражающийся в увеличении высоты от h_0 до h_i детали в результате коробления.

К нарушениям целостности в стенке детали из ПКМ можно отнести такие внутренние дефекты как расслоения, трещины, поры, «непроклеи», рако-

вины в прослойках матрицы или в клеевом слое, а также наружные дефекты типа сколы, выкрашивания, отслоения [94].

К серьезным нарушениям целостности ПКМ можно отнести разрывы материала или его структурных элементов (волокон и матрицы) и пробоины. Менее серьезными дефектами можно считать царапины, но, учитывая большую чувствительность ПКМ к концентраторам напряжений (см. раздел 2), их устранению также нужно уделять должное внимание. Некоторые из указанных дефектов приведены на рисунке 1.3.



а – поверхностная трещина; *б* – царапина; *в* – пробоина; *г* – поры; *д* – расслоение без раскрытия трещины; *е* – расслоение с раскрытием трещины; *ж* – разрыв материала; *з* – разрыв наполнителя.

Рисунок 1.3 - Несплошности в стенке детали.

Обнаруживаемые после формования детали или после сборки изделия (например, с применением горячего склеивания) размерные дефекты устраняются в процессе отладки технологии формования детали, путем создания симметричной схемы укладки наполнителя, путем выбора способа нагрева места соединения деталей и т.д. Их можно предотвратить более строгим учетом эксплуатационных факторов при проектировании материала детали, созданием учитывающих свойства материала условий хранения деталей (например, труб перед монтажом трубопровода, обшивок перед сборкой панели и т.п.).

Поры возникают в матрице в процессе изготовления ПКМ. Их содержание определяется поверхностным натяжением и вязкостью связующего, а также текстильной формой армирующего материала и условиями его пропитки [89]. В реальных условиях эксплуатации изделий из ПКМ возможно сочетание дефектов: пробоина и расслоение, разрыв и расслоение, вмятина и разрыв и т.д.

К инородным включениям относятся находящиеся в стенке детали тела, иного по сравнению с ПКМ состава. Их появление может быть связано с нарушением технологической дисциплины и с воздействием эксплуатационных факторов, например, чужеродных тел на поверхности детали. Как частично инородное включение, нарушающее однородность структуры ПКМ, можно рассматривать складки наполнителя и нарушения его ориентации по сравнению с заданной схемой (рисунок 1.4).

Отклонения от заданного состава или структуры ПКМ при сохранении монолитности стенки детали могут быть связаны с нарушениями рецептуры материала, с воздействием факторов старения (излучения, нагрев, повышенная влажность и др.). Они, как правило, не являются предметом рассмотрения в проблеме ремонта.

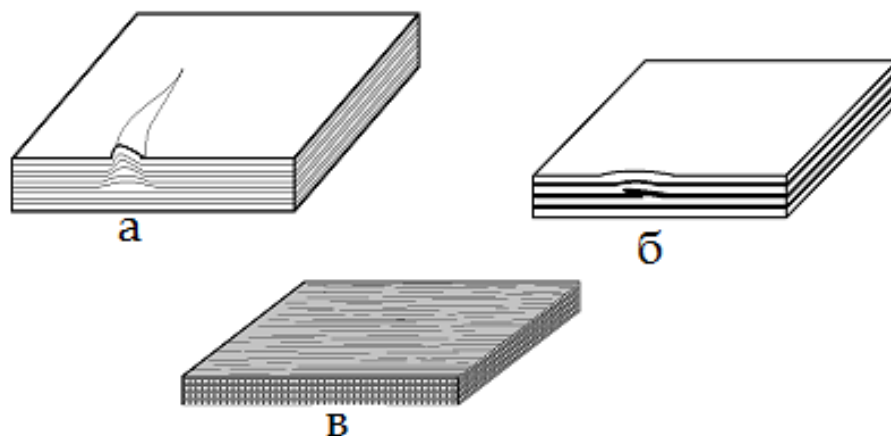
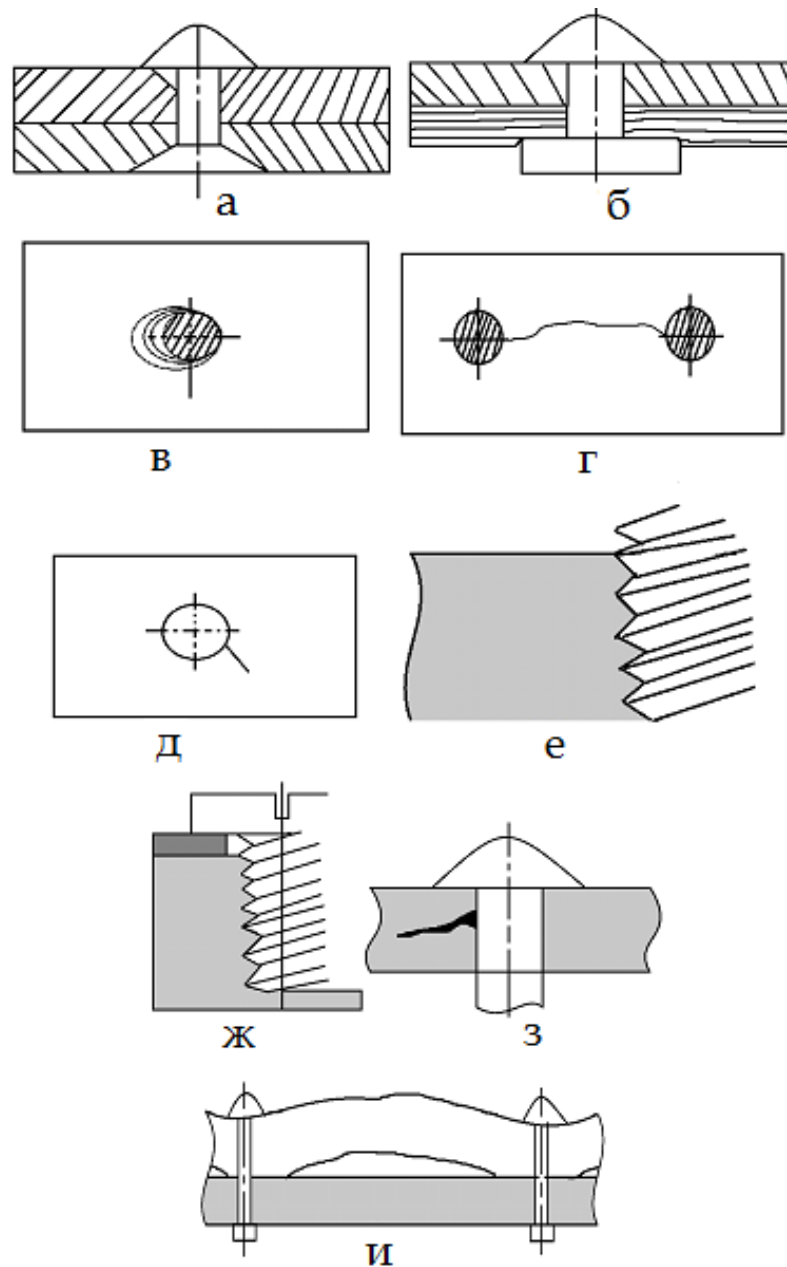


Рисунок 1.4 - Дефекты в виде наружной (а) и внутренней (б) складок наполнителя и нарушения ориентации наполнителя (в).

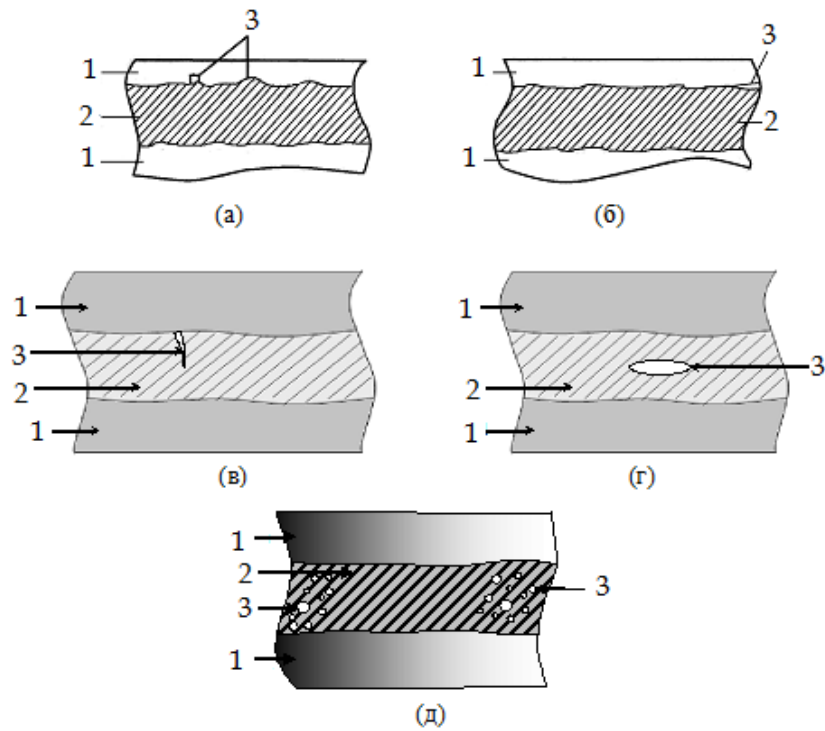
Применительно к изделиям из термопластичных композиционных материалов (ТКМ) в работе [39] выделены два типа повреждений: повреждения матрицы и повреждения волокон. К первым относятся расслоения на границе матрица-волокно, трещины в матрице, расслоения в матрице и др. К повреждениям волокон отнесены как нарушения укладки волокон, так и пробоины в материале.

Работоспособность изделий из ПКМ может быть понижена из-за наличия дефектов в соединениях деталей [40] (рисунки 1.5-1.7). Разновидностей дефектов в сварных соединениях ПКМ меньше, чем в сварных соединениях ненаполненных термопластов. Наиболее вероятными в сварных соединениях ТКМ могут быть следующие дефекты: нарушение ориентации наполнителя [41,42], разрывы наполнителя [41], расслоения [43], пустоты и поры на границе свариваемых поверхностей, инородные включения [44]. Эти дефекты характерны также для других способов адгезионных соединений (рисунок 1.6) или для стенки деталей (рисунок 1.4).



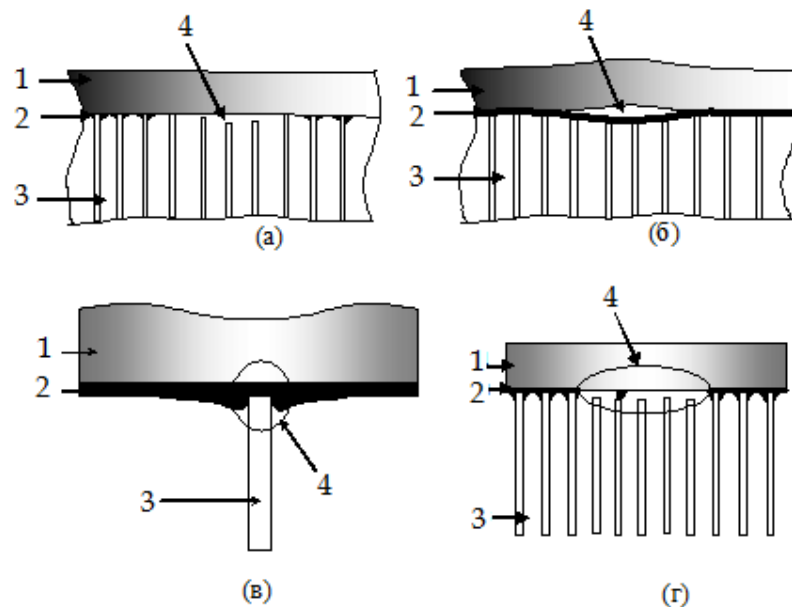
a – скол ПКМ под головкой; *б* – смятие ПКМ головкой; *в* – смятие стержнем ПКМ в зоне отверстия; *г* – трещина между отверстиями; *д* – трещина в зоне отверстия; *е* – сколы витков резьбы; *ж* – срез витка резьбы в резьбовом отверстии; *з* – расслоение в зоне отверстия; *и* – выпучивание.

Рисунок 1.5 - Дефекты в соединениях, выполненных механическим креплением.



a – неполное смачивание; *б* – расслоение; *в* – трещина в клеевом слое; *г* – пустота; *д* – поры. 1 – соединяемые детали; 2 – клеевой слой; 3 – дефект.

Рисунок 1.6 - Дефекты клеевого соединения.



a – между клеевым слоем и наполнителем; *б* – расслоение; *в* – неправильной формы галтель клея; *г* – разрыв в клеевом слое.
1 – обшивка; 2 – клеевой слой; 3 – сотовый наполнитель; 4 – дефект.

Рисунок 1.7 - Дефекты в клеевых сотовых панелях.

В гибридных трехслойных конструкциях, состоящих из композитной обшивки и сотового заполнителя, дефектом может быть нарушение целостности заполнителя на основе алюминиевой фольги в результате его коррозии [112].

Вид дефекта влияет на оценку работоспособности изделия и выбор способа ремонта.

1.3 Проблемы ремонта деталей и изделий из полимерных композиционных материалов

Разработка способа ремонта означает определение геометрических параметров ремонтируемого участка, выбор ремонтных материалов и метода сочетания (соединения) ремонтного материала и ремонтируемой детали с учетом вида дефекта, материала детали или материалов, входящих в соединение, и заданных условий проведения ремонтных работ.

Когда появилась необходимость выбора способов ремонта деталей из ПКМ, естественным было обратиться к опыту, накопленному при ремонте металлических конструкций с помощью полимерных ремонтных материалов, и к опыту ремонта деталей из ПМ.

Одним из основных требований к выбираемому способу ремонта деталей практически из любого конструкционного материала является возможность восстановления целостности и работоспособности конструкции при минимальных временных, материальных и трудовых затратах. Учитывая это, можно сформулировать отдельные критерии, на которые ориентируются, выбирая конкретный способ ремонта:

- возможность восстановления исходных механических и других эксплуатационных свойств материала детали;
- технологическая простота и доступность способа ремонта в заданных условиях;

- возможность выполнения ремонта персоналом, не обладающим специальной профессиональной подготовкой;

На выбор способа ремонта, удовлетворяющего первому критерию, решающее влияние оказывает структура и состав ПКМ, а также тип дефекта, его размер и действующая в зоне дефекта нагрузка, т.е. насколько ответственным является ремонтируемый участок.

Второй и третий критерии появились из-за необходимости выполнения ремонта не только в условиях предприятия, но и в полевых условиях.

Невозможно предложить универсальный способ ремонта. Бóльшую универсальность демонстрируют ремонтные материалы.

1.3.1 Ремонтные материалы

Общие требования к ремонтным ПМ (преимущественно на основе эпоксидных и реже полиэфирных смол) и к условиям “полимерного” ремонта были сформулированы еще в рамках направления “Технология склеивания, литья смол и ламинирования” [5]. Там же были отобраны наиболее эффективные технологии, получены сведения о работоспособности восстановленных изделий.

Ремонтными ПМ, выбираемыми в зависимости от вида дефекта, служили:

- заливочные и пропиточные компаунды (устранение микро-и макропор, рисок) [2];

- мастики (устранение усадочных раковин, трещин, полостей, вздутий) [3,7,8,10];

- клеи (устранение пробоин, сколов, присоединение накладок на изношенные части) [2,7,8,11],

а затем в начале 80-х годов:

- напыляемые порошки на основе эпоксидных смол или полиамида (восстановление трущихся поверхностей подшипников скольжения)[4,9];

- препреги [3,4,6].

Для ремонта ПКМ используют главным образом ПМ, в том числе ПКМ. Принципиально нового в технологии ремонта с использованием ремонтных ПМ по сравнению с 80-ми годами ничего не появилось. Чаще стали фигурировать углепластики и не только при ремонте деталей из ПКМ [50,95-97], материалы, наполненные наноматериалами. Совершенствовались отдельные характеристики ремонтных ПМ и их технологические свойства.

Применение металлических накладок в качестве ремонтных материалов для компенсации ослабления отверстием стеклопластика на заре внедрения ПКМ в машиностроение не увенчалось успехом (таблица 1.2, опыт № 2) [45]. Причинами неудачи здесь могут быть не только различие в жесткости материалов образца с дефектом и накладки, на что указывают автор работы [45] и его последователи [46,47], но и механическое крепление последней с ПКМ. Применение этого варианта по отношению к углепластику привело к получению таких же низких результатов (относительная прочность 50 %) [48]. Замена механического крепления накладки из стеклопластика на адгезионное соединение повышает прочность дефектной детали (таблица 1.2., опыт № 4). На то, что не только различия в жесткости материалов накладки и ремонтируемой детали, но и способ их соединения влияют на эффективность ремонта, указывают данные работ [49,50]. В этих работах для повышения прочности листов из Al –сплава, содержащих усталостные трещины, приклеивали накладки из слоистых композиционных материалов типа Al-сталь, Al-B и Mg-B [49] и углепластика [50]. Повышение жесткости накладки из углепластика за счет регулирования схемы армирования приводит к снижению скорости роста трещины в ремонтируемой пластине.

С этим выводом согласуются данные о том, что максимальное снижение концентрации напряжений в зоне трещины с приклеенной накладкой из ПКМ имеет место, если волокна в последней ориентированы вдоль направления нагружения дефектной детали [100], а также данные о связи прочности при сдвиге клеевых соединений ПКМ с их жесткостью [51, с. 511]. Увеличение ресурса работ элементов, содержащих усталостные трещины, добились

при сочетании клевого соединения с накладками из жесткого боропластика [17].

Таблица 1.2

Влияние метода усиления зоны отверстия на относительную прочность ν при сдвиге образцов из полиэфирного стеклопластика на основе стеклянной ткани марки 181.

№№ п/п	Форма и размеры образцов	Метод соединения наклейки со стеклопластиком	ν , %
1		-	41,5
2		8 болтами	50
3		Заклепками и клеем	40,5
4		Приформовкой	61,5

При выборе материала наклейки, присоединяемой с помощью заклепок или болтов, необходимо учитывать все факторы, влияющие на прочность механического крепления: деформационные характеристики матрицы в ПКМ, тип армирующего наполнителя, толщину наклейки, диаметр отверстия для крепежного элемента, параметры шва и др. [46;51, с. 215]. Материал наклад-

ки должен обладать высокой прочностью не только при растяжении, но и при смятии. Значения последней у слоистых ПКМ с одинаковым типом наполнителя возрастают при замене полиэфирной матрицы на эпоксидную, при выполнении отверждения связующего при повышенной температуре., при использовании в ПКМ стеклоткани с изотропными свойствами вдоль основы и вдоль утка, при введении в ПКМ накладки слоев из металлической фольги.

Первые ремонтные полимерные материалы для ПКМ были заимствованы из области ремонта металлических изделий, а дальнейшее их развитие шло параллельно с совершенствованием сборки изделий из ПКМ. Основными ремонтными материалами при выполнении ремонта с помощью склеивания и приформовки служат:

- клеи преимущественно на основе эпоксидных [8,10,11,28,29,50,52,53,92] и реже полиэфирных [8,52] смол, на основе акрилатов, в том числе анаэробные [91], на основе изоцианатов и других соединений, в том числе вспенивающиеся клеи, возможно в сочетании с грунтами;

- волокнистые армирующие наполнители в виде стеклянных, органических или углеродных тканей, лент или матов;

- эпоксидные, полиэфирные, акрилатные и другие связующие для пропитки волокнистых наполнителей;

- готовые препреги (вместо отдельно взятых и сочетаемых во время ремонта наполнителей и связующих);

- отформованные из ПКМ вставки;

- компаунды и мастики.

Сложные задачи по ремонту действующих паро-, газо- и водопроводов способны решать с помощью герметизирующих композиций семейств Унигерм и Унирем, разработанных ФГУП «НИИ полимеров» [98]. Композиция Унигерм-100 быстро отверждается при соприкосновении с горячим паром в местах течи на паропроводах. Полученное уплотнение работоспособно при температурах 90-250°С и давлении пара до 20 атм. После ликвидации свищей, каверн, раковин и других повреждений объектов газовой промышлен-

ности композицией Унигерм-101 работоспособность указанных объектов обеспечивается при давлении до 75 атм. Композиции Унирем-60 и Унирем-80 пригодны для ремонта водопроводов с холодной и горячей (80-90°С) водой и технологического оборудования с дефектами типа трещины, износы, срыв резьбы и т.д.

Потребители ремонтных материалов всегда мечтали о самозалечивающихся ремонтных материалах. Исследователи из института Fraunhofer IPA (Германия) создали покрытия, которые благодаря введению в их состав нанокапсул могут сами устранять возникающие на поверхности царапины [99]. Заполненные жидким связующим шарики лопаются в месте повреждения, связующее вытекает и ликвидирует царапину.

При выполнении ремонта ТКМ с помощью сварки используют присадочные материалы и привариваемые накладки. При механическом закреплении накладки на ремонтируемом изделии требуется выбрать крепежные элементы .

Требования, предъявляемые к ПМ для адгезионных методов ремонта, в значительной мере могут быть распространены на клеи и приформовочные массы, предназначенные для сборки изделий, и наоборот:

- отверждение по возможности без применения дополнительного нагрева;
- длительная сохранность адгезионных свойств (при нормальной температуре не менее одного года [54,55], при 50°С не менее шести недель [56]);
- высокая скорость отверждения;
- отсутствие потребности в сложной подготовке поверхности ремонтируемой детали;
- низкая вязкость;
- малая чувствительность к нарушениям технологии приготовления и переработки;
- низкая стоимость;
- совместимость с ремонтируемым ПКМ;

- возможность применения дополнительной термообработки для повышения характеристик соединения.

Чтобы удовлетворить этим требованиям, не всегда необходимо создавать новые клеи, а можно воспользоваться выбором среди большого числа клеев, сведения о которых имеются в литературе [57-61] и в электронных банках данных [62-65], в том числе клеев, созданных для ремонта [54,56,66]. Требования могут быть уточнены или изменены в зависимости от вида дефекта, конструкторских параметров ремонтируемой зоны, условий проведения ремонта, и тогда, вероятно, необходимо будет находить или создавать специальный клей (для соединения, например, по увлажненной поверхности или под водой, при температуре, ниже комнатной, и т.п.). Созданию новых ремонтных клеев может способствовать развитие научного направления наномодифицирования основы известных клеев [101].

Подходящий для ремонта деталей из ПКМ полимерный ремонтный материал можно выбрать из большого числа рекламных проспектов, распространяемых работающими на российском рынке фирмами, как российскими, так и зарубежными. Принципы рецептур этих ремонтных материалов ничего нового по сравнению с давно известными не представляют. В их основе лежат эпоксидные, полиуретановые или акрилатные связующие, наполненные порошками или волокнистыми материалами. НПО «Стеклопластик» выпускает ленту «ГАРС» на основе стекловолокнистого наполнителя для ремонта трубопроводов. Также для ремонта трубопроводов выпускает эпоксидные компаунды семейств «ЭТАЛ» и «СМЭЛ» ЗАО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ». Для склеивания трудносмачиваемых поверхностей термопластов и ПКМ, а также для ликвидации трещин фирма Devcon через ЗАО «Адгезив-Про» предлагает эффективные и удобные в работе композиции Composite Welder и Metal Welder на основе метакрилатов, не требующие тщательной подготовки поверхностей и показывающие высокие скорости схватывания.

Скоростного соединения достигают введением в состав клея ускорителя отверждения [8,67] или с помощью реактивных клеев, у которых компо-

нент с отвердителем наносится на одну из поверхностей (например, на поверхность детали), а компонент с ускорителем отверждения - на другую (например, на поверхность наклейки) [68].

Длительной сохранности готового к употреблению клея способствуют:

- микрокапсулирование находящегося в его составе отвердителя;
- хранение клея перед переработкой в специальных тубах [69];
- использование для отверждения клея фотоинициатора [70] или вещества, реагирующего со смолой при повышенной температуре [71].

Клей под маркой НХ 1567 с отвердителем, реагирующим при температуре $> 32^{\circ}\text{C}$ и не оказывающим раздражающего действия на кожу, создала фирма Нехсел (США) [54]. При нормальной температуре клей хранится один год. Фирма Bostic разработала двухупаковочный клей марки 7575 В/А, который через полчаса отверждения при нормальной температуре имеет отличные механические свойства. Двухупаковочный акрилатный клей той же фирмы через пять минут отверждения достигает 50%-ного уровня своих физических свойств и имеет хорошую адгезию к таким химически инертным термопластам как полиамидоимид и полифениленсульфид [66]. Для отверждения эпоксидных клеев при пониженных температурах применяют комплексы ВФз, ускорители типа трифенилфосфита и др. [67]. Упрощают технологию ремонта клеи, которые способны сцепляться с замасленной [72] или увлажненной поверхностями [73]. Для склеивания во влажной среде в Российской практике используют отвердитель эпоксидной смолы типа УП-5-177, продукт взаимодействия фенола, формальдегида и этиламина марки АФ-2. Из различных клеев в Российской технологии ремонта чаще других применяют пастообразные эпоксидные клеи марок ВК 9, ВК 27, К 153, вспенивающийся клей ВКВ 9, пленочный клей ВК 41, созданные прежде всего для процессов сборки.

Лучшими клеящими материалами следует признать препреги. Идея варианта технологии А+Б, характеризующейся длительной сохранностью («жизнеспособностью») реализована при разработке препрега на основе

стеклоткани и акрилата [55]. Препрег хранится в пленочной герметичной упаковке. Перед наложением на ремонтируемый участок детали поверхность препрега активируется катализатором. После прикатки препрега и снятия пленки катализатор наносится на внешнюю его поверхность. Отверждение заканчивается в течение 15 минут. Достоинствами акрилатных клеев является менее строгое требование к чистоте поверхности и меньшая чувствительность к соотношению полимер/отвердитель. Созданный для ремонта препрег на основе фенольной смолы при -18°C хранится один год [38].

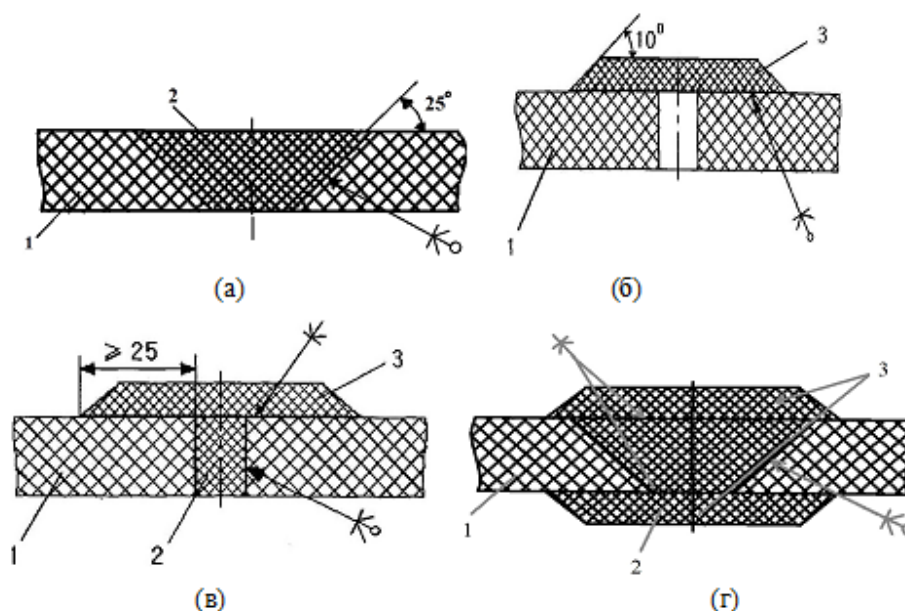
Природа армирующих наполнителей в приформовочной массе, а также состав и структура ПКМ отформованной вставки или накладки должны быть одинаковыми или совместимыми с ремонтируемым ПКМ.

Получению положительных результатов по ремонту с применением адгезионных соединений может способствовать и правильный выбор вспомогательных, или технологических материалов. Это подтверждают некоторые публикации о разработках новейших растворителей [102]. Компания Dr. O.K. Wack Chemie и фирма Zestron VD (Германия) совместно разработали очищающее средство, которое благодаря своей способности проникать в тонкие зазоры и щели позволяет производить очистку деталей, имеющих глубокие отверстия, резьбу или капилляры, что нередко встречается при решении ремонтных задач на изделиях из ПКМ с загрязненными поверхностями. Средство быстро сохнет, не оставляя на поверхности осадка. Так как с помощью этого очищающего средства достигаются заметно более высокие значения поверхностного натяжения, оно особенно может быть рекомендовано к использованию в процессах тонкой очистки, где встречаются детали со сложной геометрией и предъявляются высокие требования по чистоте поверхности.

Правильный выбор ремонтного материала еще не решает всех проблем восстановления работоспособности изделия. Важную роль играет выбор геометрических параметров и структуры ремонтной зоны.

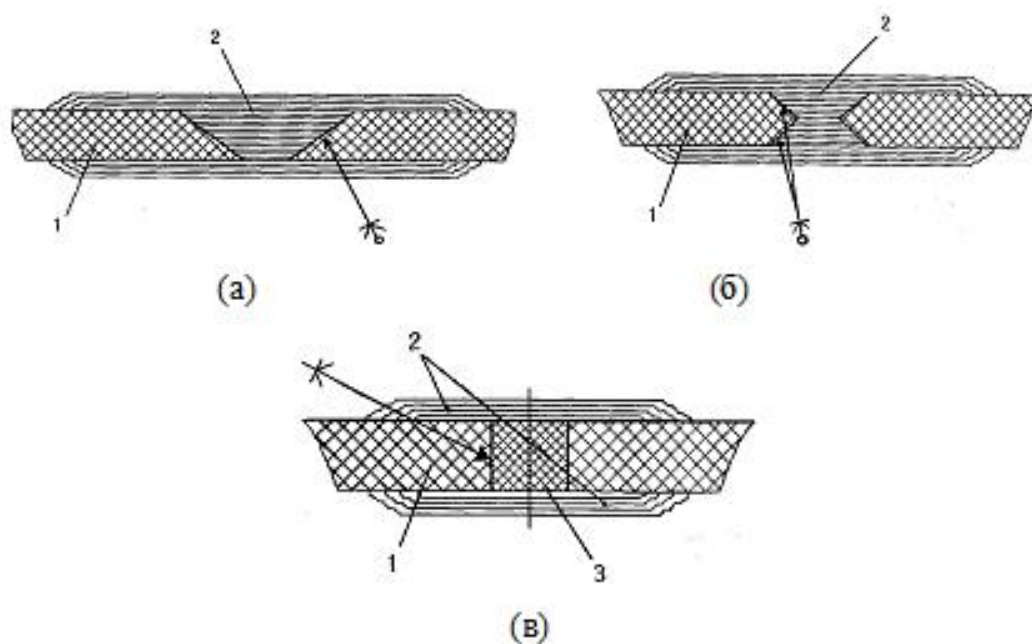
1.3.2 Геометрические параметры и структура ремонтной зоны

Наибольшую сложность и наибольшую значимость представляет устранение сквозного дефекта в стенке из ПКМ (см. рисунок 1.3, *в, ж*). Выбранное для устранения этого дефекта конструкторское решение пришло из ремонта металлических изделий и является вполне очевидным: это введение вставки в отверстие и/или присоединение компенсирующей дефект накладки. Учитывая специфику работы под нагрузкой клеевых и формованных соединений [51, с.511, 543], накладки, вставки и отверстие целесообразно скашивать (рисунки 1.8 и 1.9).



а – введение конической вставки; *б* – одностороннее присоединение накладки; *в* – введение вставки и одностороннее присоединение накладки; *г* – введение конической вставки и двухстороннее присоединение накладок.
1 – деталь из ПКМ; 2 – вставка; 3 – накладка; *К* – клеевой слой.

Рисунок 1.8 - Схемы поврежденных участков, подвергнутых ремонту с применением склеивания.



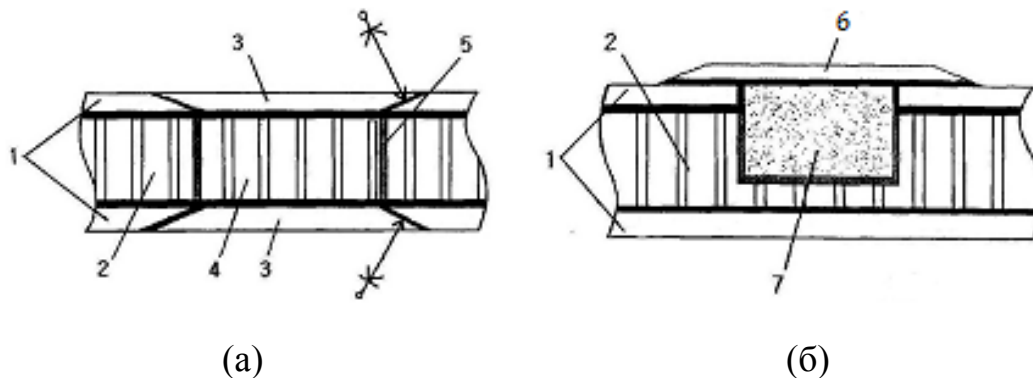
a – V-образная разделка кромки пробоины; *б* – X-образная разделка кромки.
 1 – деталь из ПКМ; 2 – накладки; 3 – вставка; К – клеевой слой.

Рисунок 1.9 - Схемы поврежденных участков, подвергнутых ремонту методом приформовки накладок из препрега (*a, б*) и комбинированием склеивания и приформовки (*в*).

Вариантам согласно схемам рисунка 1.8., *б* и *г* отдают предпочтение при толщине обшивок < 1 мм. Чем меньше угол скашивания, тем выше прочность адгезионного соединения [53]. Применительно к ремонту рекомендуют скос выполнять под углом $4-6^\circ$ [74, с.67] и даже $2,5^\circ$ [75], не указывая, как реализовать эту рекомендацию, например, в части скашивания края детали вокруг отверстия. Вставку для заполнения отверстия, вокруг которого скашивание было выполнено под такими углами, выполняя требование низкой себестоимости, можно изготовить, вероятно, только методом формования. Тем не менее, по данным авиационной фирмы имени С.В. Ильюшина [33], скашивание под столь малыми углами можно выполнять методом резания, очевидно, благодаря разработанной там оснастке. От скашивания можно отказаться, если дефект представляет собой мало раскрытую сквозную трещину. В этом случае по концам трещины сверлят отверстия диаметром около 4 мм, и поверхность подготавливают для приклеивания накладок.

Ориентация слоев препрега в формованном соединении (рисунок 1.9.) должна соответствовать ориентации наполнителя в стенке детали. Если принимать во внимание данные по соединению методом приформовки углепластиков по схеме встык с накладками [76], то число слоев препрега на основе углеродных лент и эпоксидного связующего комнатного отверждения в накладке со схемой армирования $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ не должно быть меньше числа слоев в детали. В случае протяженной сквозной трещины или такого же разрыва обработку дефектной зоны можно производить по форме желоба.

Пробоины в трехслойной сотовой конструкции устраняют, ремонтируя обшивку в соответствии со схемами рисунка 1.8. или рисунка 1.9. и восстанавливая наполнитель. Если диаметр пробоины < 30 мм, то полость между накладками можно заполнить вспенивающимся ПМ, например, клеем. При большей пробоине устанавливают вкладыш из сотового наполнителя (рисунок 1.10, а.), нанося вокруг него вспенивающийся клей.



а – панель с пробойной; б – панель с односторонним дефектом.
 1 – обшивка; 2 – сотовый наполнитель; 3 – вставка из ПКМ; 4 – сотовая вставка; 5 – вспененный клеевой слой; 6 – накладка из ПКМ; 7 – пенопласт.

Рисунок 1.10 - Схемы участков трехслойных сотовых панелей, подвергнутых ремонту.

Геометрические параметры ремонтируемого участка детали, а вместе с ними и метод соединения определяют технологию ремонта.

1.3.3 Технология ремонта

Из методов соединения при выполнении ремонта чаще всего применяют механическое крепление, клеевые соединения и формованные соединения.

Наиболее простой способ выполнения *механического крепления* накладки из ремонтного материала к дефектной детали включает в себя: доработку пробоины с целью устранения концентраторов напряжений, обусловленных геометрическими нерегулярностями в этой области, образование отверстий для крепежных элементов и установку последних. При этом возникают следующие проблемы:

- исключение дальнейшего повреждения ПКМ при получении отверстий и доработке дефекта;
- подгонка накладки и ремонтируемой детали;
- выбор учитывающего специфику ПКМ крепежного элемента;
- обеспечение установки крепежного элемента по возможности при одностороннем доступе к ремонтируемой зоне.

Все эти проблемы легче решать в условиях ремонтного предприятия и опираясь на опыт механического крепления при сборке изделий из ПКМ [51, с. 119--323].

Склеивание и приформовка при ремонте пробоин в деталях из ПКМ на основе реактопластов нашли более широкое применение, чем механическое крепление. Ремонт с применением этих способов наряду с традиционными для клеевой сборки изделий из ПКМ проблемами [77] ставит новые:

- снижение влияния факторов окружающей среды на сохранность клеев и препрегов и на формирование клеевого соединения;
- реализация параметров технологического процесса в условиях с ограниченными возможностями технического оснащения;
- выполнение соединения недостаточно профессионально подготовленными специалистами.

Видимо, сложность решения этих и других проблем в боевых условиях заставило фирму Mc Donnell Douglas Astronautics Co (США) отказаться от склеивания при ремонте повреждений в изделиях из ПКМ [75].

Хотя и созданы клеи, способные соединять увлажненные поверхности, влага на соединяемые поверхности не должна попадать или должна быть с них удалена. Для этого в полевых условиях создаются укрытия над ремонтируемым агрегатом. Выделение воды из увлажненного ПКМ во время склеивания приводит к пористости на границе клеевой слой/ПКМ [78]. Имеются также данные о каталитическом действии воды на процесс отверждения эпоксидного клея, следствием чего является охрупчивание и снижение прочности клеевого слоя [79]. Наиболее часто в ремонтных работах склеиваемую поверхность ПКМ с удаленным покрытием подготавливают путем ручного шлифования наждачным полотном с последующей очисткой растворителем. Весьма трудоемкой операцией является подгонка конической вставки или шарового сегмента к обработанной поверхности дефектного участка. Большое внимание механизации этой операции уделяют как ремонтные предприятия, так и авиационные фирмы. Приспособления для скашивания края детали вокруг отверстия разработали фирма Boeing [80], а в России фирма имени С.В. Ильюшина [33] и другие предприятия. Тонкие накладки могут быть изготовлены резанием из листового ПКМ. Подготовку соединяемых поверхностей вставок и накладок из ПКМ на основе реактопластов к склеиванию упрощает их формование вместе удаляемым (так называемым в российской литературе «жертвенным») непосредственно перед нанесением клея слоем ткани [77].

Развитие плазменной обработки в технологии изделий из ПМ [103] привело к появлению разработок, представляющих интерес для выполнения ремонта с использованием адгезионных соединений. Швейцарская фирма Bobst и германская фирма Plasmatreteat создали технологию обработки плазмой атмосферного давления под названием «Openair» [104]. Привлекательность обработки методом «Openair» видится в том, что можно использовать

стандартные клеи вместо специальных клеев и снижение их расхода. Результатом исследования, проведенного в Институте по исследованию плазмы и технологии им. Лейбница (INP) (Германия) явилось создание устройства в виде ручки для струйной обработки поверхности при нормальном давлении [105]. Длина струи плазмы варьируется от нескольких мм. Вместе с плазмой можно создавать УФ-излучение и подавать химически активные вещества, что открывает, на наш взгляд, новые возможности не только в обработке поверхностей, но и в регулировании процесса отверждения клеев. С помощью этого устройства можно обрабатывать малоразмерные 2D- и 3D-поверхности, а также щели и капилляры, очищая их и повышая адгезию клеев. Как показано в исследованиях указанного института, микроразмерные волокна с нанесенными с помощью плазмы покрытиями позволяют создать ПКМ с высокими прочностью и термостойкостью, что может быть привлекательно для армирования этими волокнами ремонтных материалов.

Труднее реализуемые в условиях эксплуатации изделий современные технологии подготовки поверхностей ремонтируемых деталей из ТКМ [77] делает актуальной применение для устранения дефектов в них альтернативного склеиванию способа образования адгезионного соединения, каким является сварка в расплаве.

Проблемой при использовании склеивания при выполнении ремонтных работ является большая продолжительность отверждения преимущественно используемых в этих работах реактивных клеев [106]. Достичь сокращения продолжительности отверждения эпоксидных клеев можно введением в него ускорителя отверждения [67] или путем повышения температуры отверждения [81]. Однако в первом случае снижается сохранность клеа. Усложняется проблема согласования продолжительности $t_{ов}$ открытой выдержки и продолжительности $t_{ос}$ образования клеевого соединения [107]. Соотношение $t_{ов}/t_{ос}$ равно приблизительно трем. Поскольку начальная прочность клеевых соединений реактивными клеями невелика, для фиксирования накладки на ремонтируемой поверхности требовалось применять механическое крепле-

ние, которое характеризуется рядом недостатков, особенно в случае ремонта элементов конструкции из волокнистых ПКМ [106].

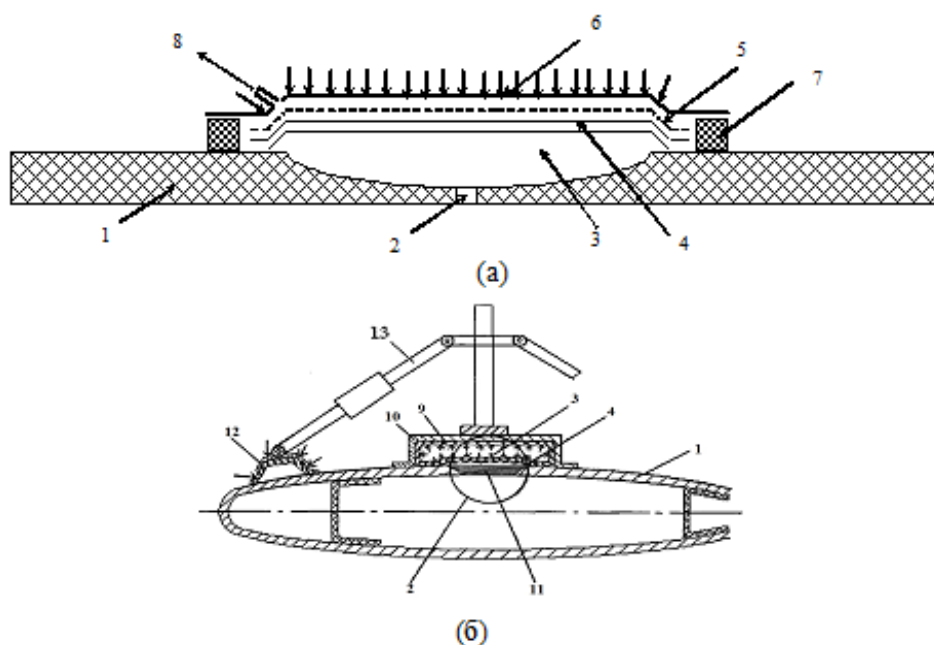
Во втором случае (при горячем отверждении) нужно обеспечить возможность быстрого подведения теплоты к клеевому слою. Созданная для ремонтных работ фирмой 3M Company (Minnesota, США) одноупаковочная клеящая система марки PR-377 при 27°C хранится один год, а при 149°C может быть отверждена за пять минут [82]. Нанесение клея на подложку, нагреваемую пропусканием тока, дает возможность исключить из цикла формирования клеевого слоя время, необходимое на нагрев клея до заданной температуры. Однако таким клеящим препрегом удобно пользоваться для ликвидации протяженного дефекта, для которого требуется накладка прямоугольной в плане формы. Ускорить, по крайней мере, монтаж готовой накладки из ПКМ на ремонтируемой поверхности позволяет применение ультразвука [83]. Для защиты поверхности накладки от внедрения УЗ - инструмента можно использовать полимерную пленку. Однако УЗ - энергию нельзя подвести через вакуумный мешок, а из-за малой площади рабочей поверхности УЗ - инструмента этот метод непригоден для ремонта с помощью накладок по большим поверхностям [84].

Значительно сокращает продолжительность склеивания индукционный нагрев клея, нанесенного на тонкую стальную сетку [66, 84]. Электромагнитное поле может проникать через вакуумный мешок для прямого нагрева самой накладки из углепластика [85]. В работе [106] представлена разработанная в Техническом университете г. Брауншвейг (Германия) технология скоростного отверждения клея путем его прямого нагрева в электромагнитном поле благодаря наполнению наноферритом, которая, по мнению авторов, обладает высоким потенциалом в части сокращения его продолжительности.

Новое направление в скоростном отверждении клеев, которое представляет интерес и для ремонтных технологий, создано благодаря исследованиям фирмы Wellmann Technologies GmbH (Германия), [108]. Для решения проблемы скоростного отверждения там использован принцип гибридизации

(сочетания) клеев, отверждаемых под влиянием УФ-излучения: акрилатов и метакрилатов, сочетаемых с силиконами, полиуретанами, эпоксидами и каучуками, и эпоксидов, сочетаемых с силиконами, акрилатами и каучуками. Для эффективной реализации УФ-отверждения клеев созданы высокоэффективные компактные и небольшой массы излучатели, например, при площади облучения $765 \times 20 \text{ мм}^2$ создающие интенсивность 4 Вт/см^2 .

Давление прижима накладки или вставки к ремонтируемой детали можно создать с помощью мешков с песком, с помощью грузов, фиксируемых липкими лентами или эластичными ремнями, с помощью вакуумных мешков или пневматических камер. Вакуумный мешок можно крепить на снятой с изделия детали или непосредственно на ремонтируемом агрегате с помощью липкого жгута (рисунок 1.11, а), а содержащие пневматические камеры приспособления закрепляются с помощью присосок (рисунок 1.11, б).



1 – ремонтируемая деталь; 2 – зона дефекта; 3 – накладка из ПКМ; 4 – антиадгезионный слой; 5 – дренажный слой; 6 – мембрана; 7 – уплотнительный жгут; 8 – присоединение к вакуум-насосу; 9 – эластичная камера; 10 – жесткий колпак; 11 – вставка из ПКМ; 12 – присоска; 13 – каркас приспособления.

Рисунок 1.11 - Схемы приформовки накладки вакуумным методом (а) и склеивания вставки и накладки с обшивкой пресскамерным методом (б).

Размер и количество присосок рассчитывают из условия исключить отрыв оснастки от ремонтируемого участка. В приспособлении, созданном на фирме имени С.В. Ильюшина [33], восемь присосок уравнивают усилие 8 кН. Шарнирные соединения в конструкции каркаса приспособления и ограничивающего пневматическую камеру жесткого колпака позволяют выполнять ремонт криволинейных изделий. При использовании препрегов или клеев горячего отверждения или в случае необходимости ускорить процесс ремонта под дренажным слоем можно разместить гибкий листовой нагреватель.

Материал мембраны и герметизирующего жгута выбирают с учетом режимов склеивания или приформовки (таблица 1.3).

Таблица 1.3

Допустимые режимы соединения при использовании различных технологических материалов.

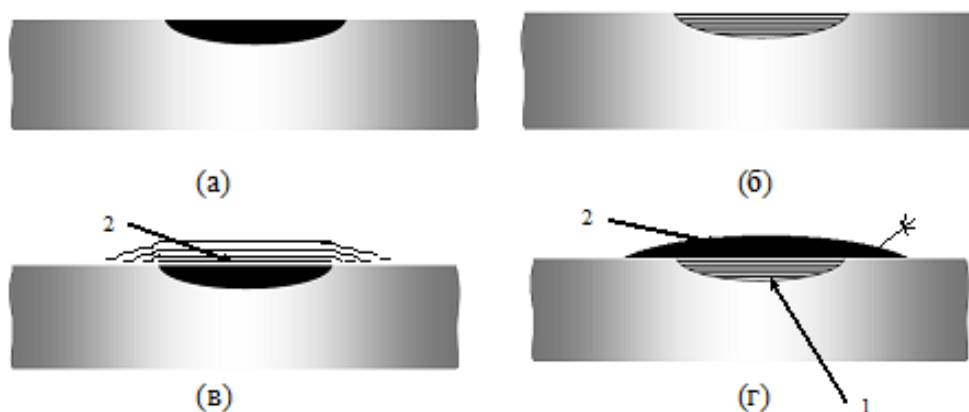
Режим соединения		Материалы	
Температура, °С	Время, ч	Мембрана	Герметизирующий жгут
20	*	Прорезиненная ткань	Герлен 12
120	10	Полиамидная пленка ПК-4	Герлен 12
180	4	Пленка ППН-Т	Герметик 51-Г-27
250	10	Полиимидная пленка ПМ-А	Герметик 14 Т-81

* Многократно

Дефекты типа царапин и сквозных трещин (см. рисунок 1.3., а, б) предварительно обрабатываются наждачной бумагой с целью создания плавного перехода от поврежденного участка к основному материалу. Затем выравнивание обработанной зоны производят с помощью компаундов, формованной вставки (по слою клея) или препрегов (рисунок 1.12, а, б). При боль-

шой глубине царапины может потребоваться присоединение дополнительных накладок (рисунок 1.12, в, з).

Расслоения в обшивке (см. рисунок 1.3, д, е) и отслоения обшивки от сотового заполнителя (см. рисунок 1.7, б) устраняют шприцеванием между раскрывшимися поверхностями жидкого клея и последующего его отверждения. При расположении дефекта с края обшивки или панели можно применить пленочный клей.



1 – вставка; 2 – накладка; К – клеевой слой.

Рисунок 1.12 - Схемы участков деталей с царапиной, подвергнутых ремонту с применением нанесения компаунда (а), приформовки вставки (б), нанесения компаунда и приформовки накладки (в) и приформовки вставки и приклеивания накладки (з).

Шприцевание осуществляют в отверстия небольшого диаметра, просверленные по контуру дефекта с шагом около 20 мм. Чтобы ограничить количество клея, вводимого в трехслойную сотовую панель, последнюю во время шприцевания необходимо располагать дефектной зоной вниз, а отверстия закрывают липкой лентой. После достижения клеевым слоем так называемой “ручной прочности” в отверстия вводят крепежные элементы с увеличенными размерами головок и с нанесенным на резьбу клеем.

Если расслоение сопровождалось выпучиванием обшивки, то давление прижима на нее нужно создавать таким образом, чтобы исключить дальней-

шее распространение трещины вдоль клеевого шва. Дефект типа расслоение может быть компенсирован приклеиванием наклейки на дефектный участок.

Если дефект типа “инородное включение” приводит к разрывам материала, расслоению и т.п., то ремонт представляет собой удаление включения из стенки детали или из зоны контакта соединяемых поверхностей и последующее «залечивание» образовавшихся нарушений целостности.

Если ремонт трехслойной сотовой конструкции представляет собой замену подвергнутого коррозии алюминиевого сотового заполнителя на новый заполнитель [113], то этот процесс будет отличаться от клеевой сборки только подготовкой склеиваемых поверхностей, заключающейся в очистке повторно используемой углепластиковой обшивки от остатков сотового заполнителя и сохранившегося клеевого слоя.

Размерные дефекты у деталей из ТКМ могут быть устранены методом вторичного формования, подобно тому, как это выполняют в технологии изделий из термопластов.

Из повреждений в зоне механического крепления наиболее опасным является трещина между отверстиями в обшивке или в элементе жесткости (рисунок 1.5., *г*). Компенсировать влияние трещины можно приклеиванием наклейки на дефектный участок и выполнением повторного механического крепления в зоне последнего. Чтобы не ухудшать аэродинамические свойства агрегата, наклейку размещают с внутренней стороны обшивки.

Дефекты в виде сколов (рисунок 1.5., *а*) и смятого материала (рисунок 1.5., *в*) в зоне отверстия устраняют сверлением отверстия большего диаметра иногда с предварительным заполнением дефектного участка компаундом и введением крепежного элемента большего диаметра. Если допустимо присутствие металла в детали из ПКМ, то ремонт поврежденной или изношенной резьбы (рисунок 1.5., *е, ж*) можно выполнять с помощью спиральной упругой вставки [43, с.99].

Плавокость матрицы в ТКМ позволяет ремонтировать изделия из них с использованием сварки [39]. Хотя сварка относительно давно известна в ре-

монте изделий из неармированных термопластов [85-87], интерес к ней возрос в связи с расширением применения новых видов ТКМ. Основными достоинствами ремонтной сварки перед другими технологиями ремонта являются:

- идентичность свойств шва и соединяемого материала;
- отсутствие потребности в сложной подготовке поверхностей;
- высокая скорость образования соединения.

Из различных видов сварки в расплаве ТКМ [44,77] применительно к ремонту этих материалов упоминались сварка нагретым инструментом, сварка закладным элементом, ультразвуковая сварка, сварка вибротрением, сварка нагретым газом.

Наиболее простой в осуществлении является сварка нагретым инструментом косвенным нагревом. Данные о возможностях этого метода противоречивые. Анализируя специфику этого вида сварки, можно отметить, что она в принципе не должна обеспечить высокое качество ремонта ТКМ. Лишь применение легкоплавкого и совместимого с полимером ремонтируемой детали промежуточного слоя между свариваемыми поверхностями дает возможность сохранить структуру свариваемого ТКМ. Так, присоединение к углепластику на основе ПЭЭК, имеющему центральное отверстие, накладки из того же материала сваркой нагретым инструментом с использованием промежуточного слоя из ПЭИ позволяет достичь прочности при растяжении отремонтированного участка, равной прочности отремонтированного с помощью склеивания образца и составляющей около 89 % прочности неповрежденного образца [88]. Причем прочность при сдвиге сварного соединения 58 МПа существенно выше прочности при сдвиге клеевого соединения, равной 35 МПа. Такое различие может быть объяснено не столько влиянием способа соединения, сколько различием деформационных свойств материала промежуточного слоя и клеевого слоя.

Из-за особенностей сварки нагретым инструментом косвенным нагревом ее можно рекомендовать для залечивающего ремонта повреждений в матрице [39]. Эффективность ремонта при разрушении волокон ТКМ не вы-

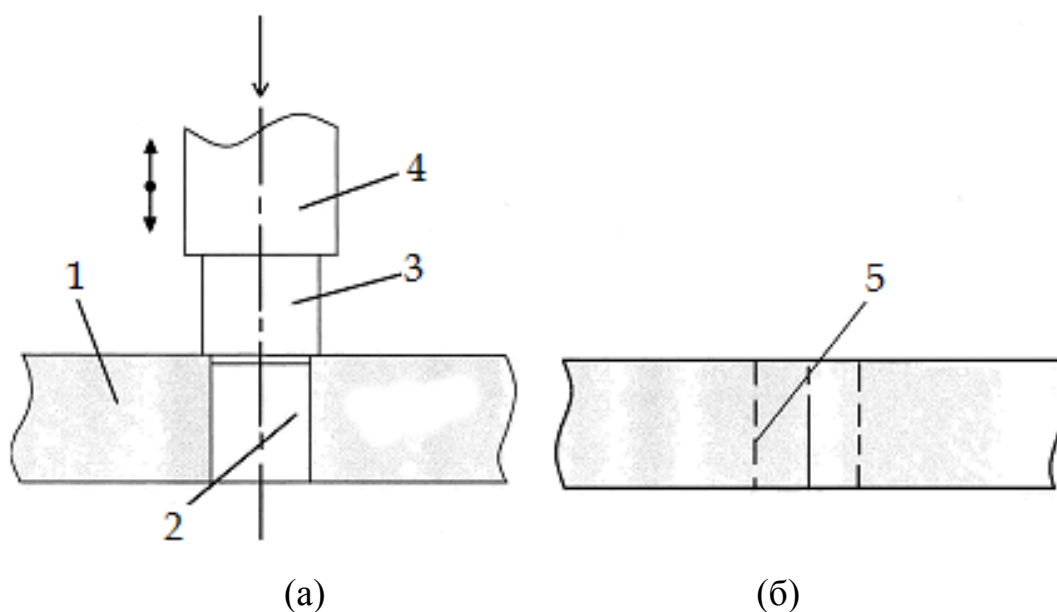
сока, но, тем не менее, прочность при сжатии и изгибе отремонтированного ТКМ намного выше прочности целого ТКМ. Более пригодной как для сборки, так и для ремонта изделий из ТКМ следует рассматривать сварку с использованием прямых методов нагрева [44,77].

В работе [39] сделаны выводы, что добиться высоких показателей ремонта с помощью накладки при сварке резистивно нагреваемым закладным элементом можно в случае использования наклейки прямоугольной формы, при строгом контроле плотности тока, продолжительности нагрева и давления прижима. При использовании в качестве закладного элемента углеродного препрега для воспроизводимого резистивного нагрева важную роль играет качество контакта между закладным элементом и токоподводом.

Индукционная сварка высокопроизводительна, воспроизводима и обеспечивает высокое качество как залечивающего, так и с применением наклейки ремонта углепластика [39]. Термопластичный углепластик с изотропной структурой и толщиной 5,1 мм при подводимой мощности к индукционной спирали 1000 Вт был нагрет от нормальной температуры до 93°C за 40 с. Зона нагрева ограничивается площадью под спиралью.

Относительно пригодности УЗ-сварки для ремонта ТКМ нет единого мнения. Авторы работы [39] из-за сложности и громоздкости УЗ-оборудования считают этот метод непригодным для ремонта в условиях эксплуатации.. Между тем фирма Mc Donnell Douglas нашла интересное применение для УЗ-сварки - введение в круглое отверстие вставки типа пробка (рисунк 1.13) [66]. Для этого используется ручной аппарат мощностью около 450 Вт. Не исключена также возможность появления других вариантов ремонта с помощью УЗ-техники.

Сварка нагретым газом по сравнению с УЗ-сваркой и сваркой трением требует более простого оснащения, и ее возможности при ремонте ПКМ в части восстановления несущей способности ремонтируемых деталей должны быть еще изучены.



a – перед ремонтом; *б* – после ремонта.
 1 – деталь; 2 – пробоина; 3 – вставка; 4 – ультразвуковой инструмент;
 5 – сварной шов.

Рисунок 1.13 - Схема ремонта путем введения вставки с помощью ультразвука.

Возможности ремонтной сварки растворителем деталей из термопластов в работе Комарова Г.В. были представлены как заслуживающие детального изучения. Ее достоинства привлекательны для ремонтных работ: возможность осуществления при температуре окружающей среды, отсутствие потребности больших давлений, сложного оснащения и высококвалифицированного персонала. Проблема приближения прочности ремонтируемого участка к исходной прочности ТКМ решается не только оптимизацией параметров сварки, но и конструкцией соединения. Основной недостаток сварки растворителем - большая продолжительность процесса затвердевания материала шва. Нагрев ускоряет достижение максимального уровня прочности.

Выводы по главе 1

1. Систематизация литературных данных показала, что решение проблем ремонта изделий из ПКМ требует комплексного подхода с позиций материаловедения, технологии и механики. Успешному их решению способствует развитие технологии соединений ПКМ. В странах, где широко применяются ПКМ, уровень технологии ремонта приблизительно одинаков. Лучшее всего освоила ремонт авиационная отрасль. К изучению проблем ремонта ПКМ все в большей мере подключается автомобильная отрасль, где можно также найти ответы на стоящие задачи.

2. Сформулированные в работе требования к ремонтным материалам в настоящее время могут быть реализованы при использовании зарубежных разработок, которые неизвестны в государстве Мьянма. Успешное решение задач восстановления несущей способности поврежденной или дефектной полимерной детали требует учета специфических свойств ПМ.

3. Применение прогрессивных разработок в области ремонта с использованием адгезионных соединений требует как в Мьянме, так и в России освоения производства новых клеев и новых препрегов, а также новых технологий, пока не доступных для реализации при современном состоянии ремонтной базы не только в полевых условиях, но и в условиях ремонтных предприятий без приобретения соответствующего оснащения и материалов.

4. Применительно к ремонту ТКМ могут быть применены различные виды сварки в расплаве. Перенести выводы о возможности восстановления несущей способности дефектных деталей, отремонтированных в условиях лаборатории или предприятия ремонтной сваркой тепловыми методами, на случай ремонта в ограниченных условиях эксплуатации изделия не возможно. Сварка закладным нагревательным элементом весьма привлекательна для ремонтных работ с применением накладок. Но сложность обеспечения

воспроизводимых режимов нагрева и необходимость иметь большой набор препрегов прямоугольной формы в технической аптеке (в ремонтном чемодане) для дефектов различных размеров препятствует использованию этого вида сварки на практике, особенно в полевых условиях. Простейшим, не требующим применения сложного оснащения можно признать вид сварки растворителем. Сущность ремонтной сварки тепловыми методами и растворителем одна и та же. Поэтому можно считать, что более простая в реализации сварка растворителем позволит в первом приближении оценить вообще возможность восстановить несущую способность дефектной детали из ТКМ применением ремонтной сварки.

Список использованных источников

1. а) Bond and Repair Compos.: Pap. One Day Semin., Birmingham, 1989.- Guildford.- 1989.- 106 pp.
- б) Seminar “Strukturelles Kleben und Dichten in der Fertigung und Reparatur im Fahrzeugwesen”. Rosenheim, 1991.
- в) Adv. Join. Newer Struct. Mater. Proc. Int. Conf. Montreal, 23-25 July, 1990.
- г) Swiss-Bonding '90. Fachmesse und Konferenz vom 26 bis 31.5.1990 in Rapperswil, Schweiz.
2. Gußfehlerbehebung und Imprägnieren von Gußteilen mit Plasten. - Halle (Saale): ZIS der DDR Halle (Saale), 1960.- 46 S.
3. Friedler E. Die KGL- Technik in der Instandhaltung der Chemieindustrie.// Schweißtechnik (DDR).- 1983.- Bd.33, Nr. 1.- S. 38-39.
4. Puttscher R., Starkow K., Stibbe J. Anwendung plasttechnischer Verfahren bei der Instandsetzung von Einzelteilen// Schweißtechnik (DDR).- 1986.- Bd. 36, Nr. 6.-S. 260-262.
5. Borck A., Condereit M. Kleb-, Gießharz- und Laminiertechnik in der Instandhaltung. Teil 1. Volkswirtschaftliche Bedeutung des Einsatzes von Kleb-, Gieß- und Laminierharzen// Metallverarbeit-

- ung.- 1986.- Bd. 40, Nr. 6.- S. 174-175.
6. Borck A., Condereit M. Kleb-, Gießharz- und Laminieretechnik in der Instandhaltung. Teil 2. Grundsatztechnologien// Metallverarbeitung.- 1987.- Bd. 41, Nr. 1.- S. 24-25.
 7. Kanzler S., Stuy O. Anwendungsbeispiele der KGL- Technik in der Motoreinstandsetzung// ZIS-Mitt.- 1988.- Bd. 30, Nr. 10.- S. 1070-1076.
 8. Puttscher R., Stibbe J. Anwendung der KGL- Technik in der landtechnischen Instandsetzung.- Schweißtechnik (DDR) - 1982.- Bd. 32, Nr. 12.- S. 547-550.
 9. Puttscher R., Stibbe J. Anwendung von Polyamid bei der Instandsetzung von Einzelteilen// Agrartechnik.- 1983.- Bd. 33, Nr. 12.- S. 562-563.
 10. Puttscher R., Starkow K., Stibbe J. Epoxidharz Epilox TZ 20-24 bei der Instandsetzung von Einzelteilen// ZIS-Mitt.- 1988.- Bd. 30, Nr. 10.- S. 1065-1070.
 11. Steinmez W.D., Trzaskows W.J. Aluminum surface preparation for aircraft field repair// SAMPE Quarterly.- 1990.- V. 21, No. 4.- P. 34-39.
 12. Poole P. The use of adhesives in aircraft structures// Join. Metals. Prac. and Perform. Spring Resident. Conf. N 18. Warwick, 10-12 Apr., 1981, vol. 1. S.1., 1981.- P. 202-208. Discuss.: 209-210.
 13. Janardhana M.N., Brown K.C. Effect of quality and processing parameters on the strength of adhesively bonded composite to metal joints// Austral. Aeron. Conf.: Res. and Technol.- Next Decade, Melbourne, 9-11 Oct., 1989: Prepr. Pap. - Barton, 1989.- P. 186-191.
 14. Baker A., Eng C. Boronfibre reinforced plastic patching for craced aircraft structures// Aircraft.- 1981.- No 9.- P. 30-35.
 15. Sutton G.R., Stone M.N., Poole P., Wilson R.N. The repair of fatigue cracked components by adhesively bonded patches// Repair and Reclam.: Conf., London, 24-25 Sep., 1984. Abington, 1986.- P. 153-158.
 16. Ong C.-L., Shu W.-Y., Shen S.B. The evaluation of non-tank surface treatments for aluminium bonding repairs// Int. J. Adhesion and Adhesives.- 1992.- V. 12, No. 2.- P. 79-84.

17. Caruso R.P. Boron/epoxy composites for aircraft structural repair// Nat. Conf. Publ./Inst. Eng., Austral.- 1991.- No. 91/17.- P. 130-133.
18. Nill R. Karrosserie- Klebe-Technik// Fahrzeug und Karros. - 1986.- Bd. 39, Nr. 11.- S. 26, 28, 30.
19. Gräter H. Kleben statt Schweißen. Die andere Form der Karrosserie- Reparatur// KFZ- Betrieb und Automarkt.- 1987.- Bd. 77, Nr. 8.- S. 40-42.
20. Klebtechnik für Karosseriereparaturen// Adhäsion.- 1987.- Bd. 31, Nr. 9.- S. 19.
21. Kleben ist tot, es lebe das Kleben// Krafthand.- 1990.- Bd. 63, Nr. 17.- S. 1368-1370.
22. Neue Verarbeitungstechnologie für das Karosserie- Handwerk: Kleben statt Schweißen// AMZ: Auto-Motor Zubehoer.- 1985.- Bd. 73, Nr. 11.- S. 59.
23. Jones R., Molent L., Baker A.A., Davis M.J. Bonded repair of metallic components thick sections// Anal. and Test. Methodol. Des. Adv. Mater.: Proc. Int. Conf., Montreal, Aug. 26-28, 1987: ATMAN' 87.- Amsterdam, 1988.- P. 79-93.
24. Baker A.A., Chester R.J. Recent advances in bonded composite repair technology for metallic aircraft components//3 rd Int. Conf. Struct. Adhes. Eng. III, Bristol, 30 June- 2 July, 1992: Pap.- London: Plast. and Rubber Inst., 1992.- P. 9/1-9/7.
25. Jones R. Recent development in advanced repair technology//Nat. Conf. Publ./Inst. Eng., Austral.- 1991.- No. 91/17.- P. 76-84.
26. Гельберг Б.Т. Опыт использования эпоксидных клеев в ремонтной практике// Передовой научно-техн. и производств. опыт № 19-66-666/19.- М.: ГОСИНТИ, 1966.- 16 с.
27. Конопелко Ф.Л. Использование клеев для ремонта паяных алюминиевых теплообменников.- В кн.Изготовление теплообменной аппаратуры. Материалы семинара.- М.: ЦРДЗ, 1993.- С. 140.

28. Хрулев В.М. Синтетические клеи и матики (Применение в строительстве). Под ред.. Д.А. Кардашова.- М.: Высшая школа, 1970.- С. 307-318,349-352.
29. Кардашов Д.А. Синтетические клеи. Изд. 2-е перераб. и дополн.- М.: Химия, 1968.- С. 434.
30. Бард П.А. Пластмассы и синтетические клеи в ремонте автомобильных моторов.- Барнаул: Алткнигоиздат, 1977.- 82 с.
31. Кершенбаум Дж.М., Протасов В.Н. Ремонт. Ремонт монтажного оборудования с использованием клеевых соединений.- М.: Недра, 1970.- 112 с.
32. Агапчев В.И. Полимерные клеи для склеивания и ремонта трубопроводов.- Томск: Изд-во СО АН СССР, 1985.- 56 с.
33. Виленц В.С., Муржинов В.А., Абалов В.З. Development of technological recommendation for repair of honeycomb bonded structures made of aluminum alloys and polymeric composites under operating conditions// Авиационная промышленность. - 1995.- № 7-8.- С. 76-81.
34. Турусов Р.А., Лебедев С.Р. Ремонт элементов авиационных конструкций с применением соединений// Адгезионные соединения в машиностроении. Тез. докл. III Всесоюзн. межотрасл. научн.-техн. конф.- Рига, 1989.- С. 141-142.
35. Тростянская Е.Б., Комаров Г.В., Грабильников А.С. Анализ возможностей сборки и ремонта в космосе с помощью склеивания// Научные чтения по авиации и космонавтике. 10-е Гагаринские чтения. 1980.- М.: Наука. 1981.- С. 276.
36. Bledzki A.K., Kurek K., Gassan J. Mikroporen in Faserverbundwerkstoffen: Beeinflussung des .mechanischen Verhaltens// Kunststoffe.- 1995.- Bd. 85, Nr. 12.- S. 2062-2065.
37. Yoshida H., Ogasa T., Hayashi R. Statistical approach to the relationship between ILSS and void content of CFRP// Composites science and technology.- 1986.- V. 25.- P. 3-18.

38. Weinert M. Faserverbunde- Werkstoffe für den Flugzeug- und Fahrzeugbau// Kunststoffe.- 1990.- Bd. 80, Nr. 9.- S. 1019-1022.
- 39 Xiao X.R., Hoa S.V., Street K.N. Repair of thermoplastic composite structures by fusion bonding// 35 th Int. SAMPE Symp.- April 2-5, 1990.- P. 37-45.
40. Adams R.D., Cawley P. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints// Bond. and Repair Compos.: Pap. One Day Semin., Birmingham, 14 th July, 1989.- Guildford, 1989.- P. 1-15.
41. Taylor N.S., Jones S.B. Feasibility of welding thermoplastic composite materials// Bond. and Repair Compos.: Pap. One Day Semin., Birmingham, 14 th July, 1989.- Guildford, 1989.- P. 27-32.
42. Potente H., Natrop J., Klit Pedersen T., Übbing M. Vergleichende Untersuchung beim Schweißen von glassfaserverstärktem PES// Plastverarbeiter.- 1993.- Bd. 44, Nr. 6.-S. 26-28, 30, 32-33.
43. Benatar A., Gutowski T.G. Ultrasonic welding of advanced thermoplastic composites// Mater.- Pathway Future: 33 rd Int. SAMPE Symp. and Exhib., Anaheim, Calif., 7-10 March, 1988.- Covina (Calif.), 1988.- P. 1787-1797.
44. Комаров Г.В., Мацюк Л.Н., Шадрин А.А., Шестопал А.Н. Сварка термопластичных композиционных материалов. Обзор.- Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1992.- 32 с.
45. Strauss E.L. Mechanical joints in reinforced plastics structures// Machine Design.- 1960.- V. 32, No. 6.- P. 197,198, 200, 202.
46. Reinhardt K.-G. Niet- und Schraubverbindungen bei glasfaserverstärkten Plaste// Plaste und Kautschuk.- 1969.- Bd. 16, Nr. 7.- S. 509-513.
47. Композиционные материалы. В 8-и т. Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока Перев. с англ.- М.: Машиностроение, 1978.- Т. 3. Применение композиционных материалов в технике. Под ред. Б. Нотана.- 1978.- С. 101.
48. Stoune R.H. Field-level repair materials and process// 28 th Nat. SAMPE Symp.- 1983.

49. Применение металлического однонаправленного композиционного материала в качестве накладок / Н. Фридляндер, В.М. Белецкий, Г.М.Кривов и др.// В кн.: Композиционные материалы.- М.: Наука, 1981.- С. 173-176.
50. Sutton G.R., Ston M.H., Poole P., Wilson R.N. The repair of fatigue cracked components by adhesively bonded patches// Repair and Reclam.: Conf., London, 24-25 Sept., 1984.- Abington, 1986.- P. 153-158.
51. Комаров Г.В. Соединения деталей из полимерных материалов: Учеб. пособие.- СПб.: Профессия, 2006.- 592 с.
52. Kaliske G. Metallkleben in der Instandsetzung// Maschinenbau.- 1968.- Bd. 17, Nr. 1.- S. 43-46.
53. Immermann K. Geometrical parameters in composite repair// J. of Composite Materials.- 1995.-V. 29, No.11.-P. 1473-1487.
54. Lee F., Brinkenhoff S., McKinney S. From 49-1 to HX 1567 development of a low energy composite repair system// 3 th Int. SAMPE Symp.- April 2-5, 1990.- P. 2202-2215.
55. Sivy G.T. Rapid low-temperature cure patching system for field repair// 34 th Int. SAMPE Symp.- 1989.- P. 448-457.
56. Cichon M.. Repair adhesives: development criteria for field level conditions// 34 th Int. SAMPE Symp.- 1989.- P. 1052-1066.
57. Ludeck W. Tabellenbuch der Klebetechnik.- Leipzig: Dtsch. Verl. Grundstoffind., 1982.- 264 S.
58. Schindel-Bidinelli E.-H. Strukturelles Kleben und Dichten.- Muenchen: Hinterwaldner- Verlag, 1988.- 454 S.
59. Habenicht G., Dilger K. Optimierung der Klebstoffauswahl mit Hilfe eines Expertensystems// VDI- Berichte 775.- Düsseldorf: VDI- Verlag, 1989.- S. 289-306.
60. Schindel- Bidinelli E.-H. Pratique du collage industriel.- Paris: Lavoisier.- 1992.
61. Couvrat P. Le collage structural moderne.-Paris: Lavoisier.- 1992.

62. Eichhorn F., Stockhausen G. Fertigungsbezogene Auswahl von strukturellen Klebsystemen// Schweißen und Schneiden.- 1991.- Bd. 43, Nr. 6.- S. 331-335.
63. Adhesive locator and sealant guide certificate// Adv. Compos. Bull.- 1991.- Jan.- P. 4-5.
64. Ruhsland K., Möller P. Programmpaket zur Anwendung der Klebtechnik// Schweißtechnik (DDR) - 1989.- Bd.39, Nr.2.- S. 80.
65. Hahn O., Schuht U. Integration von wissensbasierten Systemen in die Konstruktion und Fertigung beim Einsatz der Klebtechnik// DVS-Berichte.- 1991.- Bd. 133.- S. 37-39.
66. Welder S.M., Lause H.J., Fountain R. Structural repair systems for thermoplastic composites// Materials and Design.- 1986.- V. 7, No. 3.- P. 147-149.
67. Ruhsland K. Härtungsbeschleuniger für Epasol FV/ZIS 939.- Schweißtechnik (DDR).- 1983.- Bd. 33, Nr. 4.- S.168-170.
68. Комаров Г.В. Скоростные методы образования соединений деталей из композиционных материалов// Пласт.массы.- 1990.- № 12.- С. 28-31.
69. Micro-“Minuten”- Epoxid- Klebstoff// Kunststoff- Plast.- 1986.- Bd. 33, Nr. 12.- S. 20.
70. Hinterwaldner R. Strahlenhärtbare Klebstoffe// Coating.- 1989.- V. 22, No. 1.- P. 14-15, 18-19.
71. Möckel J., Knoll D. Hotmelts ohne Rückwärtsgang// Adhäsion.- 1987.- B. 31, Nr. 9.- S. 24, 26-27.
72. Ruhsland K. Kleben öliger Werkstoffe mit Epasol FV/ZIS 939// Schweißtechnik (DDR).- 1981.- Bd. Nr. 31, 1.- S. 29-31.
73. Mousty J. Le collage sous l’eau une technique pour assemblages sous-marins// Matér. et techn.- 1984.- V. 72, No. 6-7.- P. 231-234.
74. Справочник по композиционным материалам. В 2-х книгах. Кн. 2./ Под ред. Дж. Любина; Перев. с англ.. А.Б. Геллера.- М.: Машиностроение, 1988.- 584 с.
75. Bulloch Ch. Repairing composite structures// Interavia.- 1983.- V. 38, No. 4.- P. 317-319.

76. Bär C., Krüger G., Kleinert H., Hannemann O.-D. CFK- Klebverbindungen im Bootsbau// Kunststoffe.- 1991.- Bd. 81, Nr. 11.- S. 1039-1041.
77. Komarov G.V. Problems of joining of plastic composites// Russia- Korea Joint Seminar on Composite Technology.- Moscow State Aviation Technol. Univ., Russia, 27-28 My, 1996.- P. 136-147.
78. Sage G.N., Tiu W.P. The effect of glue-line voids and inclusions on the fatigue strength of bonded joints in composites// Composites.- 1982.- V. 13, No. 3.- P. 228-232.
79. Hahn O., Yi X.S. Einfluß von Adsorptionswasser auf die Strukturierung von Klebstoffen in grenzschichtnahen Bereichen bei Metallklebungen// Verbindungstechn. Elektron.: Löten- Schweißen- Kleben. Vortr. 3 Int. Kolloq., Fellbach, 18-20 Febr., 1986.- Düsseldorf, 1986.- S. 105-112.
80. Weserman E., Roll P.E. An apparatus to prepare composites for repair// 34 th Int. SAMPE Symp.-1989,1041-1051.
81. Ruhsland K. Schnellhärten von Metallklebstoffen// ZIS- Mitt.- 1984.- Bd. 26, Nr. 10.- S. 1060-1067.
82. Subrahmanian K.P., Davis J.W., Martens B.A. A new low- temperature rapid curing composite material for structural repair// Bond. and Repair Compos.: Pap. One Day Semin., Birmingham, 14 th July, 1989.- Guildford, 1989.- P. 101-106.
83. Ильюшенко С.Ф., Комаров Г.В., Богдашевский Ф.В., Пешехонов Б.А. Склеивание карбопластиков с помощью ультразвука// Пласт. массы.- 1982.- № 1.- С. 38-39.
84. Border J., Salas R., Black M. Induction heating development for aircraft repair// 35 th Int. SAMPE Symp.- 1990.- P. 1411-1419.
85. Schweißen defekter Kunststoffteile// Fahrzeug und Kaross.- 1981.- Bd. 34, Nr. 10.- S. 34.
86. Кораб Г.Н., Минеев Е.А., Адаменко А.А. Ремонт пластмассовых трубопроводов в полевых условиях// Автоматич. сварка.- 1985.- № 1.- С. 48-49.

87. Atkinson J.R., Turner B.E. Repairability of plastic automobile bumpers by hot gas welding// Polymer Eng. and Sci.- 1989.- V. 29, No. 19.- P. 1368-1375.
88. Cantwell W.J., Davies P., Jar P.-Y., Kausch H.H. An evaluation of adhesive and thermal bonding methods for joining carbon- fibre PEEK// 1st Int. Conf. Deform. and Fract. Composites, Manchester, 25-27 March, 1991.- London, 1991.- P. 64/1-64/5.
89. Виноградов В.М. Технология изготовления препрегов на основе терморепактивных связующих/ В кн.: Машиностроение. Энциклопедия / Ред. Совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технология производства изделий из композиционных материалов, пластмасс, стекла и керамики. Т. III-6- 2006. – С. 82-104.
90. Комаров Г.В., Степанова М.И., Петренко Я. Ю. Повышение несущей способности бетонных конструкций с помощью полимерных композиционных материалов// В кн. Сб. научн. трудов «Строительные конструкции зданий и сооружений дорожного сервиса».- М.: МАДИ (ГТУ), 2003.- С. 88-95.
91. Чаромский А.А. Клеевые технологии для машиностроения и ремонта// Машиностроитель.- 1996.- № 10.- С. 56-58.
92. Goldmedaille dank Klebstoffreparatur// Adhäsion.- 2006.- Bd. 50, Nr. 4.- S. 49.
93. Baker A., Bitton D., Wang John. Development of proof test for through-life monitoring of bond integrity in adhesively bonded repairs to aircraft structure// International J. of Adhesion and Adhesives.- 2012.- V. 36.- P. 65-76.
94. Парнасов В.С., Добромыслов В.А. Особенности использования МНК полимерных композиционных материалов//15 Российская науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика».- Москва, 28 июня – 2 июля 1999 г. : Тез. докл. Т. 1/ Рос. Об-во по неразрушающему контролю и технич. диагностике.- М., 1999.- С. 110.
95. Gil L., Cruz J.J., Pérez M.A. A pull-shear test for debonding of FRP-laminates for concrete structure//Key Eng. Mater.-2009.-No. 399.-P. 141-151.

96. Liu Hongbo, Zhao Xiao-Ling, Al-Mahaidi Riadh. Boundary element analysis of CFRP reinforced steel plates// Compos. Struct.- 2009.- V. 91, No. 1.- P. 74-83.
97. Постнов В.И. Технология восстановления эксплуатационной надежности авиационных конструкций из ППКМ (материалы, структура, свойства)// Новые перспективные материалы и технологии их получения (НИМ-2010): Сб. науч. трудов 5 междунар. конф., Волгоград, 14-16 сент., 2010.- Волгоград: Волг. ГТУ, 2010.- С. 183-185.
98. Новые ремонтные материалы/ З.А. Хамидулова, А.Ф. Мурох, А.М. Ветрова и др.// Пласт. массы.- 1999.- № 6.- С. 39.
99. Selbstheilende Oberflächen// Adhäsion. – Kleben und Dichten.- 2009.- Bd. 53, Nr. 9.- S. 44.
100. Ouinas D., Bouiadjra B.B., Achour B., Benderdouche N. Modelling of a cracked aluminium plate repaired with composite octagonal patch in mode I and mixed mode// Mater. and Design.- 2009.- V. 30, No. 3.- P. 590-595.
101. Ильинская Е.И., Комаров Г.В. Исследование возможности улучшения свойств клеевых соединений введением в состав клея нанонаполнителя// XXXVI Гагаринские чтения. Научн. труды Междунар. молодежной науч. конф.. В 8 томах. Москва, 6-10 апр. 2010 г. М.: МАТИ, 2010.- Т. 1.- С. 50.
102. Reinigung schwer zugänglicher Stellen// Adhäsion. – Kleben und Dichten.- 2009.- Bd. 53, Nr. 7-8.- S. 48.
- 103, Schulz D. Kaltaktives Plasma eröffnet neue Möglichkeiten// Adhäsion. – Kleben und Dichten.- 2009.- Bd. 53, Nr. 11.- S. 16-19.
104. Plasmatechnologie in der Faltschachtelklebung// Allgemeine Pap.- Rundschau.- 2008.- Bd. 132, Nr. 4.- S. 40, 42.
105. Praxisorientierte Plasmaforschung // Adhäsion. – Kleben und Dichten.- 2009.- Bd. 53, Nr. 7-8.- S. 45.
106. Fraunhofer M., Appelt M., Kreling S. u.a. Wirtschaftliches Fügen in Serie und Reparaturfall// Adhäsion. – Kleben und Dichten.- 2008.- Bd. 52, Nr. 12.- S. 39-43.

107. Brandmair A., Dobmann A., Meeuer S. u.a. Mit Klebstoff punkten// Adhäsion. – Kleben und Dichten.- 2011.- Bd. 55, Nr. 12.- S. 22-24.
108. Wellmann S. Superschnell und trotzdem zuverlässig// Adhäsion. – Kleben und Dichten.- 2008.- Bd. 52, Nr. 12.- S. 32-34.
109. Уваров А.А. Разработка методики расчета усиливающих накладок поврежденных элементов сотовых конструкций. Автореф. дисс.... канд. техн. наук.- М.: МГАТУ им. К.Э. Циолковского, 1993.- 22 с.
110. Павлов А.Г., Смаль Т.М., Стреляев Д.В. Некоторые аспекты использования полимерных и композиционных материалов при восстановительном ремонте авиационных конструкций// Новые материалы и технологии НМТ-98. Тезисы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во «ЛАТМЭС», 1998.- С. 213.
111. Павлов А.Г., Смаль Т.М., Стреляев Д.В. Оценка долговечности средненагруженных элементов авиаконструкций, отремонтированных с помощью полимерных и композиционных материалов// Новые материалы и технологии НМТ-98. Тезисы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во «ЛАТМЭС», 1998.- С. 212.
113. Постнов В.И., Ривин Г.Л., Постнова М.В. Виды разрушений конструкций из ПКМ и технология восстановления их эксплуатационной надежности// Новые материалы и технологии НМТ-98. Тезисы докл. Всеросс. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во «ЛАТМЭС», 1998.- С. 214.

Глава 2 Анализ свойств полимерных материалов, влияющих на их поведение при ремонте и на возможность восстанавливать несущую способность изделия

Под ремонтпригодностью в настоящей работе понимали способность материала, а вместе с ним и изделия восстанавливать свою несущую способность в определенных заданных условиях.

На стадии составления проекта ремонта, при выполнении ремонта и при эксплуатации отремонтированного объекта встает целый ряд вопросов материаловедческого плана. Решение этих вопросов зависит от типа ПМ, вида дефекта или повреждения, выбранного метода ремонта, условий проведения ремонта, требований к восстановлению исходных характеристик изделия¹⁾. Значимость знания материаловедческих проблем ремонта деталей из ПМ может возрастать при восстановлении несущей способности ответственных узлов, в частности летательных аппаратов. В целом над выполнением качественного ремонта деталей из ПМ работают не только материаловед, но и технолог, образованный в вопросах соединений, и конструктор изделия.

Для устранения дефектов и повреждений деталей из ПМ преимущественно используют адгезионные соединения (см. главу 1), к которым относятся клеевые, сварные и формованные соединения [1, с. 16]. Они могут сочетаться с механическим креплением, призванным ослабить некоторые недостатки адгезионных соединений [1, с. 119].

На выполнение ремонта поступают детали из ПМ, получивших во время формования и сборки изделия оптимальные структуру и свойства. Эти структура и свойства находятся в деталях, допустимых к ремонту, на таком

¹⁾Комаров Г.В., Аунг Тху Хан, Андросова Н.И., Здановский Е.М. Свойства полимерных материалов при ремонте и восстановлении несущей способности изделий// Технология машиностроения.- 2013.- № 1.- С. 5-12.

уровне, что их нужно по возможности сохранить. Состав и структуру конструкционных ПМ и прежде всего полимерных композиционных материалов (ПКМ) из-за их гетерогенности и гетерофазности [2] часто нужно учитывать в большей мере, чем при ремонте деталей и изделий из других материалов.

2.1 Состав и структура ПМ как влияющие на ремонт факторы

Применительно к ремонту с применением адгезионных соединений необходимо, во-первых, учитывать многокомпонентность ПМ. Состав и свойства компонентов ПМ отражаются на возникновении дефектов в деталях из них и в соединениях этих деталей. Компоненты ПМ по-разному влияют на подготовку ремонтируемого участка, по-разному ведут себя как в процессе ремонта, так и при эксплуатации отремонтированного участка детали.

Визуальное изучение внешних признаков ремонтируемой детали не всегда позволяет оценить присутствие других, кроме матрицы и, возможно, наполнителя в ее материале. Особенно это трудно сделать по отношению к однофазным ПМ, когда модификаторы полимера растворены в нем, но, тем не менее, индивидуальность каждого проявляется, с чем необходимо считаться при некоторых видах обработки и применения ПМ. Модификаторы улучшают технологические свойства полуфабрикатов ПМ и придают ПМ новые эксплуатационные свойства, но негативно могут отразиться на их ремонтной способности. Знание состава ПМ облегчает анализ способности поверхности ремонтируемой детали смачиваться тем или иным ремонтным клеем. В общем случае полимеры имеют более низкую поверхностную энергию, чем, например, металлы, поэтому опыт ремонта металлических деталей с применением клеевых соединений не всегда может быть перенесен на случай ремонта деталей из ПМ. Если на поверхности ПКМ находится «лаковый» полимерный слой, то условие смачивания его клеем:

$$\gamma_{ПКМ} > \gamma_k$$

(здесь $\gamma_{\text{ПКМ}}$ – критическое поверхностное натяжение ПКМ, $\gamma_{\text{к}}$ – поверхностное натяжение клея) не всегда может выполняться. Предварительная оценка свойств компонентов ПМ, находящихся на его поверхности может сузить поиск наиболее подходящего клея для присоединения наклейки или сразу же может указать на необходимость целенаправленной подготовки поверхности путем модифицирования с целью повышения ее энергии. Если деталь была защищена полимерным покрытием, то необходимо дать оценку этому покрытию, чтобы решить вопрос о необходимости удаления или сохранении покрытия, но с проведением его очистки.

При подготовке к ремонту, затрагивающего поверхность ПМ, требуется в первую очередь знать, какова природа низкомолекулярных, выполняющих роль слабых пограничных слоев, веществ на этих поверхностях, чтобы, например, выбрать соответствующий растворитель для очистки поверхности от этих веществ или метод превращения их в высокомолекулярные вещества (например, обработку плазмой). Такими слабыми пограничными слоями могут быть: остаточные мономеры (фенол на поверхности только что отформованной, но дефектной детали из фенопласта), низкомолекулярные продукты полимеризации (например, на детали из полиэтилена [3]) или поликонденсации, стабилизаторы, пластификаторы, или смягчители, введенная в прессматериал внутренняя смазка или смазка, перешедшая с поверхности технологической оснастки, и т.п. [4]. Возможность появления в результате перераспределения этих пограничных слоев, отсутствующих или не играющих важной роли на поверхности только что отформованных деталей, необходимо оценить за период эксплуатации поврежденных деталей.

С присутствием в составе ПМ значительной доли низкомолекулярных веществ приходится считаться также при прогнозировании поведения уже отремонтированных деталей, например, с использованием клеевых или формованных соединений. Миграция этих веществ из ремонтируемого ПМ в клеевой слой или приформовываемую наклейку может вызвать изменение их

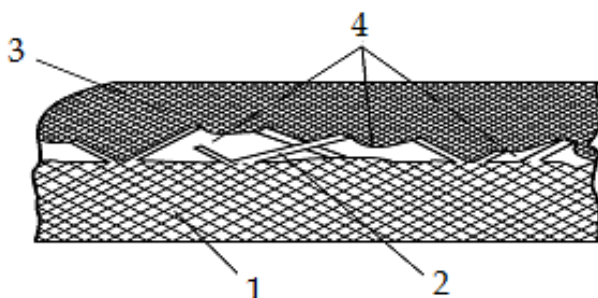
свойств и таким образом ослабить усиливающий эффект присоединенных к дефектному участку накладок.

К низкомолекулярным веществам в составе ПМ может быть отнесена и влага. Если ремонт деталей из термопластов осуществляется с применением сварки в расплаве, то необходимо оценить возможность присутствия в ремонтируемой детали влаги, адсорбированной ПМ во время хранения или эксплуатации изделия. Это особенно актуально, если ремонту подвергаются детали, например, из полиамидов 6 и 66, поглощение влаги которыми на воздухе при 23°C до насыщения может составить 2,5-3,4 % [5], или из поликарбоната (ПК). Обнаружение увлажнения таких деталей может потребовать их сушки перед ремонтной сваркой.

Из-за присутствия в ПМ стекловолоконного наполнителя, укрытого на поверхности детали «лаковым слоем», можно считать эффективным удаление последнего одним из видов механической обработки. В результате этого может произойти оголение стеклянного волокна и могут создаваться более благоприятные условия для смачивания поверхности ПМ клеем или для достижения плотного контакта приформовываемого препрега, ибо критическое поверхностное натяжение γ_c , например, для волокна из стекла типа Е на много выше ($\gamma_c = 425$ мН/м), чем γ_c как реактопластов (например, для эпоксидного полимера $\gamma_c = 30-47$ мН/м), так и термопластов (например, для ПА 6 $\gamma_c = 44$ мН/м). Вместе с тем едва ли полезна будет обработка абразивом органопластика, так как поверхностная энергия полимерного наполнителя (например, для волокна типа СВМ $\gamma_c = 30-40$ мН/м), укрытого пленкой матрицы, близка к поверхностной энергии последней [1, с. 452]. Простое же «развертывание» поверхности в этом случае, а также при обработке неполярного термопласта может даже дать отрицательный результат из-за несовершенства заполнения клеем ворсистого микрорельефа поверхности (рисунок 2.1).

Присутствие в ПКМ наполнителей, способных оказывать абразивное действие на режущий инструмент, учитывают при механической обработке

дефектного участка, в частности, при сверлении тормозящих распространение трещины отверстий по ее концам или отверстий для инъекции клея в местах расслоения, при доработке кромок пробоин и т.п.



1- органопластик; 2 – разрыхленный слой; 3 – клей;
4 – не заполненные клеем полости.

Рисунок 2.1 - Схема рельефа поверхности органопластика, обработанной шлифовальной шкуркой перед нанесением клея:

Если после механической обработки проводится очистка поверхности растворителем, то необходимо учесть, что оголившийся наполнитель может всасывать смесь растворителя и загрязнения вглубь ПКМ. Знание схемы расположения наполнителя (ориентации относительно поверхности), особенно обладающего большей теплопроводностью, чем полимерная матрица, позволит оценить возможность подведения теплоты к ремонтируемому с применением нагрева участку.

Оценка свойств наполнителя может существенно повлиять на выбор технологии ремонта ПМ. Если наполнитель, например, углеродное волокно, обладает электропроводностью, то ремонт детали из углепластика можно выполнить не типичным для ПМ методом (индукционной сваркой [1, с. 388] или электроконтактной сваркой [1, с. 346]).

Если ремонт деталей из термопластичных ПМ сориентирован на применение сварки, то должна быть дана оценка свариваемости в расплаве только одного их компонента - матрицы. Волокнистый наполнитель, даже полимерной природы из-за тугоплавкости сварить не удастся, если не нарушать его структуру и/или не разрушать матрицу.

Из числа веществ в составе ПМ на осуществление его ремонтной сварки могут повлиять не только влага, но и смазки на поверхности и в поверхностном слое ПМ, продукты старения полимера, загрязнения из внешней среды, которые, как и при использовании склеивания, должны быть удалены.

Состав и свойства ремонтируемого ПМ на основе матриц горячего отверждения могут быть неоднородными по толщине деталей. Так, поверхностный слой полимера может быть более глубоко отвержден, т.е. может иметь более густосетчатую структуру, нежели во внутренних слоях ПМ. Причина такого различия ясна - градиент температур по толщине детали (особенно толстостенной), обязательно возникающий при ее формовании с использованием внешних источников теплоты. Далее поверхностный слой ПКМ может быть обогащен матрицей из-за отжима связующего во время формования детали. Связующее характеризуется по сравнению с наполнителем большей усадкой (не только термической, но и химической). В результате этого оно может иметь более высокий уровень остаточных напряжений и/или быть более дефектным, чем внутренние слои[6]. В связи с этим его удаление может способствовать повышению прочности клеевого соединения, например, накладки с поврежденной поверхностью детали, за счет ее составляющей – когезионной прочности соединяемого материала.

Из-за малого содержания матрицы в поверхностных слоях ТКМ по сравнению с ненаполненными термопластами глубина протекания процесса вытеснения дефектных слоев в зоне контакта поверхностей на стадии формирования соединения деталей из ТКМ при сварке нагретым инструментом прямым нагревом ограничена. А именно это вытеснение способствует очистке материала зоны шва при ремонтной сварке. Для образования бездефектного сварного соединения ремонтируемой детали из ТКМ и привариваемой накладки может потребоваться введение между ними прокладки из ненаполненного полимера [1с. 345]. Но все проблемы

получения качественного ремонтного сварного соединения увеличением объема участвующего в образовании сварного шва ПМ не решаются.

Для выполнения сварки в расплаве термопластичных материалов необходимо прикладывать давление. При прессовой сварке детали из ТКМ с накладкой с подведением теплоты от нагретого инструмента со стороны накладки возможно нарушение схемы укладки армирующих волокон как в детали, так и в накладке, также изготовленной из ТКМ. Желательно, чтобы указанная выше прокладка была более легкоплавкая, чем матрицы ремонтируемой детали и накладки, и при этом быть однородной или совместимой с ними. Рекомендация обеспечения совместимости матриц детали и накладки или матрицы детали и присадочного материала, например, при устранении дефекта наплавкой распространяется и на случай ремонтной сварки других, а не только ТКМ, ПМ.

2.2 Механические свойства ПМ как влияющие на ремонт факторы

Во время подготовки к ремонту и в процессе его выполнения ПМ могут подвергаться различным видам механического нагружения. В связи с этим важно представлять, как механические свойства ПМ отражаются на технологии ремонта и на восстановлении несущей способности детали или узла.

Если ремонту подвергается, например, тонкостенная деталь, например, листовая деталь из ПМ, усиленного высокомодульными волокнами, т.е. из ПКМ, то ее высокая жесткость позволяет для поддержания формы поверхности, соединяемой с ремонтной накладкой методом сварки или склеивания, использовать прижимные приспособления упрощенной и облегченной конструкции.

Вместе с тем это качество имеет и отрицательную сторону. Если для ремонта решили применить готовую накладку из ПКМ, то при ее

формовании необходимо обеспечить повышенную размерную точность, так как подгонка соединяемых поверхностей наклейки и детали и правка геометрии отвержденного ПКМ из-за его высокой жесткости затруднены или становятся невозможными. Кроме того, проводя ремонт высокомодульного КМ, выбором клея, материала и конструкции ремонтной наклейки, материала крепежных элементов (при механическом креплении усиливающей или уплотняющей наклейки с поврежденной деталью), нужно озаботиться о реализации этого свойства в восстанавливаемой детали.

Вовлечение в работу наклейки из ПКМ, приклеенной к дефектной детали, происходит за счет касательных напряжений, действующих в клеевой прослойке. Повышение жесткости ПКМ наклейки, например, за счет увеличения степени его наполнения или ориентации наполнителя вдоль направления нагружения согласно уравнению Фолькерсена:

$$\tau_{\text{ср}} = \tau_{\text{max}} / (\Delta/2)^{1/2},$$

где $\tau_{\text{ср}}$ и τ_{max} – среднее и максимальное напряжения сдвига по длине l перекрытия наклейкой дефектной зоны детали; $\Delta = Gl^2/E \delta d$, где G – модуль сдвига клеевой прослойки; E – модуль упругости при растяжении ПКМ наклейки; δ – толщина наклейки; d – толщина клеевой прослойки,

и уравнению [12]:

$$L = K [(E_{\text{см}}/E_{\text{кс}}) \cdot \delta^3 \cdot d]^{1/4},$$

где L – длина зоны, воспринимающей усилие отслаивания клеевого соединения наклейки от ремонтируемой детали; $E_{\text{см}}$ – модуль упругости при растяжении ПКМ наклейки; $E_{\text{кс}}$ – модуль упругости материала клеевого слоя при растяжении; δ – толщина наклейки; d – толщина клеевого слоя, K – коэффициент,

благоприятно сказывается на напряженном состоянии нахлесточного и Т-образного клеевых соединений, работающих на сдвиг и расслаивание, и приводит к повышению их прочности, а следовательно, реализуемости свойств материала ремонтируемой детали.

Высокая прочность волокнистых ПКМ также ставит сложную задачу по ее восстановлению. При проектировании соединения при устранении такого серьезного повреждения, как разрыв по всему сечению детали, стремятся к тому, чтобы относительная прочность ν соединения (отношение прочности соединения к прочности материала) была близка к единице. А выполнить это требование тем сложнее, чем прочнее соединяемый материал. Так, например, ν клеевого соединения встык с двумя накладками (длина перекрытия 50 мм) из аморфного металла (толщина 50 мкм) с образцами из ПЭНП, ПП, ПА, ПК, армированного стекловолокном ПОМ (толщина 4 мм), предел текучести которых при нормальной температуре соответственно равен 20, 35, 50, 70 и 130 Н/мм², составляет соответственно 1,0; 0,8; 0,7; 0,4 и 0,25 [7].

Из особенностей механических свойств ПКМ на основе однонаправленных волокон следует иметь в виду их анизотропность (табл. 1.2.) [1, с. 31; 15], а также то, что прочность и модуль упругости ПКМ существенно выше, чем у полимерной матрицы. Так, прочность при растяжении однонаправленных стекло-, угле- и органопластиков в направлении расположения волокон (таблица 2.1) более чем на порядок превышает значение того же показателя у отвержденного эпоксидного связующего (до 90 МПа). От угла армирования заметно зависят также механические свойства ПКМ на основе стеклотканей (таблица 2.2). Разрушение клеевого соединения, например, накладки с ремонтируемой деталью из ПКМ при расслаивающем нагружении может произойти по ПКМ в трансверсальном направлении прежде, чем разрушится клеевой слой. Выполняя ремонт деталей из таких ПКМ, требуется учитывать направление максимальной прочности в них, чтобы сварное (для ТКМ) или клеевое соединение накладок нагружались в указанном направлении. По этой же причине нагружение клеевого соединения, например, слоистых дефектных ПКМ с накладкой не должно производиться в направлении, перпендикулярном слоям наполнителя.

При нагружении на сдвиг клеевых соединений слоистых ПКМ с накладкой усилия от слоя, контактирующего с клеевой прослойкой, из-за сравнительно невысокого модуля упругости полимерных прослоек в ПКМ не могут в достаточной мере передаваться на глубинные слои материала, и наиболее нагруженным оказывается именно слой, прилегающий к месту соединения [13].

Таблица 2.1

Некоторые показатели физико-механических свойств эпоксидных ПКМ на основе непрерывных однонаправленных волокон различной природы [8].

Показатель	Волокно		
	На основе стекла E	Углеродное, высокопрочное	Арамидное (Kevlar 49)
ρ , кг/м ³	2100	1600	1400
E_p , ГПа:	45/12	145/10	76/5,5
σ_p , МПа	1020/40	1240/41	1380/30
ε_p , %	2,3/0,4	0,9/0,4	1,8/0,5

Примечание: 1. Содержание волокон в ПКМ – около 60 % масс. 2. В числителе и знаменателе – значение показателя соответственно в продольном и трансверсальном направлениях по отношению к направлению расположения волокон. 3. ρ - плотность; E_p , σ_p и ε_p – соответственно модуль упругости и прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве.

Таблица 2.2

Механические свойства стеклотекстолита на основе связующего ЭДТ-10 и стеклоткани Т-25(ВМ)-78 [14].

Показатель	Угол армирования			
	0°	±15°	±30°	±45°
σ_p , МПа	1062	604	423	160
E_p , ГПа	53,3	48,0	30,1	31,3
$\sigma_{изг}$, МПа	1190	930	592	-
τ , МПа	52	48	35,5	21

Примечание: σ_p , $\sigma_{изг}$ и τ – прочность соответственно при растяжении, изгибе и межслоевом сдвиге; E_p - модуль упругости при растяжении

Если ремонт ПКМ выполняется с применением механического крепления, сопровождающегося механической обработкой, например, сверлением отверстий для заклепок, присоединяющих ремонтную накладку к

поврежденной детали, то учет анизотропии механических свойств ПКМ позволит избежать дефектов в виде расслоений, ворсистости кромок, сколов и т.п. в зоне вокруг отверстия как в детали, так и в накладке [1, с. 120].

Знание схемы выкладки наполнителя в ремонтируемой детали позволяет повторить ту же схему в материале накладки.

Анизотропия механических свойств ненаполненных ПМ может быть создана ориентацией полимера. Знание направления ориентации при ремонтных сварке или склеивании таких ПМ позволит выбрать правильное направление сварного или клеевого шва, чтобы восстановить несущую способность детали.

Наибольшее внимание и материаловедам, и конструкторам, и технологам при решении проблем ремонта, так же как и сборки, приходится уделять негативным механическим свойствам ПМ, таким как низкая прочность при межслоевом сдвиге и при смятии, низкая твердость, бóльшая, чем у металлов, чувствительность к концентраторам напряжений, ползучесть под постоянной нагрузкой.

Прочность при межслоевом сдвиге зависит от типа матрицы и наполнителя, метода формования и технологического режима формования детали. У полимеров, находящихся при нормальной температуре в стеклообразном состоянии, прочность при сдвиге τ приблизительно в 2 раза ниже прочности σ_p при растяжении. У стеклопластиков же τ составляет (0,35...0,40) σ_p , а у карбопластиков от 0,25 до 0,06 и даже 0,03 σ_p [16].

При испытании на межслоевой сдвиг однонаправленных эпоксидных органопластиков на основе волокна типа Kevlar 49, стеклопластика на основе алюмоборосиликатного волокна и углепластика были получены следующие значения τ : 48-69, 83 и 93 МПа соответственно.

Низкая межслоевая прочность ПКМ отражается, во-первых, на легкой повреждаемости деталей при сдвиговом или расслаивающем их нагружении. Она должна, как представляется, учитываться при выборе материала ремонтной накладки. Чтобы повысить прочность соединения накладки,

нагрузка на которую передается за счет касательных напряжений, необходимо увеличивать площадь ее сварного или клеевого соединения с ремонтируемой деталью. А это ведет к росту массы ремонтной зоны. Или требуется применять меры, способствующие увеличению межслоевой сдвиговой прочности ПМ накладки. Ориентирование армирующих волокон в слоистом ПКМ под углом $\pm 45^\circ$ способствует существенному повышению прочности при сдвиге ($\tau = 28-32$ МПа) по сравнению с ПКМ ($\tau = 19$ МПа), в котором волокна ориентированы под углом 10° к направлению нагружения [9]. Здесь наблюдается отличие влияния направления ориентации по сравнению с ПКМ на основе тканого наполнителя (см. таблицу 2.2).

Упрочнению связи слоев приформовываемой накладки из препрега ПКМ способствует повышение его монолитности. Последнее достигается увеличением давления прижима накладки к ремонтируемому участку, например, использованием пневмокамеры, груза или других известных в технологии формования деталей методов вместо только одной прикатки препрега.

В нашей работе прочность при сдвиге соединения приформовываемой накладки к полисульфоновому стеклопластику благодаря ее армированию мультиаксиальной тканью удалось повысить на 15 % по сравнению с армированием однослойной стеклотканью марки 7581-К 506 фирмы Porcher.

Прочность при сдвиге материала накладки на основе однослойной ткани можно повысить, применив предварительную прошивку пакета слоев наполнителя в направлении, поперечном плоскости слоев. При этом образуется трехмерно армированный материал, в котором прошивающие нити препятствуют распространению межслоевой трещины, а прочность при сдвиге увеличивается пропорционально количеству прошивок. Так, при числе прошивок арамидными нитями, равном 14 на 1 см^2 поверхности полиэфирного стеклопластика на основе кордной ткани, значение τ составило 52 МПа, что почти в 2 раза выше, чем у исходного ПКМ без прошивок. При

этом содержание арамидных нитей составило всего 0,5 - 2,0 % общей массы ПКМ [17].

Введением в ПКМ накладки волокнистого наполнителя, подвергнутого обработке с целью снижения дефектности или повышения его удельной площади поверхности (например, путем вискеризации) и придающего ПКМ повышенную прочность при сдвиге, можно также повлиять на характеристики клеевого соединения накладки с деталью. Из таблицы 2.3 видно, что подготовка поверхности углеродного волокна перед получением препрега может интересовать и тех, кто выбирает материал ремонтной накладки, который должен прочно соединиться методом сварки, приформовки или склеивания с дефектной деталью. Такую же зависимость от метода обработки волокон показывает прочность при сдвиге стеклопластика [2, с. 73].

Таблица 2.3

Влияние способа подготовки высокомодульного углеродного волокна на свойства однонаправленного эпоксидного углепластика [18].

Способ подготовки	ρ , кг/м ³	τ , МПа	$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	$E_{\text{изг}}$, ГПа
Замасливание при получении	1440	24	640	169
Травление в HNO ₃	1450	42	550	158
Выжигание замасливателя в азоте и пропитка эпоксидной смолой	1450	45	630	167
Вискеризация нитевидными кристаллами SiC	1460	95	590	140

Примечание: 1. Содержание волокон в ПКМ – около 60 % масс. 2. $\sigma_{\text{изг}}$ и $E_{\text{изг}}$ соответственно прочность и модуль упругости при изгибе.

Регулировать межслоевую прочность при сдвиге углепластика ремонтной накладкой можно также, используя разные типы углеродных наполнителей. Известно также, что сочетание органических волокон с углеродными может привести к повышению τ по сравнению с его значением для органопластика, хотя во внимание должно приниматься, конечно, и изменение других прочностных свойств гибридного ПКМ (таблица 2.4).

Гибридизация позволяет придать углепластику повышенную стойкость к ударам (таблица 2.5). Это может благоприятно отразиться на динамической прочности соединений накладки из ПКМ и на стойкости ее материала к незапланированным ударам инструментом, крепежными элементами, посторонними предметами и т.п. в процессе ремонта.

Таблица 2.4

Влияние массового соотношения N арамидных волокон типа Kevlar 49 и углеродных волокон типа Thornel 300 в составе ПКМ на его прочностные показатели.

Показатель	N			
	100/0	50/50	25/75	0/100
τ , МПа	26,6	29,4	32,9	40,6
σ_p , МПа	553	406	441	441
$\sigma_{сж}$, МПа	154	231	322	567

Примечание: $\sigma_{сж}$ - прочность при сжатии.

Таблица 2.5

Ударная прочность а по Изоду образцов (без надреза) эпоксидных КМ на основе различных волокон [10].

ПКМ	УП	ОП	СП	ГПКМ (75%УВ/ 25%ОВ)	ГПКМ (50%УВ/ 50%ОВ)	ГПКМ (75%УВ/ 25%СВ)	ГПКМ (*50%УВ/ 50%СВ)
а, Дж/м	1495	2562	3843	1815	2349	2349	2989

Примечание: условные обозначения: УП – углепластик; ОП – органопластик; СП – стеклопластик; ГПКМ – гибридный ПКМ; в скобках - соотношение различных волокон: углеродных (УВ), органических арамидных (ОВ) или стеклянных (СВ).

Низкая прочность ПМ при смятии при воздействии на них сосредоточенной нагрузкой со стороны металлических крепежных элементов, инструментов или других предметов, обладающих более высокой прочностью при смятии, требует учета на всех стадиях ремонтных работ: при проектировании, при выборе материалов, оснастки и режимов монтажа усиливающих накладок, осуществлении ремонта.

ПМ могут легко сминаться при воздействии на них сосредоточенной нагрузки со стороны металлических крепежных элементов, инструментов или других предметов, обладающих более высокой прочностью при смятии. При эксплуатации трехслойных сотовых панелей можно наблюдать смятие в них заполнителя, требующее его замены. Для повышения жесткости вновь устанавливаемого сотового заполнителя, например, в зоне смятия или пробоины панели целесообразно в ячейки сот заливать компаунд, наполненный микросферами. Вместо поврежденных сот можно клеивать вставку из армированного волокнами пенопласта. Если ремонт выполняется с использованием механического крепления, то, предполагая возможность смятия ПМ головками винтов или болтов, целесообразно применять последние с увеличенными размерами головок, подкладочные шайбы, распределяющие сминающее усилие на большую поверхность, или вставки, например, в виде распорных втулок из более прочного, чем ремонтная накладка, материала; выбирать заклепки и методы клепки, не требующие создания больших усилий для образования замыкающих головок.

Нельзя обходить вниманием при ремонте деталей из ПМ тот факт, что твердость у полимеров намного ниже твердости металлов, керамики, неорганических строительных материалов. У аморфных термопластов твердость по Бринеллю составляет от 130 до 170 МПа, у ПЭНП 14-25 МПа, у отвержденных реактопластов от 150 до 350 МПа, а, например, у металлов она равна сотням и тысячам МПа. Низкую твердость необходимо учитывать, например, при формулировании требований к металлическим ремонтным крепежным элементам и рабочим инструментам (отсутствие заусенцев и острых кромок) и/или к защитным слоям из ткани, бумаги, липких лент на поверхности ремонтируемых ПМ, а также к чистоте контактирующих поверхностей детали и прикрепляемой отформованной накладки. Необходимо соблюдать меры предосторожности во время ремонтных работ, чтобы не вызвать появления на поверхности ПМ царапин и вмятин, служащих концентраторами напряжений. Последнее требование

обусловлено большой чувствительностью жесткоцепных полимеров и ПМ на их основе, в том числе и ПКМ к концентраторам напряжений. Из-за отсутствия у них пластических деформаций при нормальной температуре в них не может происходить «залечивание» дефектов при нагружении (в результате релаксации напряжений в вершине растущей трещины).

Насколько чувствительны к концентраторам напряжений некоторые типы ПКМ, говорят данные таблицы 2.6.

Таблица 2.6

Прочность при растяжении (МПа) и коэффициент K_n концентрации напряжений для однонаправленных КМ на основе различных волокон и эпоксидной матрицы [11].

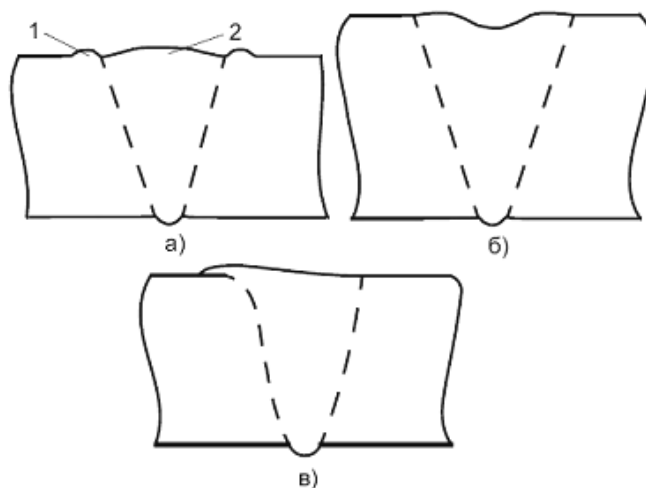
Образец	Материал волокна		
	Kevlar 49	Стекло E	Углерод
Без надреза ¹⁾	394	287	427
С надрезом ²⁾	338	201	156
K_n	1,16	1,43	2,73

¹⁾Ширина образца 25,4 мм; ²⁾Боковой разрез шириной 6,4 мм.

В анизотропных ПКМ величина коэффициента концентрации напряжений зависит не только от их состава, но и от направления нагружения. Считаться с этим фактом необходимо в первую очередь при выборе направления крепежного ряда, осуществляя механическое крепление ремонтной накладке с дефектной деталью. В случае невозможности решения проблемы конструированием соединения необходимо создавать в накладке из ПКМ изотропную структуру, менее чувствительную к концентраторам напряжений.

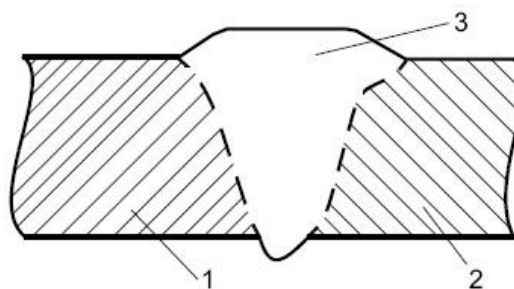
Из-за чувствительности ПМ к концентраторам напряжений рекомендуется при ремонтной сварке добиваться монолитизации материала в зоне сварного шва и плавных переходов от шва к основному материалу. Моделируя ремонт деталей из термопластов с применением экструзионной сварки соединением встык скошенных пластинок, установили, что все типичные дефекты соединения (рисунок 2.2), характеризующиеся отсутствием плавного перехода от сварного шва к основному материалу,

служат концентраторами напряжений и поэтому не могут позволить восстановить несущую способность поврежденной детали, если обратиться к методу ремонтной сварки в расплаве [1, с. 337]. При испытании на растяжение модельных образцов соединений встык гомополипропилена, у которых концентраторы напряжений не были удалены, достигли прочности на уровне 50-60 % прочности материала. При правильном выполнении экструзионной сварки, согласно данным DVS, прочность такого сварного соединения должна составить 80 % [24]. В связи с этим при отклонении формы поперечного сечения сварного шва от эталонной (рисунок 2.3) при введении с помощью экструзионной сварки вставки в пробоину детали из листового термопласта необходимо после сварки удалять увеличенные наплывы рядом со швом и чрезмерное вытекание расплава в зоне корня шва. Также нужно исключать возможность появления концентраторов напряжений при осуществлении и других методов ремонтной сварки деталей из термопластов, например, нагретым газом с присадочным материалом (рисунок 2.4) и нагретым инструментом (рисунок 2.5), вполне доступных для небольших ремонтных мастерских.



- а – перелив 1 наплавленного материала за пределы сварного шва 2;
б – неполное заполнение полости присадочным материалом; в – несимметричное перекрытие шва.

Рисунок 2.2.- Типичные дефекты при ремонтной экструзионной сварке деталей из термопластов, служащие концентраторами напряжений.



1 – деталь с пробоиной; 2 – вставка; 3 – сварной шов.

Рисунок 2.3 - Эталонная форма поперечного сечения сварного шва, изготовленного экструзионной сваркой.

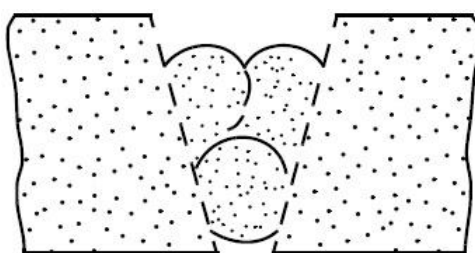
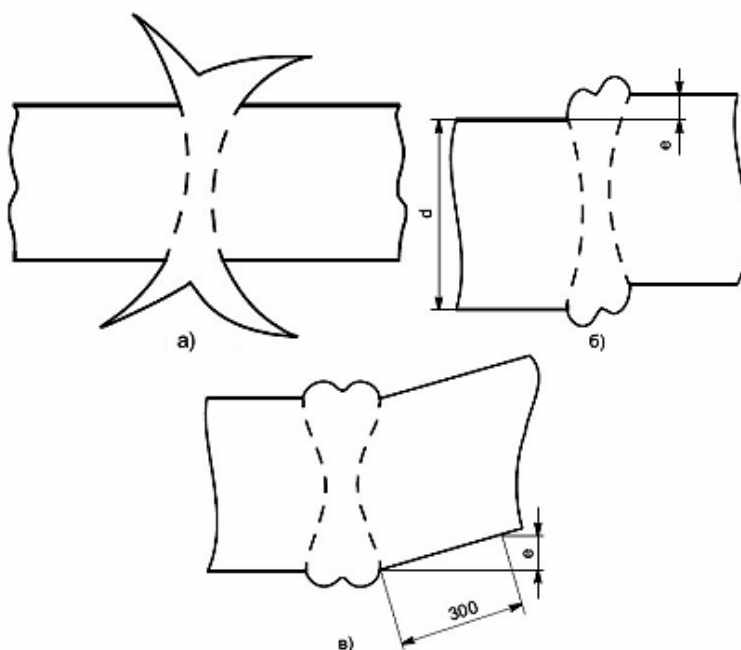


Рисунок 2.4 - Один из типичных дефектов при ремонтной сварке нагретым газом с присадочным материалом – неполное заполнение сварного шва.



а – узкий увеличенный по высоте грат; б – смещение соединяемых поверхностей, допускается $e \leq 0,1 d$; в – перекос соединяемых поверхностей, допускается $e \leq 1$ мм.

Рисунок 2.5 - Некоторые из дефектов при ремонтной сварке нагретым инструментом.

При ремонтном склеивании необходимо исключать образование не заполненных клеем участков между вставкой или накладкой и деталью. Этому способствуют такие приемы как нанесение низковязкого заполняющего неровности грунта, нанесение достаточного для протекания реологических процессов количества клея, причем на обе поверхности: детали и накладки, создание давления выше давления летучих продуктов, выделяющихся во время реакции отверждения реактивного клея и т.п.

Чтобы исключить концентраторы напряжений в виде резких переходов сечений в зоне ремонта, необходимо, например, создавать, приформовкой слоев препрега накладки сегментообразной в поперечном сечении формы.

Отсутствие при нормальной температуре пластических деформаций у конструкционных ПМ не позволяет проводить их правку и подгонку во время ремонта. Проявляя вынужденные эластические деформации, в процессе последующей эксплуатации ПМ может "проявить память" и восстановить исходную форму. Последствия такого восстановления формы легко представить.

При длительно действующих статических или знакопеременных динамических нагрузках особенно проявляются присущие термопластам вязкоупругость и кинетический характер разрушения [19]. Работающий с такими ПМ специалист должен всегда учитывать их ползучесть под нагрузкой и релаксацию напряжений. Ползучесть полимеров под постоянной нагрузкой проявляется в первую очередь в соединениях накладки с дефектной деталью механическим креплением, в которых материал подвергается сжимающему нагружению со стороны крепежного элемента. Ползучесть ПМ приводит к ослаблению затяжки болта или винта. Из термопластов наименьшей устойчивостью к ползучести характеризуются кристаллизующиеся материалы, температура стеклования аморфной фазы которых значительно ниже нормальной.

Ползучесть в заклепочных и болтовых соединениях предотвращают, применяя, как и в случае опасности смятия, распорные втулки или вкладыши из жестких ПМ или металлов.

2.3 Теплофизические свойства как влияющие на ремонт факторы

Некоторые процессы ремонта изделий из ПМ сопровождаются нагревом или ремонтируемого материала (например, при ремонтной сварке, при сверлении отверстий для крепежного элемента в результате выделения теплоты резания), или клеевого слоя при ремонте клеями-расплавами, или и того и другого при ремонте реактивными клеями горячего отверждения. Тепловому воздействию подвергаются и отремонтированные изделия в процессе их эксплуатации. В связи с этим знание особенностей тепло - физических свойств ПМ важно как для проектирования технологического процесса ремонта, так и для прогнозирования поведения отремонтированного участка.

Из-за низкой теплопроводности ПМ [ПЭНП-0,32...0,40 (для плотности 0,914...0,928), ПЭВП- 0,38...0,51 (для плотности 0,94...0,96); ПП - 0,17...0,22; ПС- 0,18; ПА 6- 0,29; ПА 66 0,23; ПК - 0,21; ПЭТ -,24; ПВХ- 0,14...0,17; Ag - 429; Cu - 403; Fe - 86,5 Вт/ м·К], не содержащих теплопроводящих наполнителей, встречаются трудности с подведением теплоты сквозь стенку детали к месту присоединения сваркой или склеиванием ремонтных накладок. При этом, чем больше толщина накладки, тем выше градиент температур по ее толщине, выше продолжительность нагрева или последующего охлаждения до заданной температуры после приварки или приклеивания ремонтного материала. В технологии ремонта с применением адгезионных соединений контроль температуры хотя бы на стадии экспериментальной разработки процесса ремонта проводится обязательно в зоне шва. Последствия градиента температуры по толщине и в плоскости соединения (особенно по большим поверхностям) могут быть

самыми различными: деструкция внешних слоев наклейки, контактирующих с нагретым инструментом, неравномерность термической усадки при последующем охлаждении зоны ремонта, образование остаточных напряжений, коробление и др.

Решить проблему требующей подведения теплоты ремонта изделий из ПМ с низкой теплопроводностью можно, применив методы нагрева, которые основаны на превращении в теплоту других видов энергии, например, механической или электрической энергии, или используя при ремонтной сварке подведение тепловой энергии от инструмента, нагретого газа, ИК - излучателя непосредственно к соединяемым поверхностям детали и наклейки. Эффективно в отверстия небольшого диаметра в деталях из термопластов вводить вставки с помощью ультразвука. Вместе с тем низкая теплопроводность ПМ может играть также и положительную роль, например, обеспечивая локальность нагрева наклейки из углепластика, присоединяемой к дефектной детали с помощью индукционной ремонтной сварки с применением аппаратуры фирмы Stevik SAS (г. Щелково, Московской области).

ПМ, за исключением наполненных углеродным волокном материалов, имеют более высокий, приблизительно в 10 раз, температурный коэффициент α линейного расширения (ТКЛР), чем металлы:

Материал	α , 1/К	Материал	α , 1/К	Материал	α , 1/К
Стекло	$5 \cdot 10^{-6}$	Сталь	$11,5 \cdot 10^{-6}$	Медь	$17 \cdot 10^{-6}$
Стеклопластик	$20 \cdot 10^{-6}$	Алюминий	$22 \cdot 10^{-6}$	ПВХ	$80 \cdot 10^{-6}$
ПВДФ	$120 \cdot 10^{-6}$	ПП	$150 \cdot 10^{-6}$	ПЭ	$200 \cdot 10^{-6}$
ПА	$110 \cdot 10^{-6}$	ПТФЭ	$180 \cdot 10^{-6}$	ПММА	$120 \cdot 10^{-6}$

Характеристики температурного расширения принимаются во внимание прежде всего при ремонте полимерной детали с применением приклеиваемой металлической наклейки или при ремонтной сварке деталей из термопластов с локальным подведением теплоты (к зоне шва). Термическая усадка клеевого слоя или материала сварного шва может

привести к появлению остаточных напряжений растяжения на границах соответственно «клеевой слой - металлический субстрат» или «сварной шов - основной материал», которые, в свою очередь, могут вызвать коробление изделия или зарождение трещин. Решают рассматриваемую проблему сближением значений ТКЛР клевого слоя и соединяемого материала, а также более длительным (по возможности) поддержанием клевого слоя в легко деформирующемся состоянии с целью более полной релаксации остаточных напряжений. При введении сваркой встык вставки в отверстие листовой детали из термопласта предпочтение нужно отдавать симметричному X-образному шву, нежели V-образному, чтобы создать симметричное поле термических напряжений. Рекомендуется также предварительно нагревать детали, а после ремонтной сварки производить отжиг сварного изделия с целью релаксации напряжений.

Для прогнозирования поведения деталей из ПМ в условиях ремонта и эксплуатации отремонтированного изделия необходимо иметь данные об их деформационной теплостойкости, которая, например, у трехслойных панелей с наполнителем в виде пенопласта определяется деформационной теплостойкостью последнего.

Показатели термоустойчивости ПМ зависят от длительности выдержки при заданной температуре и природы рабочей среды. О поведении ПМ при длительном воздействии повышенных температур в процессе выполнения ремонта нельзя судить по результатам кратковременного испытания, так как здесь играют роль процессы старения и релаксации, зависящие от их продолжительности. Да и показатели термоустойчивости, найденные различными методами кратковременных испытаний, могут быть неодинаковыми [20].

2.4 Другие свойства

ПМ, за исключением углепластиков, имеют такие электрические характеристики, что отношению к ним во время ремонта нельзя применить

резистивный нагрев. Электропроводимость углепластиков на основе термопластичных матриц позволяет для соединения наклейки из этого ПКМ с ремонтируемой деталью также из углепластика применить электроконтактную сварку или индукционную сварку, подобно тому как они осуществляются при сварке металлов.

На процессах ремонта изделий и на возможности восстановить их несущую способность отражаются специфические химические свойства ПМ и способность сопротивляться воздействию окружающей среды. Одним из таких свойств является растворимость в органических растворителях. При очистке поверхности ремонтируемого ПМ перед склеиванием или сваркой нужно обращать внимание на то, чтобы выбранный для этого растворитель не вызывал набухания материала деталей. В то же время для упрочнения связи клеевого слоя со склеиваемым, например, термопластичным ПМ желательно присутствие в клее растворителя матричного термопласта. Растворимость термопластов и высокая вязкость растворов сделали возможной ремонтную их сварку методом, который типичен только для ПМ и назван сваркой растворителем [1, с. 424].

Специфическим физико-химическим свойством ПМ служит их липкость в размягченном состоянии. Липкость может быть у ПМ при нормальной температуре постоянной [21] или может активироваться растворителем. Это свойство используется для фиксирования пленочного клея на поверхности ремонтируемой детали и учитывается при создании антиадгезионных покрытий сварочных инструментов для ремонтируемых сваркой ПМ, упаковки для клеев и приспособлений для нанесения клеев-расплавов и т.д.

Гальваническая несовместимость карбопластиков с металлами может быть причиной контактной анодной коррозии металлических крепежных элементов, соединяющих этот КМ, при влажности окружающей среды, достаточной для образования пленки электролита. Если сочетание алюминия с углепластиком в ремонтируемом изделии исключить не удастся,

то применяют защиту металла, например, прокладками из стеклопластика или герметика.

В матрице ПМ как после формования деталей, так и после образования соединения могут проходить вторичные химические реакции под влиянием факторов окружающей среды (нагрева, кислорода воздуха, излучений и т.д.) и оставшихся в материале катализаторов или инициаторов. Окружающая среда может воздействовать как на объем, так и на поверхность ПМ, влияя на соответствующие их свойства. Превращение линейной структуры поверхностного слоя термопласта в сетчатую при воздействии УФ-излучения затрудняют или вовсе исключают ремонтную сварку в расплаве. Деструктивные же процессы, протекающие в полимерной фазе клеевого слоя при длительном его старении в атмосферных условиях, могут быть причиной пониженной прочности клеевого соединения.

Поглощение влаги ремонтируемым ПМ или материалом клеевого слоя может резко изменить их соответственно технологические и/или физико-механические свойства (см выше раздел 2.1).

В таблице 2.7 приведены данные о водопоглощении G до насыщения основных видов термопластов [22].

Оказывая пластифицирующее действие на клеевой слой, вода может вызвать повышение прочности клеевого соединения при нормальной и пониженной температурах и в то же время отразиться на понижении его теплостойкости.

Если ориентироваться на применение в ремонтных работах лазерного излучения (например, для наплавки ПМ, для приварки или приклеивания накладки на дефектную деталь) или УФ - излучения (для отверждения клеев), то необходимо принимать во внимание оптические свойства ПМ. Чтобы подвести лазерное излучение сквозь стенку накладки при соединении ее с деталью, ПМ накладки должен быть прозрачным. Для присоединения накладки из материала с низкой прозрачностью можно применить волоконные лазеры с большей длиной волны излучения [23].

Таблица 2.7

Водопоглощение G до насыщения основных видов термопластов [22].

Термопласт	G на воздухе (T= 23 °C, φ ¹⁾ = 50 %), %	G в воде(T=23 °C), %
ПЭНП		0,002-0,2
ПЭВП		0,002-0,2
ПП		0,02
ПС		0,2-0,3
АБС		0,7
ПММА		1,6-2,0
ПОМ	0,3	0,6
ПК	0,2	0,4
ПЭТ	0,35	0,5-0,7
ПЭТ СВ 33	0,2	0,25
ПСН	0,25	0,6
ПБТ	0,45	0,45
ПБТ СВ 33	0,1-0,2	0,1-0,2
ПА 6	2,8-3,6	9-10
ПА 66	2,5-3,5	7,5-9,0
ПА 68	3	4,0-4,5
ПА 610	1,5-2	3-4
ПА (сажа)	2,3-2,7	7-8
ПА 6 СВ 30	1,5-2	6
ПА 66 СВ 30	1-1,5	5,5
Ненасыщ. ПЭФ	-	0,4
Ненасыщ. ПЭФ СВ	-	0,5-2,5
ЭС	0,5-0,8	0,7-1,5
ПИ	1,2	3

¹⁾Относительная влажность.

Большинство матриц ПМ, не содержащих в своем составе антипиренов (ПЭ, ПП, ПС, ПК, ПММА, эпоксидные полимеры, полиэфирные пластики и др.) относятся к горючим материалам и имеют значение кислородного индекса не выше 40 %. В связи с этим при выполнении ремонта деталей из ПМ нельзя применять (по крайней мере, в течение длительного времени) открытое пламя.

Технологической спецификой ПМ является их усадка, характеризуемая отклонением размера деталей от соответствующих размеров формообразующей оснастки. Причиной усадки является охлаждение детали от температуры формования до нормальной температуры, процесс отверждения реактопласта, кристаллизация частично кристаллизующихся термопластов. В процессе ремонта термической усадке может подвергаться, например, ПМ ремонтной накладки, которая приваривается или приклеивается с применением нагрева. Если накладки присоединяются к тонкой ремонтируемой детали, то их усадка может привести к короблению последней или к возникновению остаточных напряжений в зоне шва. Причины этих явлений затронуты в разделе 2.3. Исключить негативное влияние усадки во время ремонта можно применением фиксирующих или зажимных приспособлений.

Во многих случаях выполнения ремонта на практике приходится давать комплексную оценку ремонтпригодности ПМ. Чем большее число материаловедческих факторов будет учтено на стадиях проектирования ремонта и разработки его технологического процесса, тем больше оснований ждать восстановления несущей способности изделия из ПМ.

Список использованных источников

1. Комаров Г.В. Соединения деталей из полимерных материалов: Учебное пособие.- СПб.: Профессия, 2006.- 592 с.
2. Симонов-Емельянов И.Д., Кулезнев В.Н. Основы создания композиционных материалов: Учебное пособие.- М.: МИХМ, 1986.- 86 с.
3. Vikermann J.J. Effekt of impurities on polyethylene adhesion// Appl. Chem.- 1961.- V. 11. – P. 81-85.

4. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974.- С. 370.
5. Sächting Kunststoff-Taschenbuch / 30. Ausgabe von E. Baur, S. Brinkmann, T.A. Osswald und E. Schmachtenberg.- München: Carl Hanser Verlag, 2007.- S. 533.
6. Артемов П.Г., Шпак Г.З., Флик А.Р. Значение поверхностного слоя для механических свойств изделий из пластмасс монолит № 1 и волокнит// Пласт. массы.- 1960.- № 12.- С. 19-20.
7. Rasche M. Problematik der Prüfung von Polymer-Metall-Verbunden im Zugscherversuche// Adhäsion.- 1986.- Bd. 30, Nr. 10.- S. 10, 13-14, 16-18.
8. Callister W.D. Materials science and engineering. An Introduction.- N.-Y.: Wiley & Sons, Inc., 1997.- P. 530.
9. Adhesion and Bonding in Composites/ Ryotoku Yosomiga...[et al.]- N.-Y.: Marel Dekker, Inc.; 1989.- P. 347.
10. Handbook of Composites. Ed. S.T. Peters. 2 –nd Ed. – L.: Chapman & Hall, 1987.- P. 209.
11. Composites.- 1985.- V. 26, No. 5.- P. 21-26.
12. Wilken R. Probleme bei der Verklebung veredelter Oberflächen// Allgemeine Papier Rundschau.- 1986.- Nr. 42 – S. 1490, 1492-1495.
13. Царахов Ю.С. Конструирование соединений элементов ЛА из композиционных материалов (адгезионные соединения): Учебное пособие.- М.: МФТИ, 1980.- С. 51-53.
14. Неопубликованные данные, полученные в МАТИ.
15. Neto J.A.B.P., Campilho R.D.S.G., da Silva L.F.M. Parametric study of adhesive joints with composites// Int. J. Adhes. And Adhes. [Электронный ресурс]. – 2012.- V. 37.- P. 96-101.
16. Sturgeon J.B. Joints in carbon-fibre-reinforced plastics// Composites.- 1971.- V. 2, No. 6.- P. 104-109.
17. Повышение межслоевой прочности полиэфирных стеклопластиков путем их прошивки арамидными волокнами/ Ф. Раденков, М. Раденков, А. Маринова и др.// Пласт. массы.- 2003.- № 10.- С. 40-42.

- 18.Кобец Л.П., Гуняев Г.М. Карбоволокониты. В кн.: Пластики конструкционного назначения (Реактопласты)/ Под ред. Е.Б. Тростянской.- М.: Химия, 1974.- С. 213-215.
- 19.Спормакер Я.Л., Хайдвайлер А.Х. 10 примеров для понимания механических свойств полимеров// Полимерные материалы.- 2005.- № 9(76).- С. 14-18.
- 20.Sächtling Kunststoff-Taschenbuch/ 30. Ausgabe von E. Daur, S. Brinkmann, T. A. Osswald und E. Schmachtenberg.- München: Carl Hanser Verlag, 2007.- S. 121.
- 21.Encyclopedia of Polymer Science and Technology/ Ed. Herman F. Mark, Jacque Liney Kroschwitz .- N.-Y.: John Wiley & Sons? Inc., 1985.- P. 509-511.
- 22.Sächtling Kunststoff - Taschenbuch. 27 Ausgabe von K. Oberbach.- München-Wien: Carl Hanser Verlag, 1998. -S. 657.
- 23.Hoult T. 2 UM fiber lasers for welding of optically clear polymers. Тез. [ANTEC 2012: Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (SPE), Orlando, Fla, 2-4 Apr., 2012]// Plast. Eng.- 2012.- V. 68, No. 2.- P. 47.
- 24.Taschenbuch DVS-Merkblätter und –Richtlinien. Fügen von Kunststoffe. 13., überarbeitete und erweiterte Aufl. 2010.- Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2010.- S. 281.

Глава 3 Методы обнаружения и анализ дефектов в сварных изделиях из ПМ

В современной сварке ПМ, получившей высокое развитие в индустриально развитых странах Запада и в первую очередь в ФРГ, применяют все виды технического контроля [1]. Объектами контроля являются: свариваемые и присадочные материалы, вспомогательные материалы (например, растворители), свариваемые детали, техническая документация, оборудование, оснастка, условия окружающей среды, технологический процесс, средства защиты персонала, готовая продукция (сваренное изделие) [2]. Несоответствие продукции установленным требованиям независимо от того, о каком показателе качества, количественном или качественном, идет речь, дает основание считать продукцию дефектной. По месту расположения дефекты разделяют на поверхностные (наружные) и внутренние, по происхождению – на конструкторские, производственные и эксплуатационные. По степени влияния дефекта на эффективность и безопасность использования продукции с учетом ее назначения, устройства, показателей ее качества, режимов и условий эксплуатации все дефекты подразделяют на критические, значительные и малозначительные. В германском нормативном документе [2] дефекты сварных изделий по степени их допустимости подобным образом разделены на три ступени (см. ниже).

Контроль качества с целью обнаружения дефектов является неотъемлемой частью не только любого процесса изготовления изделий, но и проводится при аварийных ситуациях и в процессе эксплуатации ответственных изделий и конструкций как из ПМ, так и из других материалов. Контролируют как сами детали, входящие в изделие, так и их соединения. Расширение производства изделий из ПМ и в первую очередь из ПКМ, характеризующихся высокой стоимостью, роль контроля, имеющего важное значение в системе обеспечения высокого качества продукции, возрастает. Повышение качества изделий и снижение брака приводят к

существенной экономии материальных ресурсов и затраченного труда и времени, особенно в развивающихся странах, к которым относится, в частности, Мьянма. Поэтому несмотря на значительные затраты, связанные с осуществлением мероприятий по контролю производственных процессов и готовых изделий, происходит постоянное развитие существующих методов контроля и разработка новых, стремление к проведению контроля на всем этапе жизни изделия.

Методы контроля качества деталей и соединений деталей из ПМ практически одинаковые и с их помощью обнаруживают одни и те же дефекты. Поэтому опыт контроля в одной из указанных областей может быть с успехом перенесен на другую. Большие различия могут быть отмечены при переходе от контроля деталей из гомогенных ПМ к деталям из гетерогенных ПМ, в частности, из ВПКМ¹⁾.

Сварные соединения в различных изделиях и в первую очередь в трубопроводах, работающих в условиях действия больших нагрузок, жидких и газообразных сред, перепадов давлений, требуют обязательного так называемого сплошного контроля качества. Применительно к сварным изделиям под сплошным контролем необходимо понимать контроль каждого сварного шва. Пропуск дефекта у ответственных сварных изделий недопустим.

3.1 Контроль качества сварных соединений

Цельная система контроля в области сварки независимо от типа свариваемого материала включает несколько видов контроля [3]:

- контроль проектной и технологической документации; он определяет порядок подготовки сварки на основе обобщения теоретических представлений и экспериментальных данных;

¹⁾Аунг Тху Хан, Комаров Г.В. Методы обнаружения и анализ дефектов в сварных изделиях из полимерных материалов//XL Гагаринские чтения. Научные труды Междунар. молодежной научной конф. в 9 томах. Москва, 7-11 апреля 2014 г.- М.: МАТИ, 2014. Т. 1., С. 10-11.

- контроль исходных материалов;
- контроль подготовки деталей к сварке;
- контроль процесса сварки (производственный контроль); он может быть активным или пассивным. Результаты активного контроля используют для непрерывного управления технологическим процессом сварки и может влиять на этот процесс, определяя выбор рациональной технологии и соблюдение заданных параметров с указанием причин отклонений от них. Пассивный контроль заключается в выявлении дефектов в изделиях, в частности, в сварных швах и исключении недоброкачественных изделий из дальнейших этапов производства или их использования. Его результаты эпизодически используют для управления технологическим процессом.

- контроль качества сварных швов;
- контроль квалификации сварщика.

Применительно к сварке ПМ эти виды контроля в комплексном представлении стали разрабатываться лишь в последние годы благодаря усилиям, прежде всего германских специалистов. Но, тем не менее нет ни одного способа контроля, который позволял бы делать вывод о работоспособности сварного соединения при всех возможных комбинациях различных видов нагружения. В российской литературе по сварке ПМ достаточно детально рассмотрены вопросы контроля наиболее распространенных видов сварных соединений [4, с. 231] и испытания сварных конструкций, в первую очередь трубопроводов [4, с. 264].

Наибольшее количество нормативных документов по методам контроля сварных соединений выпущено в Германии, а из этих методов наибольшее внимание, как и в российской литературе, уделено контролю стыковых сварных соединений труб (таблица 3.1) [2;5, с. 42].

К проблеме ремонта разрушающий контроль, вероятно, не имеет прямого отношения. Испытав сварное соединение, можно лишь сказать, удовлетворяет оно или не удовлетворяет требованиям. Ремонтировать его после

разрушающего испытания никто пока не собирался. Однако разрушающие испытания могут быть использованы для оценки эффективности ремонта.

Таблица 3.1

Виды разрушающего и неразрушающего контроля стыковых сварных соединений труб и плит из термопластов.

№№ п/п	Разрушающий контроль	
	Кратковременные испытания	Длительные испытания
1.	Испытание на кратковременную прочность при растяжении (в соответствии с DVS Merkblatt 2203-2 и DIN 53455)	Испытание при действии внутреннего давления (в соответствии с DIN 5075, часть 1 и DVS-Merkblatt 2207)
2.	Испытание на изгиб (в соответствии с DIN 53452 и DVS-Merkblatt 2203)	Испытание при одноосном растяжении (в соответствии с DVS-Merkblatt 2203-4, Beiblatt 1 и DIN 53444)
3.	Испытание при изгибании (в соответствии с DIN 50121 и DVS-Merkblatt 2203 и DVS-Merkblatt 2207)	Испытание при вдавливании шарика (в соответствии с DIN 53449) или штифта (в соответствии с DVS-Merkblatt 2203)
4.	Испытания на удар (в соответствии с DIN 53448 и DVS-Merkblatt 2203)	
5.	Испытания на удар при изгибе (в соответствии с DIN 53453 и DVS-Merkblatt 2203)	
Неразрушающий контроль		
6.	Визуальный контроль	
7.	Ультразвуковой контроль	
8.	Испытание при просвечивании рентгеновскими или радиоактивными лучами	
9.	Термография	
10.	Оптический контроль	
11.	Голография	
12.	Метод светового сечения	

Единого мнения относительно действенности того или иного метода разрушающего испытания нет. Некоторые авторы [6] считают, что использование кратковременных испытаний при растяжении особенно по отношению

к частично кристаллическим термопластам для оценки качества сварных соединений мало или совсем непригодно. Другого мнения придерживаются в работе [7]. Более того считают, что испытание при растяжении в первую очередь сварных изделий, например, отрезков сварных труб позволяет получить информацию о более широком круге дефектов, чем при использовании других методов контроля (таблица 3.2).

Таблица 3.2

Сравнительная оценка различных методов контроля качества стыковых сварных соединений, изготовленных сваркой нагретым инструментом.

№№ п/п	Вид дефекта и нарушение технологии	Метод контроля							
		Испы- тание давле- нием (герме- тич- ности)	Ультразву- ковой конт- роль	Рентге- нов- ский конт- роль	Испыта- ние при длитель- ном действии внут- реннего давления	Испы- тание на продав- ливание	Испы- тание при изги- бании	Испы- тание при растя- жении образ- цов	Испыта- ние при растя- жении об- разцов сварных труб
1	Отклонение режимов сварки (температура, давление, время) на $\pm 20\%$	н	н	н	н	н	чо	чо	чо
2	Инородные включения в зоне шва (песчинки)	н	о	о	н	чо	чо	о	о
3	Жировые загрязнения соединяемых поверхностей	н	н	н	н	чо	о	о	о
4	Смещение свариваемых кромок	н	чо	н	н	н	о	о	о

Условные обозначения: н – дефекты и нарушения не обнаруживаются; чо – дефекты и нарушения можно установить лишь при определенном положении и размере дефектов; о – дефекты обнаруживаемые.

Условно пригодным рассматривают часто применяемый на практике метод испытания на изгибание в соответствии с нормами DVS-Merkblatt 2203 и DVS-Merkblatt 2207. Причем этот метод не дает данных для расчета

сварных соединений. Более определенно о качестве сварных соединений можно говорить после испытания на удар при изгибе или растяжении, так как в этом случае по сравнению со статическим испытанием ввиду высокой скорости нагружения исключается возможность вытяжки материала и его упрочнения.

Одним из наиболее пригодных скоростных методов разрушающего контроля считают [8] измерение удлинения ϵ материала шва основного материала и сравнение его с ϵ основного материала. К качественным относят соединения, у которых отсутствует хрупкое разрушение и у которых шов и основной материал имеют близкие значения ϵ [9].

Длительные испытания требуют больших затрат, возрастающих с увеличением размеров трубы, и характеризуются большой продолжительностью ($>10 \cdot 10^3$ ч).

Общим недостатком разрушающих методов контроля является возможность проведения только выборочных испытаний. Поэтому пытаются использовать неразрушающие методы контроля (см. таблицу 3.1), которые позволяют исследовать каждый шов. Относительно возможностей методов неразрушающего контроля нет единого мнения.

В соответствии с требованиями нормалей DVS 2206 и DVS 2207, созданных в Немецком союзе сварщиков (DVS), сварные швы трубопроводов должны подвергаться из числа неразрушающих методов визуальному, ультразвуковому и рентгеновскому контролю [10].

Многолетний опыт применения в Бельгии сварки при изготовлении газопроводов из ПЭВП показал, что контроль процесса сварки и качества соединений по форме и размеру наплывов достаточно надежен и может вестись визуально. Применение же радиографического контроля, голографии, ультразвука неэкономично и в условиях стройки преимуществ не дает [11]. При визуальном контроле каждого шва следят за тем, чтобы наплывы в момент соединения по обеим сторонам были по возможности круглыми, оба наплыва были приблизительно одинаковых размеров, $k > 0$ (рисунок 3.1) [11]

и поверхность швов была гладкой, без повреждений, с незначительной волнистостью и без перекрытия напылами [12].

При сравнении результатов разрушающего и неразрушающего контроля стыковых сварных соединений ПЭ-труб размером 125x11,4 мм установлено [12], что визуальный контроль и контроль размеров хотя и дают некоторую информацию о качестве швов, однако не устанавливают связи между их прочностью и наличием дефектов. По опыту фирмы Mein-Gaswerke AG (ФРГ) хороший вид сварочного напыла не означает, что качество сварного соединения высокое [7]. Поэтому эта фирма считает, что визуальный контроль не имеет большого значения.

Из-за слабого поглощения термопластами рентгеновских лучей при рентгеновском контроле изделий из термопластов необходимо использовать только мягкую область спектра. Этим методом обнаруживают дефекты с минимальной шириной в направлении лучей 5-10 % толщины деталей [6] и в перпендикулярном направлении до 0,05 [6] – 0,1 мм [6]. Рентгенографию применили для изучения реологических процессов, протекающих при сварке встык нагретым инструментом [13]. Для этого в поверхностный слой соединяемой детали вводили рентгеноконтрастный порошок, например, из молибдена с последующим анализом его распределения после сварки. Установлено, что пленка оксидированного во время технологической паузы ПМ выдавливается в напыл.

Рациональность УЗ-контроля сварных труб обусловлена тем, что данный метод позволяет контролировать трубы со скоростью, совместимой с высокими темпами укладки трубопроводов [14]. При одностороннем контроле обнаруживают дефекты на глубине до 15 мм, а при двухстороннем – до 30 мм [6]. Возможности УЗ-контроля эхо-методом расширились с разработкой датчиков, имеющих угол отклонения луча 70° [10] и позволяющих получать больше информации о дефектах в шве. Этим методом можно определить разрывы в материале шириной до 1 мм [10]. Минимальная длина обнаруживаемых рисок, раковин и включений для большинства ПМ составляет 1-3 мкм

[6]. Угловой головкой можно контролировать швы в месте приварки патрубка к трубе, однако при этом должна быть достаточной длина заплечика у патрубка [15].

Недостатком УЗ-контроля является то, что этот метод не позволяет получить данные об изменениях структуры ПМ и обнаружить дефекты, например, в виде мест «отсутствия сцепления» («зеркального шва», или «холодной сварки»)[16], не дающих граничных эффектов. Так же, как и с помощью рентгеновского контроля, по данным УЗ-контроля нельзя судить о прочности и долговечности сварных соединений.

В термографическом методе контроля используют эффект различной теплопроводности у различных материалов. Распределение температуры по поверхности объекта определяют с помощью жидких кристаллов или термовизора. Высокую оценку термографический метод контроля соединений композиционных материалов получил в работе [17]. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля отомечен целый ряд его преимуществ: он очень скоростной в отношении применения и анализа результатов; бесконтактный; дающий изображение контролируемого участка; на одном снимке получают большую контролируемую область; в его активной форме можно применить большое число вариантов возбуждения. При термографировании с помощью ИК – камеры получают изображение области теплового излучения от поверхности контролируемого объекта. Длина волны измеряемого электромагнитного излучения от поверхности объекта при обычных производственных технологиях лежит в пределах от 1 до 12 мкм. Благодаря калибровке ИК-камеры и при известной степени излучения различных поверхностей можно определить распределение температуры контролируемого объекта. В работе [18] показано, что с помощью жидких кристаллов можно внутри шва плит из ПВХ обнаружить газовые и инородные включения, а также трещины диаметром до 4 мм и длиной 2 мм при глубине залегания 3 мм. Но в то же время считают, что для

полимерных труб этого недостаточно. Более мелкие дефекты обнаруживают с помощью ИК-камеры [9].

Продолжаются попытки разработать методы обнаружения «зеркального» шва. Исследователи из ЦНИИСпецмаш (г. Хотьково, Московская область) исследовали возможности обнаружения указанного дефекта методом ультразвуковой термографии [19]. Метод основан на том, что если в материал ввести достаточно мощные УЗ-колебания, то вибрация материала в области дефекта (особенно «зеркального» дефекта) приводит к взаимным перемещениям стенок дефекта. Это в результате трения вызывает их нагрев. Температурное поле локализуется в области дефекта, по анализу которого можно определить его расположение и характеристики. Образующееся температурное поле регистрируется с помощью специальной телевизионной техники. Анализ экспериментальных данных показал, что возможно выявление дефектов на расстоянии до 150-350 мм от точки ввода УЗ-колебаний в зависимости от материала, мощности УЗ-колебаний и т.п. Установлено, что чем меньше раскрытие дефекта (чем больше дефект закрыт), тем лучше его выявляемость.

Голография относится к прецизионным методам контроля. Она, как и метод светового сечения, основан на фиксации возникающего под действием механических или термических нагрузок удлинения ПМ. Это удлинение может служить показателем качества сварного шва [6]. Методом голографии в лучах лазера в результате интерференции световых лучей на поверхности контролируемого изделия выявляются по смещению интерференционных полос самые незначительные различия в деформировании основного материала и материала шва. Эти различия могут быть вызваны скрытыми дефектами сварных швов. Основными достоинствами метода голографии являются:

- отсутствие разрушений;
- близкие к рабочим условия испытаний;

- возможность обнаружения дефектов на участках шва, где контакт поверхностей есть, а сцепления, т.е. сварки нет;
- высокая чувствительность;
- независимость от состояния поверхности и геометрии контролируемого объекта.

При количественном анализе результаты измерения величины и направления смещения каждой точки поверхности обрабатываются с помощью ЭВМ. При этом вычисляются шесть факторов, наносимых на шестикоординатную диаграмму. По площади образовавшегося шестиугольника можно оценить качество шва. Причем обнаружено совпадение результатов такого контроля с результатами испытаний на трещиностойкость сварного соединения [9]. В работе [20] сделан вывод, что использование голографического контроля качества сварных соединений ПМ при нагружении трубчатых образцов внутренним давлением позволяет выявить дефекты и участки пониженной прочности в кольцевых сварных швах.

Голографический контроль требует применения очень чувствительной аппаратуры, реагирующей на смещение 0,2 мкм, требует установки аппаратуры в месте, где практически полностью отсутствуют колебания, и поэтому для условий строительства непригоден. Кроме того, этот метод не дает информации о точном положении дефектов и их величине, а также о причине их появления.

В противоположность голографии при контроле методом светового сечения для получения заметных деформаций необходимы более высокие нагрузки. Поэтому метод нечувствителен к колебаниям. Метод основан на телевизионной съемке деформации поверхности объекта, находящегося под нагрузкой. Сравнение по отдельным точкам контура поверхности ненагруженного и нагруженного сварного изделия позволяет сделать вывод о качестве сварного шва. Установлено, что малым радиальным деформациям соединений труб под нагрузкой соответствует их высокая долговечность и наоборот [6].

В цитируемых источниках по контролю качества сварных соединений отсутствуют сведения о технологии устранения дефектов сварных швов. Чаще всего указывается на необходимость строгого соблюдения режимов и условий сварки, что способствует предотвращению появления дефектов [4, с. 232-234]. Описанию дефектов сварных соединений ПМ посвящены другие работы.

3.2 Анализ дефектов сварных соединений¹⁾

В передовых в техническом отношении странах данные относительно дефектов сварных соединений деталей из термопластов в результате длительной систематизации пытаются обобщить и оформить в виде нормативных документов [2].

Вместе с этим их изучение и исследования по предупреждению и устранению дефектов не прекращаются. Анализ этих данных представляет интерес не только для сварочной науки Мьянмы.

В указанном нормативном документе Германии приведенные данные касаются в основном визуальной оценки дефектности сварных соединений, но также использованы результаты других методов испытания.

Новые ПМ могут иметь отличающиеся по свойствам сварные соединения (например, по форме наплыва). Когда свариваются разнородные ПМ (например, ПЭ 80 и ПЭ 100) или ПМ с заметно более высоким индексом расплава, этот факт необходимо принимать во внимание. Если при изготовлении сварных соединений определенные дефекты должны быть исключены или ограничиваться, то можно прибегнуть к разделению их на группы в зависимости от уровня требований к качеству сварных соединений. Материалом для анализа послужили описания дефектов в немногочисленных публикациях [2,4,21,22], сделанных специалистами, обладающими необходимым опытом сварки ПМ.

¹⁾Аунг Тху Хан, Комаров Г.В. Анализ дефектов сварных соединений полимерных материалов// Новые материалы и технологии – НМТ-2012. Материалы Всерос. н.-т. конф. Москва, 2012 г. – М.: МАТИ, 2012.- С. 108-109.

Дефекты, встречающиеся при выполнении основных методов сварки в расплаве, сведены в таблицы (см. ниже). К этим методам отнесены: сварка нагретым инструментом встык, сварка нагретым инструментом в раструб с помощью муфты, терморезисторная сварка закладным элементом, сварка нагретым газом с присадочным материалом, экструзионная сварка, сварка инфракрасным излучением встык. Приведенные по видам дефектов данные справедливы для основных свариваемых в расплаве термопластов: полиэтилена (PE63, PE80 и PE100), сетчатого полиэтилена (PE-X), гомополипропилена (PP-H), блоксополимера пропилен (PP-B), привитого сополимера пропилен (PP-R), хлорированного поливинилхлорида, поливинилиденфторида. На сварные соединения ТКМ, на наш взгляд, их распространить в основном нельзя.

Можно согласиться с делением дефектов в зависимости от степени их допустимости и их влияния на свойства соединения на три группы [2, S. 12]: I – группа (дефекты допустимы для соединений с высокими требованиями к надежности или нагружаемости); II – группа (дефекты допустимы для соединений со средним уровнем требований к надежности или нагружаемости), III – группа (дефекты допустимы для соединений с низкими требованиями к надежности или нагружаемости). Критериями для разделения дефектов на группы по их допустимости авторами работы [2] послужили:

- условия производства (мастерская, стройка, искусственные условия);
- возможные опасности (например, газы, влияющие на воду жидкости);
- дополнительные требования (возможность использования в системах водо-, тепло- и газоснабжения);
- поведение материала (например, вязкое, хрупкое)
- сменяемость продукции;
- вид нагрузки (например, статическая или динамическая).

Чтобы определиться, к какой группе отнести тот или иной дефект сварных соединений, без дополнительных экспериментов, по всей

видимости, обойтись нельзя. Приведенные критерии носят общий характер. Отсутствие конкретики в указанных критериях не позволяет и дать заключение о возможности устранения дефектов, например, ремонтной сваркой. Перед началом сварочных работ рекомендуется изготовить опытные сварные соединения, чтобы определить, какой уровень их качества можно достичь, используя труд конкретного сварщика и данный сварочный аппарат в конкретных условиях указанных работ. Естественно, вопрос допустимости того или иного дефекта в конечном виде решается конструктором (проектировщиком) для каждого конкретного изделия. Общие, приемлемые для всех видов сварных изделий рекомендации по допустимости того или иного дефекта создать просто невозможно. Однако попытки, каким-то образом систематизировать в первом приближении дефекты сварных соединений деталей из ПМ, следует признать своевременными и востребованными. Взяв за основу разработанную классификацию дефектов, можно выполнять дальнейшее углубленное исследование их допустимости применительно к конкретным группам сварных изделий, делать выводы о методах их предотвращения или устранения.

В настоящей работе впервые в российской сварочной науке проведен анализ типовых дефектов сварных соединений гомогенных ПМ, изготовленных наиболее распространенными методами сварки в расплаве. При этом название дефектов и их описание уточняли в соответствии с российской терминологией [23, с. 331] и представлениями о сущности того или иного вида сварки. Во многих случаях дефекты обозначены ранее не встречающимися терминами.

О влиянии рассмотренных ниже дефектов на сопротивление сварных соединений изменению формы в зоне шва, например, при растяжении или изгибе обобщенные данные в литературе пока отсутствуют. Нельзя ничего сказать и о стойкости дефектных сварных соединений к действию химически активных сред. Эти сведения, конечно же, можно получить только по отношению к конкретному изделию и конкретным условиям его работы.

Если в некоторых случаях приходится проводить дополнительную механическую обработку готового сварного изделия, то оценивать влияние дефекта на свойства сварного соединения необходимо проводить после этой обработки. Иная оценка влияния дефектности должна даваться, если один вид дефекта сочетается с другим видом.

Приведенная оценка влияния дефектов на свойства сварных соединений сопоставлялась в основном с литературными данными и с заключениями экспертов.

С указанным выше делением дефектов на недопустимые, имеющие местное ограничение и условно допустимые считали возможным согласиться, так как подобным же образом классифицируются дефекты сварных соединений металлов [3].

Если в результате оценки дефектов установлено, что они относятся к недопустимым, в протоколе испытания можно отметить, что они подлежат устранению с применением ремонта или требуется изготовление нового сварного соединения. Может даже встать вопрос о возможности использования всего изделия, например, сосуда или участка трубопровода. Результаты такого исследования документируются и передаются потребителю. На основании этих данных решается вопрос о санировании. Если твердо установлено, что дефект не входит в число недопустимых ни в одну из трех групп, компетентный специалист может предложить при согласии потребителя использовать сварное изделие при другой подходящей нагрузке или высказать прогноз о потенциале опасности его использования. Решение специалиста подтверждается расчетами или соответствующими испытаниями.

Дефекты могут быть отнесены к имеющим местное ограничение и считаться допустимыми, если они в зависимости от размера и интенсивности нагружения изделия не оказывают никакого значительного или только незначительное влияние на его пригодность к применению. Поскольку они

укладываются в пределах допусков указанных выше трех групп, эти дефекты выделены на основе обобщенного опыта.

Под условно допустимыми дефектами необходимо понимать значительные отклонения против всеобщих признанных правил, которые, собственно, встречаются не в самих сварных соединениях. К условно допустимым дефектам причисляют также дефекты сварных соединений коротких заготовок, неправильно подготовленных к сварке.

В общем виде компетентный специалист при оценке дефекта должен по представленным таблицам решать, установленное состояние сварного состояния влияет на процесс сварки или определено на основе других требований.

Для каждого вида сварки ПМ характерны свои специфические дефекты. Вид дефекта может также изменяться в зависимости от конструкции соединения, которая зависит от типа изделия.

3.2.1 Дефекты соединений встык, изготовленных сваркой нагретым инструментом

Большинство из указанных в таблице 3.3 (см. Приложение 1) дефектов соединений, изготовленных сваркой нагретым инструментом встык, может

быть выявлено визуальным контролем. В большинстве случаев он основан на оценке формы и размеров сварного шва (см. №№ 6-8), на обнаружении трещин, пузырей, вздутий и надрезов на его поверхности и в околошовной зоне (см. дефекты №№ 1-3,9, а также смещений и перекосов кромок (см. №№ 4, 5 и пр. Из внутренних дефектов в указанных сварных соединениях могут быть выявлены раковины, поры, включения чужеродных веществ (см. №№ 11 и 12), отсутствие сцепления или неполное сцепление (см. № 10) соединяемых поверхностей (так называемый, «зеркальный шов», или непровар [22]).

Обнаруживая у сварных соединений эти дефекты, специалист может только сказать о возможности их допустимости в сварных конструкциях. В литературе в основном приводятся только способы их предотвращения, например, уточнением режима сварки. Некоторые дефекты могут быть предотвращены контролируемой подготовкой к сварке. Учитывая высокие требования к сварным соединениям трубопроводов и сварным соединениям фасонных деталей при изготовлении ответственных изделий машиностроения, устранение указанных дефектов, например, наплавкой в литературе не описано. Как реализуется на практике сообщение [22], что участки с трещинами вырезаются и завариваются, неизвестно. По данным МГП «Мостеплоэнергия», устранения течи в трубопроводах из ПЭВП для подачи охлажденной воды из-за появления в швах волосных трещин путем их заварки нагретым газом с присадочным материалом добиться не удалось.

Делались попытки закрыть дефектный участок приваркой нагретым газом с присадочным прутом накладок над зоной шва. Но результаты эксплуатации трубопроводов с такими накладками неизвестны. Единственным радикальным решением проблемы, может быть удаление дефектного участка трубопровода и проведение повторной сварки, например, с использованием трубчатой вставки, что и встречается в практике строительства трубопроводов. Но в этом случае приходится переходить к применению уже более дорогого и сложного вида сварки закладным нагревательным элементом. В работе [4, с. 240] указывается на способ ремонта дефектного стыка путем его вырезки и приварки вставки типа «катушки». Правда, метод сварки не указан. Такие методы устранения дефектов с некоторой натяжкой можно отнести к ремонтной сварке, поскольку в этом случае фактически изготавливается новая часть изделия с заменой дефектного участка. О восстановлении несущей способности дефектного участка речь не идет. В пат. США [24] предложен метод ремонта, при котором муфта с закладным нагревательным элементом приваривается сверху участка трубопровода с дефектным стыковым швом.

3.2.2 Дефекты соединений труб в раструб, изготовленных сваркой нагретым инструментом с помощью муфты

Дефекты соединений в раструб, изготовленных сваркой нагретым инструментом с помощью дополнительной муфты, освещены в ограниченном числе источников. В таблице 3.4. (см. Приложение 2) приведены наиболее типичные, кратко описанные в германских нормативных документах [2] дефекты. Для их обозначения использовали принятую в российской литературе терминологию. Как и у стыковых соединений труб, изготовленных сваркой нагретым инструментом, у сварных соединений в раструб обнаруживают как внешние (поверхностные и подповерхностные), так и внутренние дефекты. Однако применение муфты для сварки в раструб отразилось на видах дефектов.

В большей части они относятся к размерным (геометрическим) дефектам, в частности, к нарушениям формы и размеров сварочных наплывов (см. №№ 1-3), к нарушению соосности трубы и муфты (см. № 4), к отсутствию соединения по заданной поверхности (см. №№ 5 и 6). Внутренние дефекты выражаются в отсутствии полного соединения трубы и муфты (см. №№ 7 и 8), в образовании пор в сварном шве (см. № 10), в появлении нарушения геометрии соединяемых деталей (см. № 9). Большинство этих дефектов недопустимы независимо от степени нагружения соединений. При ограниченных размерах непроваров (отсутствия соединения), размера и количества пор дефектные сварные соединения могут быть допущены к эксплуатации.

Указанные в таблице 3.4 причины дефектов позволяют предотвратить их появление, например, точным поддержанием параметров сварки, правильной подготовкой к сварке, выбором материалов, контролем за

работой оборудования и т.п. О возможности ремонта сварных соединений, имеющих указанные в таблице 3.4 дефекты, в литературе сведений не имеется. Известная в технологии ремонтной сварки металлов приварка и наплавка компактных материалов и порошков, совместимых с материалом дефектной детали, применительно к ремонтной сварке ПМ требует еще своего изучения.

В большей части они относятся к размерным (геометрическим) дефектам, в частности, к нарушениям формы и размеров сварочных наплывов (см. №№ 1-3), к нарушению соосности трубы и муфты (см. № 4), к отсутствию соединения по заданной поверхности (см. №№ 5 и 6). Внутренние дефекты выражаются в отсутствии полного соединения трубы и муфты (см. №№ 7 и 8), в образовании пор в сварном шве (см. № 10), в появлении нарушения геометрии соединяемых деталей (см. № 9). Большинство этих дефектов недопустимы независимо от степени нагружения соединений. При ограниченных размерах непроваров (отсутствия соединения), размера и количества пор дефектные сварные соединения могут быть допущены к эксплуатации.

Указанные в таблице 3.4 причины дефектов позволяют предотвратить их появление, например, точным поддержанием параметров сварки, правильной подготовкой к сварке, выбором материалов, контролем за работой оборудования и т.п. О возможности ремонта сварных соединений, имеющих указанные в таблице 3.4 дефекты, в литературе сведений не имеется. Известная в технологии ремонтной сварки металлов приварка и наплавка компактных материалов и порошков, совместимых с материалом дефектной детали, применительно к ремонтной сварке ПМ требует еще своего изучения.

3.2.3 Дефекты соединений, изготовленных сваркой закладным нагревательным элементом в виде спирали

Сварка закладным нагревательным элементом в наибольшем объеме применяется при строительстве газопроводов. Поэтому дефекты, приведенные в таблице 3.5 (см. Приложение 3), взяты из практики указанной отрасли. В основном дефекты представляют собой несоответствие требованиям геометрических параметров в зоне сварки: вытекание расплава (см. № 1), перекос соединяемых деталей (см. № 2), смещение (перекос) нагревательной спирали (см. № 3), деформация деталей (см. № 4), радиальное смещение нагревательной спирали (см. № 9), сдвиг нагревательной спирали (см. № 10).

Применение дополнительного устройства – муфты с ЗНЭ отразилось на появлении таких опасных дефектов как отсутствие полного сцепления между трубой и муфтой из-за ошибок при подготовке к сварке (см. № № 5, 7, 8, 11 и 13) и выполнения сварки (см. №№ 6, 12 и 14), т.е. несплошностей. Эти дефекты не равнозначны дефекту «зеркальный шов» при сварке нагретым инструментом встык. Они могут быть отнесены к объемным несплошностям и служат концентраторами напряжений, а на герметичность соединения могут не влиять.

3.2.4 Дефекты соединений, изготовленных сваркой нагретым газом с присадочным материалом

В связи с тем, что история сварки нагретым газом началась значительно раньше остальных видов сварки ПМ [23, с. 325], ожидали, что дефекты сварных соединений, изготовленных этим видом, и их устранение изучены более глубоко. Однако в литературе за последние десятки лет принципиально нового в этой области практически ничего не появилось. Многие из

описанных дефектов характерны и для сварных соединений, изготовленных другими видами сварки, и причины их появления одни и те же.

При сварке нагретым газом с присадочным материалом чаще всего встречаются со следующими дефектами [21].

Отсутствие сцепления (недостаточная связь) основного и присадочного материалов. Причиной такого дефекта могут быть:

- недостаточный нагрев основного или присадочного материалов или их обоих;
- чрезмерное давление на присадочный материал, которое приводит к выдавливанию расплава;
- слишком низкое давление p прижима присадочного прутка к кромкам свариваемых деталей.

Выдавливание расплава приводит, на наш взгляд, к формированию шва между менее прогретыми участками (влияние градиента температур) основного и присадочного материалов. Низкое давление p , в свою очередь, не обеспечивает выдавливания в наплыв пузырьков воздуха, разобщенных и находящихся в зоне соприкосновения свариваемой поверхности детали и присадочного прутка, и приводит таким образом не только к снижению силы сцепления, но и к пористости шва.

Трещины в сварном шве. Причиной такого дефекта может быть высокотемпературный или длительный нагрев основного или присадочного материалов или их обоих, приводящий к деструкции полимера.

Высокий уровень остаточных напряжений (Опасность хрупкого разрушения). Причиной такого дефекта могут быть неправильное выполнение сварки, при которой происходит чрезмерное вытягивание (>20%) присадочного прутка, уложенного в полость шва. Усилие усадки из-за затруднений с деформированием сваренных деталей не может снизиться.

Надрезы в переходной зоне и в корне шва. Причиной таких дефектов могут быть:

- неправильное выполнение сварки (неправильная схема укладки прутков);

- неполное заполнение корня шва;
 - подготовка шва с зазором между деталями, не учитывающая свойства ПМ;
- очевидно, из всех свойств имеется в виду в первую очередь вязкость расплава.

Неплотность шва. Причиной такого дефекта могут быть:

- неправильная укладка прутка в корень шва;
- отсутствие качественной сварки между отдельными прутками.

В более поздней, чем книга Тиима [21], работе [4, с. 234] большого коллектива российских и украинских авторов виды дефектов, появляющихся при сварке нагретым газом с присадочным материалом, были представлены более широко. В ней указаны не только причины, но и способы предупреждения дефектов. Вместе с тем в последующих публикациях о части дефектов уже не говорилось, поскольку развитие сварки нагретым газом привело к появлению более точно управляемых технологий, в частности, сварки нагретым газом с присадочным материалом втягиванием. Из-за точного поддержания заданной температуры нагретого газа не встречается в современных публикациях [2, S. 27-30] описание таких дефектов, как обрывы присадочного прутка, недостаточность деформирования основного и/или присадочного материалов, неравномерность деформирования присадочного прутка [4, с. 23-24]. На правильно организованном и контролируемом сварочном производстве не могут быть дефекты, вызванные применением присадочного прутка с диаметром, не соответствующим толщине деталей.

Заслуживает внимания в настоящей работе анализ дефектов, которые приведены в нормативном документе ФРГ [2], появляются в процессе сварки и которые, казалось бы, могли бы быть устранены ремонтной сваркой. Основная часть дефектов связана с заполнением полости между деталями присадочными прутками. Это заполнение может сопровождаться изменением заданной геометрии сварного шва или/и образованием концентраторов напряжений.

О возможности применения ремонтной сварки для устранения указанных в таблице 3.6 (см. Приложение 4) дефектов сварных соединений, изготовленных сваркой нагретым газом с присадочным материалом, в процитированных работах не говорится. Указываются только меры их предупреждения. Устранение дефектов «несваренный корень шва» (см. № 4) «не полностью сваренный стык», (см. № 5), «неполное заполнение сечения шва» (см. № 8), т.е. фактически вызванных неполным заполнением полости шва, может выполняться, по всей вероятности, тотчас после их обнаружения визуальным осмотром. Сварные изделия с такими дефектами в эксплуатацию естественно не должны поступать. Устранение дефекта производится таким же методом, который применяется при сварке V-образного шва с подварочным швом. Для полного заполнения полости между кромками [25, с. 44] производят неглубокую V-образную разделку с обратной стороны шва, применяя для этого резак со скругленным углом торца. По всей видимости, дополнительной приваркой прутков можно устранить дефекты типа «надрезы по кромке шва» (см. № 3) и «дефект начала шва» (см. № 14). О возможности исправления дефектных швов, изготовленных сваркой нагретым газом с присадочным материалом, говорится в работе [4, с. 240]. Однако конкретные данные в ней не приводятся. Для устранения дефектов «увеличенный корень шва» (см. № 6) или «увеличенная высота сварного шва» (см. № 7) можно применить механическую доработку сварного соединения, если указанные превышения размеров швов отражаются на работоспособности или размерной точности изделия.

На прочность соединения эта доработка не влияет. Дополнительная укладка прутков возможна и в случае устранения дефектов типа «пониженная толщина шва» (см. № 16) и «не полностью заполненное поперечное сечение углового шва» (см. № 17).

Дефект «остаточные напряжения» в нормах DVS [2] в отличие от работы [21] не отмечается. Судить об уровне остаточных напряжений можно, оценив степень удлинения прутка, уложенного в полость сварного шва.

Предполагая возникновение значительных остаточных напряжений, с целью их снижения сварные изделия до момента нагружения подвергают выдержке, продолжительность которой зависит от релаксационных свойств ПМ и температуры окружающей среды [23, с. 349]. По данным российских исследователей, термообработка, если не всего изделия, то хотя бы зоны шва, позволяет не только снять остаточные напряжения, но и создать нужную кристаллическую структуру материала шва [5, с. 18].

3.2.5 Дефекты соединений, изготовленных экструзионной сваркой

Специфика сварки, выражающаяся в одноразовой укладке расплава присадочного материала в полость между кромками соединяемых деталей, отражается на появлении только характерных для этого метода дефектов. Они относятся, в основном, к размерным дефектам (таблица 3.7) (см. Приложение 5) и появление их связано во многом с квалификацией сварщика. К ним относятся дефекты № № 4-11, 13, 17, 18. К числу характерных для экструзионной сварки размерных дефектов можно отнести № 2 («углубление на покрывающем слое»), № 3 («надрезы по кромке шва»), № 4 («недостаточная сварка по кромке шва»), № 9 («чрезмерное растекание расплава») и № 14 («несимметричное перекрытие кромок шва»). Дефекты №№ 12 и 13 вызваны неправильным конструированием сварного изделия. Как и для сварных соединений, изготовленных другими методами, возможны дефекты типа «риски» (см. № 1), «поры и пустоты» (см. № 20) и «отсутствие сцепления» (см. № 21). Поскольку сварку выполняют с помощью подходящего для ремонтных работ сварочным устройством – ручным экструдером, устранить дефекты, вызванные неполным заполнением полости шва, можно, учитывая опыт ремонтной сварки металлов, путем дополнительной наплавки. Режимы экструзионной сварки уже в достаточной степени оптимизированы применительно к основным типам термопластов (таблица 3.8). Давление на приплавляемый ПМ создается прижимом башмака

усилием сварщика. Поверхность ремонтируемого участка обрабатывается снятием стружки с помощью цикли. Скорость перемещения экструдера вдоль ремонтируемого участка определяется выталкиваемой массой экструдата и величиной поперечного сечения заполняемой полости. Башмак перед началом наплавки подогревают, надевая на него окружающую насадку.

Сочетание температуры нагретого воздуха, расхода воздуха и скорости сварки должно обеспечить, чтобы ПМ на ремонтируемой поверхности был пластицирован на глубину от 0,5 до 1,0 мм. Дефекты № 7-9 и № 17 можно устранить дополнительной механической обработкой, если превышение размеров шва недопустимо с точки зрения обеспечения точности сборки.

Таблица 3.8

Режимы экструзионной сварки наиболее распространенных термопластов.

Материал	Температура наплавленного экструдата ¹⁾ , °С	Температура нагретого газа для подогрева ремонтируемой поверхности ²⁾ , °С	Расход газа, л/мин
ПЭВП	210-230	250-300	300
ПП	210-240	250-300	300
ПВХ-Ж	170-180	300-360	300
Ударопрочный ПВХ	170-180	280-340	300
ПВХ-Х	195-205	300-360	300
ПВДФ	240-260	280-350	300

¹⁾Замеряется контактным термометром у экструдата на выходе из экструдера.

²⁾Замеряется в середине сопла на расстоянии 5 мм от его торца.

3.2.6 Дефекты соединений встык, изготовленных инфракрасной сваркой

Дефекты, встречающиеся после выполнения инфракрасной сварки, называемой в зарубежной литературе бесконтактной сваркой нагретым инструментом (таблица 3.9.) (см. Приложение 6), практически ничем не отличаются от дефектов, обнаруживаемых при сварке нагретым инструментом встык. Анализ, приведенный в разделе 2.1, справедлив также для дефектов сварных соединений, указанных в заглавии настоящего раздела.

3.3 Дефекты сварных соединений термопластичных композиционных материалов

Сварка ТКМ является менее изученной, чем сварка ненаполненных и малонаполненных термопластов, хотя практически все промышленно выпускаемые термопласты служат матрицей КМ или дисперсноупрочненных (наполненных) ПМ. Это может быть объяснено не только меньшим объемом применения ТКМ по сравнению с ненаполненными и малонаполненными термопластами, но и худшей их свариваемостью из-за наличия в их составе уже значительной, по сравнению с малонаполненными термопластами, доли волокнистых наполнителей. Сложности при соединении деталей из относительно новых ТКМ на основе полиароматических матриц склеиванием заставили более интенсивно проводить исследования их свариваемости применительно к изделиям новой техники. Основной объем публикаций по свариваемости ТКМ начался с конца 80-х - начала 90-х годов XX века. По отношению к ТКМ апробировали все те же основные методы сварки, которые известны в технологии сварки ненаполненных термопластов [26]. Однако не все из них привели к получению желаемых результатов по качеству сварных соединений. Систематизированных исследований по анализу дефектов сварных соединений ТКМ до настоящей работы не обнаружено. В некоторых публикациях прочность сварных соединений вообще не связывали с дефектностью сварных швов, хотя снижение указанной прочности по сравнению с прочностью основного материала отмечали. Некоторые отрывочные данные о дефектах сварных соединений ТКМ приведены ниже¹⁾. Изучение публикаций об описании процессов сварки ТКМ различными методами позволяет оценить, с какими трудностями и дефектами сварных соединений встречались исследователи.

¹⁾Аунг Тху Хан, Комаров Г.В. Анализ дефектов сварных соединений термопластичных композиционных материалов (ТКМ)//XXXIX Гагаринские чтения. Научные труды Междунар. молодежной научной конф. в 9 томах. Москва, 9-13 апр. 2013 г.- М.: МАТИ, 2013. Т. 1., С. 10-11.

При сварке ТКМ, когда полимер в зоне контактирующих поверхностей доводится до вязкотекучего состояния, в первую очередь необходимо, очевидно, учитывать, что введение наполнителя в термопласт приводит к изменению теплофизических свойств и вязкости материала. Поскольку наполнители типа карбоната кальция, талька, каолина, слюды, технического углерода и стекла проводят теплоту лучше, чем ПЭ, ПП, ПС, ПВХ, ПА и другие термопласты, их удельная теплоемкость меньше, а плотность выше, введение указанных наполнителей увеличивает теплопроводность термопласта. Благодаря этому прогрев происходит быстрее, однако, с другой стороны, ускоряется и отвод теплоты из зоны сварки. Наполнение термопластов наиболее благоприятно влияет на скорость нагрева свариваемых поверхностей при косвенном нагреве, причем в первую очередь в случае соединения толстостенных деталей. Если теплота генерируется в месте сварки, то повышенная теплопроводность ТКМ увеличивает тепловые потери. При сварке с присадочным материалом из-за более быстрого охлаждения материала шва необходимо принимать в расчет более высокий уровень остаточных напряжений в зоне шва и связанное с этим более низкое качество соединения. При сварке нагретым инструментом прямым нагревом [27, с.95] более высокая теплопроводность ТКМ может привести к снижению температуры во время технологической паузы до уровня ниже $T_{пл.}$. Из-за значительного отвода теплоты в зажимные приспособления нужно при сварке рассматриваемым способом считаться также с меньшей глубиной проплавления в зоне стыка. При сварке тепловыми методами анизотропных ТКМ следует учитывать изменение скорости нагрева в зависимости от направления подачи теплоты.

На основе сделанного анализа можно заключить, что получение бездефектного шва при использовании режимов сварки, найденных при исследовании сварки ненаполненных термопластов, всего вероятнее, невозможно.

Поскольку при формовании деталей из наполненных термопластов на их поверхности образуется лишь тонкий полимерный слой, то уже по этой

причине свариваемость ТКМ должна отличаться от свариваемости ненаполненных термопластов. Затруднения с развитием реологических процессов на границе свариваемых поверхностей ТКМ должны потребовать более высоких давлений при сварке, а это должно отразиться на сохранности структуры укладки волокнистых наполнителей и на свойствах соединения. Эмпирически пришли к выводу, что менее дефектная граница контакта свариваемых поверхностей возникает при сварке ТКМ с ненаполненным термопластом. С этими данными согласуется вывод [28,29] о необходимости достаточного слоя термопласта на поверхности свариваемого ТКМ для обеспечения высокой прочности соединения. Впервые на важность этого фактора обратили внимание К.И.Зайцев и его коллеги, развивавшие реологическую концепцию сварки в расплаве полимерных материалов. Они предложили на основе результатов изучения течения материала в зоне шва вводить для улучшения сварочных процессов прокладку из пленки того же состава, что и полимерная матрица в ТКМ [30].

В последующем к выводу, что прочность сварных соединений ТКМ возрастает при использовании тонких прокладок из ненаполненных полимеров между соединяемыми поверхностями, пришли авторы работы [31]. Ими, в частности, изучалась свариваемость наполненного углеродными волокнами ПВДФ. Прокладки из ненаполненного термопласта, обладающие лучшей текучестью, чем соответствующий ТКМ, стали повсеместно применяться для соединений новейших типов армированных волокнами термопластов [29,32,33], которые по своей структуре правильнее рассматривать как сварное, а не клеевое. Подобно тому, как рост объемного содержания матрицы в ТКМ ведет к увеличению его межслоевой трещиностойкости, введение дополнительного количества термопласта в зону сварки способствует повышению трещиностойкости соединения. Проблемой при выполнении такого сварного соединения является обеспечение локального нагрева промежуточного слоя, имеющего такую же температуру текучести, как у матрицы соединяемого ТКМ, чтобы этим самым исключить

изменения в схеме укладки армирующих волокон в зоне шва. Решением этой проблемы стало запатентованное фирмой ICI Composites Structures (Великобритания) предложение применять промежуточный слой, названный Thermabond и представляющий собой прослойку из армированного углеродными волокнами (объемная доля 61%) ПЭЭК с нанесенным толщиной 75 мкм слоем аморфного ПЭИ [34-36]. Хотя ПЭИ имеет более высокую температуру стеклования, он более легкоплавкий ($T_{пл} = 216 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Совместимость ПЭИ с ПЭЭК доказана методом термического анализа [36]. Соединения с помощью слоя Thermabond, оптимальная толщина которого 150-250 мкм, могут выполняться при температурах от 230 до 300 $^{\circ}\text{C}$ при использовании различных способов нагрева: конвективного в автоклаве, контактного между плитами прессы, индукционного или резистивного [36]. В работе [34] соединение с помощью слоя ПЭИ марки Ultem проводили при 316 $^{\circ}\text{C}$ в течение 5 мин. Вместе с тем в работе [36] показано, что превышение температуры 300 $^{\circ}\text{C}$ вызывает искажение схемы укладки армирующих волокон в свариваемом материале.

3.3.1 Дефекты соединений, изготовленных сваркой нагретым газом

Исследованию сварки ТКМ нагретым газом посвящено не так много работ. Из-за сложности обеспечения регулярного распределения армирующих волокон в зоне шва сварка нагретым газом с присадочным материалом подобно сварке ненаполненных термопластов вряд ли приемлема для соединения ТКМ с короткими волокнами и не годится для ТКМ с непрерывными волокнами. Учитывая особенности структуры ТКМ, содержащих длинноволокнистые наполнители, можно априори сказать, что сварка и не только рассматриваемым видом может быть эффективна только при изготовлении соединений по плоскостям, например, внахлестку.

Сварку нагретым газом без присадочного материала и прямым нагревом [27 с.107] подробно исследовали в Плимутском политехническом инсти-

туте (Великобритания) в производстве слоистых конструкций из ленточного препрега на основе однонаправленного углеродного волокна и ПЭЭК [37]. Пакет листовых образцов формировали методом выкладки. Локальный нагрев соединяемых слоев осуществляли с помощью промышленного сварочного аппарата, имеющего наконечник с щелевым соплом размером 50 x 1 мм. В работе исследовали влияние температуры нагретого воздуха $T_{\text{нв}}$, давления p прижима и скорости V_y укладки на прочность ТКМ, его пористость и характер разрушения (см. табл. 3.10.). Свойства ТКМ сравнивали с характеристиками материала, полученного прессованием (образец № 1). Как видно, максимальная прочность, достигнутая при сварке нагретым газом по режиму № 3, составляет 75% прочности материала, сваренного между плитами прессы. В углепластике, изготовленном по рассматриваемой схеме выкладки, образуются дефекты типа пор различной формы и скручивания углеродных волокон. Количество пор вблизи последнего уложенного слоя составляет 20%, в то время как в самом отдаленном от него слое поры занимают объем меньше 2%. Изменение пористости по толщине последовательно свариваемых слоев препрега можно объяснить постепенным развитием пластических деформаций в ранее уложенных слоях. Из полученных данных можно сделать вывод, что большей монолитизации шва, т.е. снижению дефектности соединения способствует более длительная выдержка ПМ в вязкотекучем состоянии. В слоях ТКМ, сваренных по режимам, далеких от оптимальных, поры образуют линейные цепочки и являются следствием плохого сплавления слоев, что указывает на образование дефектов «отсутствие сцепления», отмеченных выше в разделе 3.2. Повысить качество и толщину ТКМ, изготавливаемого бесприсадочной сваркой нагретым газом прямым нагревом, предлагается за счет использования аппаратуры, оснащенной средствами контроля температуры.

Из результатов работы [37] можно заключить, что возможными дефектами при сварке ТКМ нагретым газом могут быть поры и расслоения. Их причинами можно считать термическое воздействие на ПМ. Исключить де-

фекты можно точным подбором параметров процесса и подготовкой к сварке. О залечивании дефектов в рассматриваемых работах данные не отмечены.

Таблица 3.10

Влияние условий сварки нагретым газом прямым нагревом без присадочного материала слоев углеродного препрега на основе ПЭЭК марки APC-2 на прочность $\sigma_{изг}$ при 3-точечном изгибе и характер разрушения образцов^{1)ТКМ}

№№ п/п	$T_{нв}, ^\circ\text{C}$	p, H	$V_y, \text{см/мин}$	$\sigma_{изг}, \text{МН/м}^2$	Характер разрушения
1	-	-	-	164 ²⁾ / (149...189)	Разрыв
2	495	100	50	24 / (19...28)	Расслаивание
3	495	100	20	119 / (109...121)	Разрыв
4	495	40	20	65 / (61...69)	Разрыв
5	480	40	20	47 / (32...62)	Разрыв с расслаиванием
6	420	100	10	17 / (16...18)	Расслаивание

¹⁾Образцы имели толщину 2,0-2,5 мм, длину 50 мм и ширину 10 мм и состояли из 16 слоев препрега. ²⁾В числителе средний, а в знаменателе минимальный и максимальный результаты испытания пяти (№ 1), четырех (№ 2 и 3) и двух (№ 4-6) образцов.

Авторы [37] из-за сложности получения бездефектных швов считают метод сварки нагретым газом пригодным для получения более дешевых материалов из препрегов, например, на основе армированных стекловолокнами ПА. Ранее к такому же выводу пришли специалисты фирмы Aerospatiale Aquitaine (Франция). Причем сварку они осуществляли как нагретым газом, так и пламенем. При намотке с использованием сварки достигли скоростей от 0,3 м/мин (нагретый воздух, углепластик на основе ПЭЭК) до 10/мин (пламя, полиамидный стеклопластик). Используя предварительный подогрев укладываемого слоя и поверхности уже уложенного материала (как при сварке нагретым газом с присадочным материалом), повысили скорость намотки до 30 м/мин. Возможность локального подведения теплоты в труднодоступных местах дала основание авторам работы [26] считать сварку нагретым газом пригодной для выполнения ремонтных работ, как представляется, по устранению дефектов типа расслоений. В настоящей работе эта возможность была подтверждена при приварке к слоистому полисульфоному стеклопластику накладки с использованием насадки на сопло аппарата для скоростной сварки.

3.3.2 Дефекты соединений, изготовленных сваркой нагретым инструментом

Сварке ТКМ нагретым инструментом посвящено наибольшее число публикаций из числа обнаруженных при выполнении настоящей работы. Возникновение дефектов в них обсуждалось параллельно с рассмотрением проблемы реализации свойств ТКМ в сварном соединении, т.е. проблемы свариваемости. Почти во всех публикациях говорилось об одинаковых дефектах, связанных с особенностями волокнистой структуры наполнителей ТКМ.

В работе, выполненной в лаборатории полимеров Лозанской федеральной политехнической школы (Швейцария), сварку нагретым инструментом косвенным нагревом (подведение теплоты сквозь стенку деталей) применили при изготовлении панели соединением 24 слоев из однонаправленного углепластика на основе ПЭЭК [32]. Между свариваемыми слоями препрега укладывали прокладку из чистого ПЭЭК толщиной 100 мкм. Оптимальным режимом сварки был следующий: температура нагретого инструмента 380 °С, давление 1,4 МПа, продолжительность выдержки 5 мин. Исследование влияния более длительной, чем при сварке, термообработки ПЭЭК показало, что она не может быть причиной пониженной прочности сварного соединения по сравнению с прочностью соединяемого ТКМ. Вместе с тем можно предположить, что при сварке толстостенных деталей из ТКМ нагретым инструментом косвенным нагревом вероятность появления дефектов очень высока. Даже при сварке деталей с рекомендуемой максимальной толщиной до 2 мм можно видеть искривление слоев армирующего наполнителя [26, с. 13]. Не всегда решает проблему получения бездефектного шва использование более легкоплавкого, чем свариваемый ТКМ, присадочного материала. Он должен быть совместим со свариваемым ТКМ. Но для большинства термопластов таких присадочных материалов не имеется. Тем, кто занимается сваркой ПЭЭК, очень повезло, что синтезирован совместимый с ним ПЭИ.

Более эффективна по отношению ко всем термопластам, в том числе и ТКМ, разновидность сварки нагретым инструментом – сварка прямым нагревом (теплота подводится непосредственно к соединяемым поверхностям). Исследованию этого метода сварки специалисты разных стран уделили наибольшее внимание. Температура нагретого инструмента может быть ниже, чем при сварке косвенным нагревом из-за отсутствия необходимости прогрева всей стенки деталей в зоне шва. Но исключить деформирование ТКМ не удастся. Наблюдение формы образцов в зоне перекрытия нахлесточного соединения и поперечных срезов в зоне шва показало [37,38], что и при сварке прямым нагревом образуется наплыв, расплющивается ТКМ и изменяется ориентация армирующих волокон. Причем нарушение параллельности волокон не ограничивается только слоями, примыкающими к контактирующим поверхностям, но и захватывает объем шва в результате прилипания нагретого инструмента к ТКМ при его отводе после фазы нагрева. Эти факторы и образование пустот являются причиной понижения прочности по сравнению с прочностью свариваемого ТКМ. Из-за малого количества матрицы в поверхностных слоях глубина протекания процесса очистки (в результате вытеснения дефектных слоев) [23, с.339] ограничена. Это налагает повышенные требования к сохранению их чистоты в условиях хранения перед сваркой, чтобы таким образом исключить образование дефектов типа «инородные включения».

При сварке наполненного стекловолокном термопласта серьезную проблему может представлять налипание полимерной матрицы к нагретому инструменту, что приводит к обогащению содержания волокон на соединяемых поверхностях и в результате этого к ухудшению условий для прочного взаимодействия поверхностей. Обнажившиеся стеклянные волокна могут в этом случае рассматриваться как своего рода дискретные загрязнения на свариваемых поверхностях. В связи с этим предпочтительнее выглядит бесконтактный метод нагрева, например ИК - излучателем.

На основе проведенного анализа данных о свариваемости ТКМ нагретым инструментом можно сделать вывод, что число возможных типов дефектов сварных соединений значительно меньше, чем у сварных соединений ненаполненных термопластов (см. раздел 3.2.). Частично это связано с тем, что некоторые формы соединений деталей из ТКМ просто не встречаются и нецелесообразны, например, такие широко распространенные соединения труб, профилей, плит из ненаполненных термопластов как соединения встык. Соединения листовых ТКМ осуществляются, как правило, по плоскостям. И в этом случае аналогии дефектов можно искать в клеевых соединениях внахлестку. Ну, и априори можно сказать, что сварка в расплаве с приложением давления должна привести к нарушению ориентации волокнистого наполнителя, которую сохранить расплавленная матрица не в состоянии. Вытеснение армирующих волокон из зоны шва приводит к снижению прочности соединения [39]. Устранить этот дефект ремонтными работами не представляется возможным. Можно только думать о его компенсации. Данные о залечивании дефектов сварных соединений ТКМ, в том числе изготовленных рассматриваемым методом, в литературе не встречались. Расслоение ТКМ, которое зарождается, по всей видимости, в процессе сварки и проявляется во время нагружения соединения [32], как представляется, можно устранить методами, известными в технологии клеевых соединений и в технологии формования слоистых ПКМ, а также сваркой растворителем, которую исследовали в настоящей работе. Снизить степень дезориентации ТКМ может уменьшение зоны термического влияния. В этом отношении большими возможностями характеризуется сварка закладным нагревательным элементом.

3.3.3 Дефекты соединений, изготовленных сваркой закладным нагревательным элементом

Для соединения деталей из ТКМ апробировали обе разновидности сварки закладным нагревательным элементом (ЗНЭ): терморезисторную и индукционную [23, с. 385]. При терморезисторной сварке между соединяе-

мыми поверхностями помещают резистивный элемент из стали диаметром около 100 мкм и пропускают по нему электрический ток в течение заданного времени, после чего производят охлаждение, не снимая давление. Терморезисторная сварка в целом характеризуется как простой, высокопроизводительный процесс (время сварки 20 с [37], а вся продолжительность сборки – несколько минут [32]). Вместе с тем некоторые авторы считают [37], что металлические закладные элементы, оставаясь в шве, играют роль чужеродных по отношению к ТКМ тел и ведут к снижению прочности соединения. Другими словами, их можно рассматривать как особый тип дефекта, характерный только для сварки ЗНЭ. В связи с этим для соединения, например, углепластиков больше подходит терморезисторная сварка, при которой в качестве резистивного элемента используют жгут или ленту из углеродных волокон (сопротивление которых оценивается величиной 1 Ом·см) чаще всего вместе с тонким слоем из матрицы соединяемого ТКМ или из полимера, совместимого с матрицей (лента типа Thermabond) (см. выше).

Фундаментальные исследования, направленные на решение задач оптимизации режимов сварки ЗНЭ ТКМ, провел В.А. Гончаренко. Указанная оптимизация позволила достичь максимальной относительной прочности сварных соединений у деталей со сравнительно невысокой несущей способностью на уровне 0,85-0,95. Как и при сварке ТКМ другими методами для того, чтобы свести к минимуму негативное влияние смещения и вытеснения армирующих волокон в зоне шва, целесообразно использовать присадочный материал, увеличивающий толщину расплава, который участвует в формировании шва.

Сложной проблемой на пути снижения дефектности и/или достижения воспроизводимых характеристик сварного соединения является обеспечение постоянства режимов нагрева. При индукционной сварке ЗНЭ между соединяемыми поверхностями укладывают элемент, нагреваемый в электромагнитном поле, которое создается индукционной катушкой или магнитным тороидом [40]. В экспериментах с материалом АРС-2 на основе ПЭЭК [37] ис-

пользовали источник энергии, работающий на чистоте 2 МГц, и 11-витковую катушку индуктора с внутренним диаметром 50 мм и длиной 110 мм. В качестве закладного элемента была применена серебряная проволока толщиной 1 мкм, навиваемая на один из концов пластинчатых образцов ТКМ. Первоначально навивка производилась на один из образцов. В этом случае образец с навитой проволокой излишне нагревался, в то время как второй, без проволоки, - недостаточно. Поэтому решено было навивать проволоку на оба образца, но прочность соединения при сдвиге составила 5 Н/мм^2 (11% прочности основного материала). Она возрастала с увеличением продолжительности нагрева. Однако полного сплавления поверхностей не достигли. Края образцов нагревались сильнее. При непрерывной индукционной сварке стеклопластика на основе полиамида 12 с использованием в качестве ЗНЭ ткани саржевого переплетения из коррозионностойкой стали, в том числе пропитанной ПА 12, прочность соединения при сдвиге составила 5 (ЗНЭ без пропитки) – 13,5 МПа (ЗНЭ с пропиткой ПА 12)[41]. При этом исследователи отмечали низкую прочность сцепления ткани с матрицей. Из-за краевого эффекта не удалось осуществить сварку по всему соединяемому участку. Из-за воспламенения матрицы в зоне шва возникли газовые включения. Применение в качестве ЗНЭ углеродной ткани саржевого переплетения, пропитанной (50 об.-%) ПА 12, позволило повысить прочность соединения при сдвиге до 25 МПа.

В целом можно сделать вывод, что развитие сварки ЗНЭ для соединения деталей из ТКМ не достигло еще такого уровня, чтобы детально исследовать типы дефектов, причины их возникновения и предотвращения и методы залечивания.

3.3.4 Дефекты соединений, изготовленных ультразвуковой сваркой

Специальных исследований по систематизации дефектов соединений, изготовленных ультразвуковой сваркой, по всей видимости, до сих пор не проводилось. В основном дефекты фиксировали в работах по изучению сва-

риваемости ТКМ. Анализ публикаций по этому вопросу и посвящен в основном настоящий раздел.

Ультразвуковая (УЗ) сварка, основанная на превращении энергии механических продольных колебаний частотой 20-40 кГц в теплоту в зоне контакта соединяемых поверхностей, давно уже применяется при сборке изделий из наполненных термопластов, в частности полиамида и поликарбоната, наполненных стекловолокном (объемная доля до 30 %). Поэтому при решении проблем сборки изделий из ТКМ нового поколения (на основе непрерывных волокон) исследователи свои надежды связывали и с УЗ-сваркой, к достоинствам которой в первую очередь можно отнести локальность нагрева, высокую скорость образования соединения и возможность автоматизации. Сравнивая терморезисторную, индукционную и УЗ-сварку [42, 43], подчеркивают такие преимущества последней, как возможность получения более прочного соединения ТКМ и большую производственную гибкость.

На свариваемости ультразвуком отражаются физические свойства ПМ, конструкция деталей и параметры процесса [5, с. 60]. Основное, что отличает ненаполненные ПМ от ТКМ и влияет на их физические свойства, это присутствие волокнистого наполнителя. в большинстве работ, где изучалась свариваемость УЗ, влияние на последнюю наполнения термопластов рассматривалось с позиций способности материала передавать механические колебания и течь в зоне контакта поверхностей. Если наполнение ведет к повышению модуля упругости ПМ при сохранении способности его поверхностного слоя хорошо размягчаться и течь, то свариваемость должна улучшаться, поскольку жесткие ПМ лучше передают энергию механических колебаний к месту соединения.

В работе [44] показано, что введение в термопласт наполнителя типа стекловолокна в количестве, меньшем или равном 10 %, улучшает его свариваемость. Известно также, что наполнение ПА стекловолокном (массовая доля до 30 %) переводит его из группы условно свариваемых ультразвуком в группу хорошо свариваемых [45]. Однако прочность соединения не дости-

гает прочности материала [46]. За счет увеличения жесткости термопласта при введении наполнителя зафиксировано [47] улучшение свариваемости в дальнем поле (передаточная УЗ-сварка [27, с. 85]). При большом содержании наполнителя требуется изменение и усложнение конструкции УЗ-головки в связи с интенсивным абразивным износом инструмента в процессе сварки. Кроме того, констатировано [44], что при массовой доле стекловолоконного наполнителя 35-40 % количество полимера может быть недостаточным для образования качественного шва. По данным фирмы Branson Sonic Power (США), возникают проблемы при попытке сварить ТКМ с массовой долей армирующих волокон более 40 % [42]. Современные ТКМ содержат до 60 % волоконного наполнителя. Первые опыты по их сварке не привели к получению прочного соединения. Причиной пониженной прочности соединения, как и при других видах сварки ТКМ, может быть, по крайней мере, образование дефекта типа «нарушение схемы укладки наполнителя».

Принимая во внимание положительные результаты УЗ-сварки наполненного ПМ с ненаполненным [47], улучшение свариваемости ТКМ следует ожидать при введении в зону контакта соединяемых поверхностей присадочного материала из ненаполненного термопласта. Эффективность такого решения показана на примере сварки углепластика на основе ПЭЭК [42].

Авторы [43], относя УЗ-сварку к сложным процессам, выделяют в ней следующие субпроцессы: 1) механическое нагружение и колебания деталей; 2) нагрев термопласта в условиях вязкоупругости; 3) передачу теплоты; 4) течение и смачивание; 5) межмолекулярную диффузию. Механическое нагружение (статическим усилием) и колебания влияют на напряженное состояние в деталях, от которого, в свою очередь, зависит тепловыделение. Уже только анализ этих процессов может указать, что структуру ТКМ в зоне шва трудно сохранить такой, чтобы исключить негативное влияние на качество соединения.

Как и вообще при УЗ-сварке ПМ, для получения качественного соединения ТКМ за короткое время необходимо создать условия для концентрации

УЗ-энергии в зоне соединяемых поверхностей. Кроме того, необходимо обеспечить свободную посадку деталей, не препятствующую перемещению их соединяемых участков относительно друг друга [37, 48]. При сварке жестких ТКМ на основе однонаправленных волокон без подготовки поверхностей есть опасность разрыва волокон под влиянием прикладываемого высокого давления. Видимо, и по этой причине сварка по плоским поверхностям листового квази-изотропного углепластика типа APC-2 с помощью УЗ-инструмента с плоской рабочей поверхностью (амплитуда 40 мкм, продолжительностью 1,0-2,5 с, давление 1-2 МПа) позволила достичь прочности при сдвиге не выше 5 Н/мм² (11 % прочности основного материала) [49]. Кроме того, УЗ-сварка по плоским поверхностям, как и при сварке ненаполненных термопластов, не обеспечивает воспроизводимости показателей качества швов [48], что также можно отнести к дефектам (см. раздел 3.2.).

При изучении свариваемости ультразвуком листовых ТКМ, полученных по методу волоконной технологии, без создания концентратора энергии потребовалось фиксировать осадку деталей в определенном интервале, оптимальные значения которого устанавливали экспериментальным путем. Исходя из особенностей такой сварки и сделан вывод [50], что процесс предпочтительнее вести при меньшем давлении прижима и большей амплитуде колебаний.

Если свариваемые детали изготавливают литьем под давлением, то концентрированию тепловыделения на соединяемых участках способствует оформление треугольного или прямоугольного выступа, преимущественно по всей длине шва [5, с. 65]. Треугольный выступ и при УЗ-сварке ТКМ с углеродными волокнами имеет высоту 0,4-0,8 мм и основание 1 мм [37,43]. Теоретическое исследование процесса сварки углепластика на основе ПЭЭК при наличии на одной из деталей концентратора энергии, используя механическое моделирование сварочной системы, дало возможность [43] объяснить процесс нагрева и плавления и изменения структуры ТКМ.

В случае использования для конструкции, собираемой с помощью УЗ-сварки, листовых элементов из ТКМ (особенно на основе непрерывных волокон) оформить концентратор энергии очень трудно. Предполагали [37] исследовать свариваемость указанных материалов при введении между соединяемыми поверхностями в качестве концентратора энергии металлической проволоки или сетки. Насколько такая технология оказалась успешной, публикаций не обнаружили.

Более или менее освоенной является технология, при которой для локализации тепловыделения и формирования бездефектного контакта поверхностей используют промежуточные полимерные вставки [5, с. 65] или слои. К аналогичному решению проблемы получения качественного соединения с помощью промежуточных вставок прибегают и при УЗ-сварке новейших видов углепластиков с высоким содержанием наполнителя, например, на основе ПЭЭК [42]. Разрушение соединений по основному материалу затрудняет получение точных данных о максимально достижимой прочности. У наиболее прочных швов она составляет 35 МПа (80 % прочности материала при сдвиге), в то время как прочность при растяжении ТКМ равна 4,2 ГПа. Наиболее слабыми участками, как видно на увеличенных снимках разрушенных образцов, являются места дезориентации волокон. В экспериментах по сварке ТКМ, изготовленных по волоконной технологии, получены соединения, прочность которых лимитируется когезионной прочностью матрицы [50]. Анализ дефектов, влияющих на прочность соединений, в этой работе не проводился.

Наряду с расплющиванием материала в области шва при УЗ-сварке слоистых ТКМ проблемой является межслоевое разрушение материала. В работе [43] сообщено о минимизации расслоения при сварке графитопласта на основе полифенилсульфида благодаря применению прижима ТКМ дополнительным башмаком.

Из возможных дефектов, обнаруживаемых визуальным контролем в зоне соединения при УЗ-сварке термопластов вообще, в одном из современных

нормативных документов ФРГ [2, S. 556] отмечается лишь «вспенивание материала наплыва», вызванное повышенной влажностью ПМ из-за ненадлежащего хранения деталей перед сваркой. Созданием надлежащих указанных условий или сушкой деталей этот дефект может быть предотвращен.

В исследованиях по оптимизации режимов УЗ-сварки главным образом использовали образцы простой формы: пластины, стержни, резе трубки. Полученные на простых образцах зависимости затем трудно сразу перенести на случаи сварки сложных деталей, имеющих сужения сечения, уступы, криволинейные поверхности. Для каждого такого случая параметры режима должны заново оптимизироваться. В связи с желанием ускорить поиск оптимальных режимов УЗ-сварки фасонных деталей, в том числе из армированных волокнами термопластов, в ФРГ стали применять [49] образцы цилиндрической формы термопластов, в ФРГ стали применять [51] образцы цилиндрической формы с внутренним диаметром 25 мм и высотой 30 мм. При этом решающим для получения качественного соединения также является выбор оптимальной комбинации параметров (амплитуды, давления и времени), которая обеспечивает передачу от волновода к соединяемым участкам необходимой для осуществления процесса сварки энергии в течение экономически оправданного времени.

3.3.5 Дефекты соединений, изготовленных сваркой трением

Широких исследований по изучению дефектов соединений, изготовленных сваркой трением, по всей видимости, не проводилось. Лишь в нескольких работах периода развития применения ТКМ нового поколения по изучению их свариваемости появились сообщения об отклонениях свойств соединения от свойств свариваемого ТКМ в результате нарушения его структуры.

Специалисты, занимающиеся сборкой конструкций из ТКМ, не могли пройти мимо сварки трением, характеризующейся целым рядом достоинств. Одно из этих достоинств – локализация нагрева в месте соединяемых поверхностей. Последняя способствует высокой производительности процесса обра-

зования соединения и уменьшению зоны термического влияния, что крайне желательно для сохранения структуры ТКМ в шве. Кроме этого, отмечают высокое качество получаемых соединений, простоту и воспроизводимость параметров процесса [37]. Для многих случаев применения требуется незначительная подготовка к сварке.

По отношению к наполненным короткими волокнами термопластам могут быть использованы все известные разновидности сварки трением [27, с. 115]. Режимы ротационной сварки трением могут быть заимствованы из технологии сварки ненаполненных термопластов [26, с. 24]. Области применения ротационной сварки трением ограничены, так как, по крайней мере, одна из деталей должна быть круглой формы, а детали, оси которых расположены под углом, соединять невозможно.

По отношению к новым типам ТКМ в большей степени считается пригодной сварка вибротрением [49]. Сваркой вибротрением хорошо соединяются термопласты с содержанием наполнителя до 45 %, а также ненаполненные термопласты с наполненными [52]. В то время как при сборке изделий из ненаполненных термопластов она не вызывает особых проблем с управлением качеством соединения [53], со сложностями, согласно мнению фирмы Branson Ultrasonic (Danbury, США), встречаются при сварке вибротрением ТКМ на основе непрерывных волокон. В противоположность мнению фирмы Branson Ultrasonic автор [54], очевидно, справедливо считает, что сварка вибротрением ТКМ с перекрестной схемой армирования не обеспечивает высокого качества соединения из-за перерезания волокон, уложенных поперек направления колебаний, и что она больше подходит для ТКМ с непрерывными армирующими волокнами, причем ориентация наполнителя должна совпадать с направлением вибрации. Такого же мнения придерживается автор работы [35]. Как и при сварке другими методами, качество соединения улучшается при введении между соединяемыми поверхностями промежуточных слоев из чистого полимера, например при сварке углепластика на основе ПЭЭК промежуточного слоя из двух пленок из ПЭЭК [54]. Сваривая на установке модели 2800 фирмы

Branson Ultrasonic при частоте колебаний 240 Гц, достигли прочности соединения при сдвиге 39,29 МПа (коэффициент вариации 7,7 %).

В исследовании [37] оптимизированы параметры сварки вибротрением материала типа APC-2 толщиной 2 мм. Прочность соединения при сдвиге имеет тенденцию расти с увеличением продолжительности процесса и амплитуды колебаний. Если амплитуда колебаний менее 2...3 мм, а давление менее 1,25 Н/мм², то соединение отсутствует или прочность его очень низка. Работа на больших амплитудах требует точного поддержания продолжительности сварки из-за наличия некоторого разброса показателей прочности. Максимальное значение прочности при сдвиге составляет 35 % прочности основного материала. Более высокая прочность, полученная в работе [54], может служить показателем эффективности применения промежуточных слоев из ненаполненного полимера. Вместе с тем в сообщении из Института композиционных материалов г. Кайзерлаутерна (ФРГ) [41] в сравнительном эксперименте указано, что сварка вибротрением обеспечила более высокую прочность при сдвиге соединения углепластика на основе полифениленсульфида и углеродной ткани саржевого переплетения (32 МПа), чем индукционная сварка (30 МПа), клеевое соединение (10 МПа) и заклепочное соединение (8 МПа). Проблемой и в области сварки вибротрением остается нарушение ориентации волокна, а также расслоение ТКМ. Хорошо свариваются этим методом две малогабаритные детали или малогабаритная и крупногабаритная, причем колебаниям подвергается меньшая по массе и размерам деталь. Сварка крупногабаритных деталей с трудом автоматизируется, но затраты на оборудование не являются препятствием на пути ее распространения.

Выводы по главе 3.

1. Хотя дефекты сварных соединений ненаполненных ПМ исследованы более широко, возможности применения ремонтной сварки для их устранения, а также дефектов в самих деталях практически не освещены.

2. Из опубликованных работ вытекает, что изучение свариваемости ТКМ и возникновения дефектов в сварных соединениях не перешло на более высокую ступень – исследование методов устранения дефектов, в частности, применением ремонтной сварки, которая широко вошла в область сварки металлов.

3. В основе развития ремонтной сварки лежит изучение специфических свойств ПМ,

Список использованных источников

1. Гончаренко В.А. Управляющий контроль качества изделий из пластмасс: Учебное пособие.- М.: МАТИ, 1991.- 73 с.
2. Taschenbuch DVS-Merkblätter und –Richtlinien. Fügen von Kunststoffen /13., überarbeit. und erweit. Auflage.-Berlin:Beuth Verlag GmbH, 2010.- 973 S.
- 3.. Синев В.П. Производственный контроль. «Сварка». Том 7 (Итоги науки и техники).- М.: ВИНТИ АН СССР, 1975.- С.72-138.
4. Проектирование, строительство и эксплуатация трубопроводов из полимерных материалов/ А.Н. Шестопап, В.С. Ромейко, В.Е. Бухин и др.; Под ред. А.Н. Шестопапа и В.С. Ромейко.- М.: Стройиздат, 1985.- 304 с.
5. Комаров Г.В. Сварка пластмасс. В кн.: «Сварка». Том 17 (Итоги науки и техники).- М.: ВИНТИ АН СССР, 1985.- С. 3-90.
6. Reinke M. Sicherung und Überwachung der Schweißnahtqualität an Kunststoffrohren// 3R-International.- 1983.-Bd. 22, Nr. 11.- S. 542-547.
7. Becker H.-J. Die zerstörende Prüfung zur Qualitätsüberwachung von HDPE-Schweißnähten//GWS. Gas/Erdgas.- 1983.-Bd. 124, Nr.10/11.-S. 573-578.
8. Benninghoff H. Schweißen und Kleben von Kunststoff// Maschinenschaden.- 1984.-Bd. 57, Nr. 2.- S. 47-48.
9. Potente H, Zeeuw K. de, Suchnek H.-J. Zerstörung Prüfen heizelementstumpfgeschweißter Kunststoffrohre // 3R-International.- 1977.- Bd. 16, Nr. 3-4.- S. 181-187.

10. Herforth H., Neitzel M. Beispiel zur Beurteilung und Prüfung von Schweißnähten an Kunststoff-Rohrleitungen// Plastverarbeiter.- 1976.- Bd. 27, Nr. 6.- S. 311-316.
11. Speybroeck H. Van. Dix ans d'expérimentation du soudage bout a bout du polyethylene haute densite en distribution// Gaz aujourd'hui.-1979.- V. 103, No. 6.-P. 257-270.
12. Horvath I. Ergebnisse der zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfung von stumpfgeschweißten Polyäthylen-Rohnähten// ZIS- Mitteilungen.- 1980.- Bd. 22, Nr. 8.- S. 910-917.
13. Кораб Г.Н., Адаменко А.А. Моделирование реологического процесса, протекающего при сварке полиэтиленовых труб нагретым инструментом встык// Автоматическая сварка.- 1984.- № 6.- С. 30-32.
14. Horvath I., Matus J. Hegesztett kemény polietilén csőkotések ultrahangos vizsgálatá// Gép.- 1983.- V. 35, No. 7.- P. 241-243/
15. Gütesicherung von Kunststoffschweißverbindungen //Maschinenbau.- 1979.- Bd. 8, Nr. 7-8.- S. 39-40.
16. Sievering F. Zerstörungsfreie Prüfung von PE-Schweißverbindungen// 3R International.-2008.- Bd. 47, Nr. 5.- S. 266-269.
17. Krell Th., Wetzl M. Zerstörungsfrei, schnell und bildgebend// Adhäsion.- Kleben und Dichten.- 2011.- Nr. 11.- S. 14-18.
18. Suchnek H.-J. Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißnähten an Kunststoffrohren// 3R-International.- 1978.- Bd. 17, Nr. 10.- S. 653-656.
19. Будадин О.Н., Кутюрин В.Ю., Кутюрин Ю.Г., Юхацкая О.В. Исследование возможности контроля сплошности сетчатых структур из полимерных композиционных материалов методом ультразвуковой термографии// 19 Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Самара, 6-8 сент., 2011: Тезисы докл.- М.- 2011.- С. 184-188.

20. Лобанов Л.М., Пивторяк В.А., Ткачук Г.И., Черкашин Г.В. Голографический контроль качества сварных соединений полимерных материалов// Автоматическая сварка.- 1986.- №. 1.- С. 29-32.
21. Thieme G. Fachkunde für Schweißer. Bd. 4. Plastschweißen.-Berlin: VEB Verlag Technik, 1980.- S.65-66.
22. Шестопад А.Н., Кораб Г.Н. Сварка пластмасс.- Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1992.-С. 110-112.
23. Комаров Г.В. Соединения деталей из полимерных материалов/Учебное пособие.- СПб.: Профессия, 2006.- 592 с.
24. Пат. США 4906313 на Fusion weld method and assembly for forming a fusion welded joint between pipe sections. МКИ В 29 С 65/34, НКИ 156/158/ Hill D.C.; R.W. Lyall and Co., Inc.- № 191557. Заявл. 09.05.88; Опубл. 06.03.90.
25. Тростянская Е.Б., Комаров Г.В., Шишкин В.А. Сварка пластмасс/ Учебное пособие.- М.: Машиностроение, 1967.- 252 с.
26. Комаров Г.В., Мацюк Л.Н., Шадрин А.А., Шестопад А.Н. Сварка термопластичных композиционных материалов. Обзор.- Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1992.- 32 с.
27. Словарь-справочник по сварке и склеиванию пластмасс / Г.Н. Кораб, А.Н. Шестопад, Г.В. Комаров и др. Под ред. Б.Е. Патона.- Киев: Наукова думка, 1988.- 160 с.
28. Сергеева Н.Л., Шешенев А.М. Разработка технологии и оборудования для сварки армированных пленочных материалов// Сварка полимерных материалов в трубопроводном строительстве.- М.: ВНИИСТ, 1985.- С. 85-96.
29. Benatar A., Gutowski T.G. Method for fusion bonding thermoplastic// SAMPE Quarterly.- 1986.- V. 18, No. 1.- P. 34-41.
30. Руководство по технологии контактной сварки полимерных пленок проплавлением. Р 330-78. - М.: ВНИИСТ, 1979.- 22 с.

31. Andrews J.R.F., Bevis M. The butt-fusion welding of PVDF and its composites. Part 2. The reinforcement and welding of PVDF with short carbon fibres// J. of Material Sci. – 1984. – V.19, No. 2.- P. 653-671.
32. Thermal bonding of carbon fibre PEEK composites/ W.J. Cantwell, P. Davies, P.-Y. Yar et al// J. Mater. Sci. Lett.- 1989.- V. 25, No. 9.- P. 1035-1039.
33. Kodokian G.K.A., Kinloch A.J. Structural adhesive bonding of thermoplastic fibre-composites// Bond. and Repair Compos.: Pap. One Day Semin., Birmingham, 14th July, 1989.- Guilford, 1989.- P. 57-61.
34. Silverman E.M., Griese R.A. Joining methods for graphite/PEEK thermoplastic composites// SAMPE J.-1989.- V. 25, No. 5.- P. 34-38.
35. Stevens T. Joining advanced thermoplastic composites// Mater. Eng.- 1990.- V. 107, No. 3.- P. 41-45.
36. Thermoplastic interlayer bonding of aromatic polymer composites/ F.N. Cogswell, P.J. Meakin, A.J. Smiley et al// Bond. and Repair Comp.: Pap. One Day Semin., Birmingham, 14th July, 1989.- Guilford, 1989.- P. 39-43.
37. Taylor N.S., Jones S.B. The feasibility of welding thermoplastic composite materials// Bond. and Repair Comp.: Pap. One Day Semin., Birmingham, 14th July, 1989.- Guilford, 1989.- P. 27-32.
38. Watson M.N., Taylor N.S. The feasibility of welding thermoplastic composite materials// Int. Conf. Join. and Cutt., Harrogate, 30 Oct.- 2 Nov., 1989. Prepr.- Cambridge, 1989.- P. 59/1-59/12.
39. Гончаренко В.А. Вытеснение армирующих волокон из сдавливаемого пакета// Новые материалы и технологии: Сб. тез. Докл. Росс. НТК. Направление «Композиционные», керамические и порошковые материалы и покрытия», 4-5 февраля 1997 г.; «МАТИ»- РГТУ им. К.Э. Циолковского.- М.:МАТИ, 1997.- С. 211.
40. Welder S.M., Lause H.J., Fountain R. Structural repair systems for thermoplastic composites// Materials and Design.- 1986.- V. 7, No. 3.- P. 147-149.

41. Reiner R., Mitschang P., Neitzel M. Induktionschweißen gewebe verstärkter Faser-Kunststoff-Verbunde// Schweißen und Schneiden.- 2001.- Bd. 53, Nr. 10.- S. 690, 692, 694-695.
42. Strong A.B., Johnson D.P., Johnson B.A. Variables interactions in ultrasonic welding of thermoplastic composites// SAMPE Quarterly.- 1990.- V. 21, No. 2.- P. 36-41.
43. Benatar A., Gutowski T.G. Ultrasonic welding of advanced thermoplastic// Mater. Pathway Future: 33 rd Int. SAMPE Symp. And. Exhib., Anaheim, Calif., 7-10 March, 1988.- Covina (Calif.), 1988.- P. 1787-1797.
44. Rogers M. Update on welding more science, less art// Plast. Technology.- 1981.- V. 27, No. 7.- P. 56-62.
45. Potente H., Reinke M. Thermoplast-Schweißbeignung und Einflussfaktoren auf die erzielbare Nahtqualität// Maschinenmarkt.- 1981.- Bd. 87, Nr. 64.- S. 1277-1279.
46. Wartenberg R. Verbinden von Kunststoffen durch Ultraschall// Plastverarbeiter.- 1975.- Bd. 26, Nr. 2.- S. 96-97.
47. Die Verschweißbarkeit von Kunststoffen mit Ultraschall// Konst. Elem. Meth. – 1981.- Bd. 18, Nr. 3.- S. 47-48, 50.
48. Krenkel W. Evaluation of welded and adhesive bonded carbon fibre reinforced poly(etheretherketone)// Eng Appl., New Composites: Int. Symp.: COMP'86, Patras, Aug., 1986.- Oxon, 1988.- P. 119-126.
49. Kodokian G.K.A., Kinloch A.J. Structural adhesive bonding of thermoplastic fibre-composites// Bond. and Repair Comp.: Pap. One Day Semin., Birmingham, 14th July, 1989.- Guilford, 1989.- P. 57-61.
50. Гончаренко В.А.. Шишкин В.А. Оптимизация режимов сварки термопластичных волокнитов// Сварка и склеивание изделий из полимерных материалов: Сб. научн. Тр.- Киев: ИЭС им. Е.О. патона, 1987.- С. 71-76.
51. Barbari N. E. Optimierung der Schweißparameter beim Ultraschallschweißen// DVS-Berichte.- 1988.- Bd. 111.- S. 1-5.

52. Altena R., Mengason J. Praktische Anwendung des Vibrationsreibschweißens// DVS-Berichte.- 1990.- Bd. 111.- S. 3034.
53. White P. Vibration welding of thermoplastics// Join. And Mater.- 1988.- V. 1, No. 6.- P. 277-279.
54. Maguire D.M. Joining thermoplastic composites// SAMPE Journal.- 1989.- V. 25, No. 1.- P. 11-14.

Глава 4 Исследование ремонтной сварки термопластичного композиционного материала

Как показано в главах 1 и 3, среди технологий ремонта деталей из ПМ менее всего изученной является ремонтная сварка. Нам представлялось, что, учитывая широкое и эффективное применение сварки при ремонте металлических изделий, изучение возможностей ремонтной сварки ПМ заслуживало большего внимания у специалистов-ремонтников изделий из ПМ с того момента, как только начались исследования свариваемости ПМ. Однако такого развития ремонтной сварки ПМ не произошло. В литературе имеются лишь отрывочные сведения о применении сварки для устранения дефектов в деталях из ПМ, например, автомобильного назначения. Обнаружить такие сведения в литературе государства Мьянма вообще не удалось. Объяснить такое состояние с ремонтной сваркой ПМ можно несколькими причинами.

1). Из-за низкой стоимости способных свариваться деталей из ПМ массового производства после появления в них дефектов или повреждений эффективнее ремонта может быть их замена на бездефектную деталь.

2). Потребность в ремонте, как это видно из зарубежного опыта, возникает в большей степени при эксплуатации изделий из дорогих термопластов, таких как, например, полиэфирэфиркетон. В российской практике и практике развивающихся стран проблем с применением ремонта к таким изделиям нет, так как объем их выпуска весьма ограничен.

3). Ремонт таких сооружений как полимерные трубопроводы фактически представляет замену дефектных участков на цельные трубы. Такая технология ремонта ничем не отличается от технологии сварки трубопроводов. Она не укладывается в рамки общепринятой технологии устранения дефектов, ремонт которых с применением тепловой сварки требует использования, порой, дорогого, а потому менее доступного оборудования.

4). Применение тепловой ремонтной сварки для каждого изделия представляет собой часто решение индивидуальной задачи, а для выполнения ее требуются соответственно подготовленные кадры.

5). При попытке осуществить ремонтную сварку тепловыми методами не всегда удавалось восстановить исходные свойства изделия.

В связи с вышеизложенным посчитали, что более просто в техническом отношении и экономично будет выполнить ремонтную сварку растворителем¹⁾. Полагали, что данные по ремонтной сварке растворителем позволят сделать выводы вообще об эффективности ремонтной сварки при восстановлении несущей способности дефектных деталей из ТКМ. Чтобы оценить возможности ремонтной сварки растворителем, было логичным в настоящей работе провести некоторые сравнительные эксперименты по осуществлению ремонтной сварки модельных образцов из выбранного типа ТКМ также и тепловыми методами.

Сварка растворителем относится к виду термомеханического класса [1, с. 15], объединяющему способы, при выполнении которых активация свариваемых поверхностей происходит при временном присутствии растворителя. Сварка растворителем заключается в смачивании соединяемых поверхностей материалом, содержащим растворитель ПМ, приведении их в контакт и выдержке под давлением до момента затвердевания материала сварного шва. Понятие «сварка растворителем» было впервые введено в российской сварочной литературе в учебном пособии, изданном кафедрой «Технология переработки неметаллических материалов» МАТИ [2]. По своей структуре получаемый шов характеризуется плавным переходом от материала одной детали к материалу другой детали и не имеет структурных признаков клеевого соединения, а потому способ образования соединения с

¹⁾Комаров Г.В., Аунг Тху Хан. Применение сварки при ремонте деталей из термопластичных композиционных материалов// Сб. научн. трудов V Междунар. конф. «Новые перспективные материалы и технологии их получения. НПМ-2010». Волгоград, 14-16 сент. 2010 г. – Волгоград: Волг. ГТУ, 2010. – С. 157-159.

помощью растворителя не может относиться к склеиванию, как долгое время называли этот способ.

Достоинствами сварки растворителем являются:

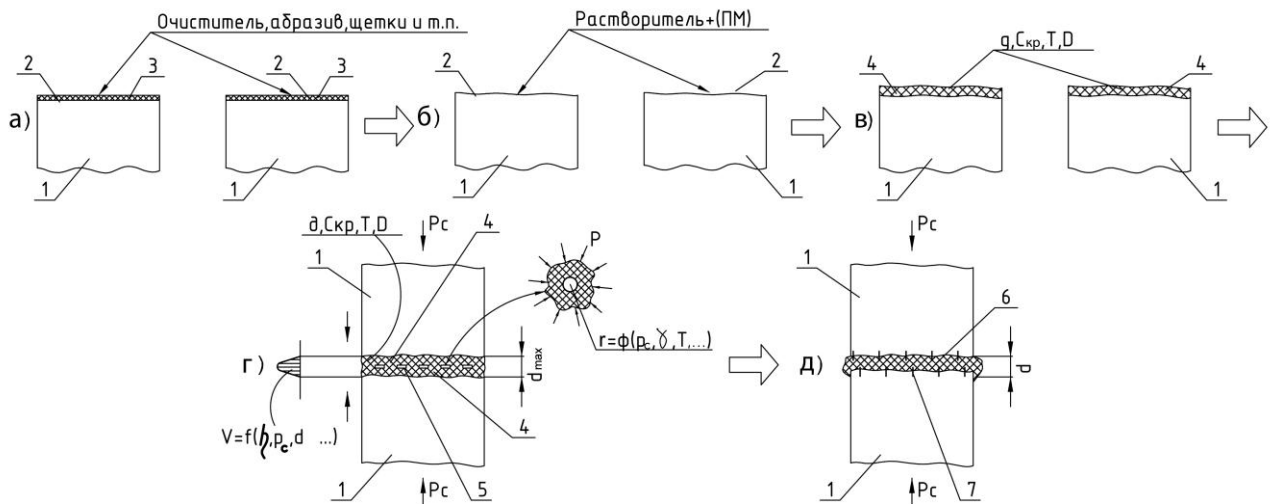
- возможность локализации воздействия на свариваемый материал только в зоне соединяемых поверхностей, к которым в том числе трудно подвести теплоту;
- возможность соединения трудно свариваемых тепловым методом термопластов (поливинилхлорида, полиэтилентерефталата, фторсополимеров, полиамидов и др.) и таких полуфабрикатов из них, как ткани и тонкие пленки;
- возможность соединения органических стекол с получением оптически прозрачных швов;
- возможность использования малоквалифицированного персонала;
- пригодность к применению при изготовлении как единичных, так и крупной партии изделий;
- возможность соединения некоторых разнородных термопластов;
- отсутствие потребности в приложении больших давлений и сложной аппаратуры;
- низкий уровень или вообще отсутствие затрат на тепловую энергию.

Для ускорения сварки растворителем можно пользоваться дополнительным нагревом. В некоторых случаях растворяющая способность присадочного материала по отношению к ПМ проявляется только при нагреве.

На кафедре ТПНМ МАТИ неоднократно прибегали к использованию сварки растворителем при решении сложных задач соединения деталей из некоторых проблемных ПМ [3,4]. Поэтому в методическом плане проведение исследований по ремонтной сварке растворителем затруднений не вызвало.

Если характеризовать физическую модель сварки растворителем, то ее можно отнести к схеме условно названной «температура – давление» и введенной в технологию сварки Г.В. Комаровым [5, с. 337]. Согласно этой схеме после подготовки соединяемых поверхностей (рисунок 4.1, а) вначале

производится их активирование растворителем (рисунок 4.1, б), а затем поверхности с нанесенным присадочным материалом (рисунок 4.1, в) приводятся в контакт (рисунок 4.1, г). При этом идет сглаживание присадочного материала в местах его выступов, сопровождающееся разобщением и сфероидизацией воздушных включений между выступами. Чтобы удалить пузырьки воздуха, находящиеся в присадочном материале в условиях гидростатического сжатия, и получить, таким образом, монолитный (бездефектный шов), необходимо обеспечить осадку зоны шва приложением давления p_c и в результате этого течение присадочного материала вдоль соединяемых поверхностей. Особых доказательств адекватности этой модели не требуется, ибо она вполне согласуется с особенностями сварки ПМ.



1 - соединяемые детали; 2 - свариваемые поверхности; 3 – загрязнения (смазка, жиры, пыль и т.п.); 4 – присадочный материал, содержащий растворитель; 5 - воздушное включение; 6 - сварной шов; 7 – межмолекулярные связи. t_i – текущее время; $t_{об}$ - продолжительность открытой выдержки; $t_{св}$ – продолжительность сварки; p_c - давление во время фазы образования соединения; $p_{гп}$ - давление газового пузырька; $p_{гп} = p_c + 2\gamma/r$, γ - поверхностное натяжение присадочного материала; T - температура деталей; V - скорость течения расплава; η – вязкость расплава; R_z - параметр шероховатости свариваемых поверхностей; g – расход присадочного материала; $C_{кр}$ – критическая концентрация растворителя, соответствующая переходу смеси полимер+растворитель из расплавленного (жидкого) в твердое состояние; D – коэффициент диффузии растворителя в ПМ; d_{max} – максимальная толщина размягченного слоя, $d_{max} = \beta g / C_{кр}$; $t_{св} = g^2 / \alpha C_{кр}^2 D$; α , β – постоянные. $a, б, в - t_i = 0$; $г - t_i = t_{об}$; $д - t_i = t_{об} + t_{св}$.

Рисунок 4.1 - Физическая модель сварки ПМ жидким при комнатной температуре растворителем.

Как и при тепловой сварке ПМ, и вообще при сварке любых материалов сварка растворителем основана на заполнении межконтактного зазора между соединяемыми поверхностями материалом соединяемых деталей благодаря локальному и кратковременному изменению состояния последнего и в данном случае с применением присадочного материала. Растворитель в составе присадочного материала способствует изменению состояния полимера деталей – переводу его в зоне шва в вязкотекучее состояние. Макромолекулы полимера деталей диффундируют в присадочный материал, а макромолекулы полимера присадочного материала диффундируют в полимер деталей. Как показали исследования В.А. Гончаренко [6,7], причиной сегментального взаимопроникновения макромолекул свариваемых слоев являются их деформации сжатия-растяжения под действием прижимающего усилия в условиях ламинарного вязкого течения размягченного под влиянием растворителя ПМ. Обмен макромолекулами между соединяемыми слоями обусловлен проникновением растворителя из зоны контакта в объем полимера.

После удаления растворителя из зоны контакта процесс взаимопроникновения макромолекул прекращается. Снижение концентрации C растворителя до критического уровня $C_{кр}$ является условием окончания процесса сварки. Однако шов и в эластическом состоянии может сопротивляться внешней нагрузке, т.е. можно добиться так называемой его ручной прочности, не дожидаясь затвердевания материала шва.

Установление количественной аналитической связи между качеством сварного соединения и различными технологическими факторами представляет собой сложную задачу, решаемую постановкой экспериментов, не связанных со сваркой. Легче эту задачу решить, изучая зависимость показателей качества сварных соединений от изменения параметров процесса. Как и при тепловой сварке ПМ, важнейшим интегральным критерием качества сварных соединений является прочность. К основным параметрам процесса при выбранном растворителе можно отнести его расход, продолжительность откры-

той выдержки, давление и продолжительность закрытой выдержки (собственно сварки). Перед проведением экспериментов по изучению ремонтной сварки первая серия опытов касалась нахождения режимов сварки, обеспечивающих прочное присоединение накладок к дефектным участкам деталей.

Отсутствие широкой сырьевой базы не позволило проводить в России исследования свариваемости ТКМ на основе таких высококачественных матриц как полиэфирэфиркетон, полифениленсульфид, жидкокристаллические термопласты и полиэфиримид, доступные западным специалистам [8,11]. Более доступным и представляющим также практический интерес для промышленности Мьянмы оказался полисульфон, относящийся к большой группе теплостойких термопластов конструкционного назначения, сохраняющих работоспособность при длительной эксплуатации при температурах от -100 до $+250^{\circ}\text{C}$ [9] (от -60 до $+150^{\circ}\text{C}$ [11]). Он полностью отвечает требованиям авиационных правил АП-25 (сертификат FAR-25) по горючести и дымообразованию и рекомендован в РФ для изготовления деталей конструкционного и электротехнического назначения с температурой эксплуатации до 150°C [11]. В связи с этим в качестве объектов исследования выбраны материалы на основе этого термопласта.

Основной объем экспериментов проведен с листовым стеклопластиком (толщиной от 0,35 до 2,0 мм) марки КТМС-1П на основе стеклоткани Т-15(П)-76 и полисульфона марки ПСФ-150 (ТУ 6-06-31-99). Содержание матрицы в образцах было постоянным и составляло около 50 %-масс. Его на поверхности было достаточным для выполнения даже тепловой сварки без введения дополнительных присадочных прослоек из материала матрицы. Наряду со стеклопластиком в работе использовали ненаполненные полисульфоны марки ПСФ-150 в виде гранул, прутков диаметром 3 мм и пластинок и марки ПС-Н в виде пленки (ТУ 6-05-1969-84) толщиной 50 мкм. Основные механические свойства используемых в работе материалов российского производства приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Механические свойства при комнатной температуре ПМ,
используемых в экспериментах по сварке.

Свойства	Полисульфон ПСФ-150	Стеклопластик КТМС-1П ^{*)}	Углепластик КТМУ-1 ^{**)}
Плотность, г/см ³	1,22	1,53-1,58	1,38
Предел текучести, МПа	76	-	-
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	60	330/(328-472)	1000
Модуль упругости при растяжении, ГПа	-	15/17	130
Относительное удлинение при разрыве, %	35	2,9/(2,0-4,7)	0,75
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа		320/-	
Разрушающее напряжение при сдвиге, МПа		-/14,64 ^{***)}	
Разрушающее напряжение при статическом изгибе, МПа	85	440/-	
Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	2,6	14,0/-	
Водопоглощение за 24 ч, %	0,3		0,15

^{*)}В числителе приведены паспортные данные, в знаменателе – экспериментальные для разных толщин.

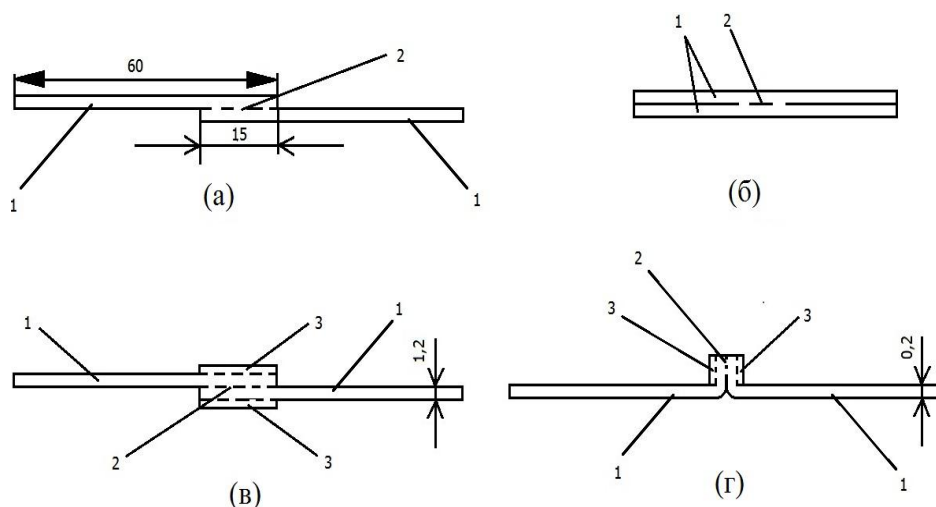
^{**)}На основе пленки из полисульфона ПС-Н и ленты ЭЛУР-0,08 П, пропитанной аппретирующим составом РТА. Изготовлен прессованием.

^{***)}Согласно ГОСТ 24778-81 у образца толщиной 4 мм.

При выборе режимов сварки растворителем, а также (для сравнительных исследований) при сварке нагретым инструментом преимущественно применяли образцы в виде пластинок размером 60x20 мм, вырезанных гильотинными ножницами из листов стеклопластиков и имеющих продольную ось в направлении основы стеклоткани в составе стеклопластика. Из образцов такого размера изготавливали нахлесточные соединения согласно ГОСТ Р ИСО 17659 2009 с длиной перекрытия 15 мм (рисунок 4.2, а). Считали, что такие

образцы соединений имитируют достаточно распространенный вид дефекта – сквозное отверстие, ослабление которым компенсируется накладкой, присоединяемой по кромке отверстия. Влияние режимов и условий сварки оценивали на образцах параллельных соединений (рисунок 4.2, б) согласно ГОСТ Р ИСО 17659-2009 по методике, предложенной в работе [5, с. 348]. Испытывая образцы параллельных соединений, можно судить об эффективности устранения расслоений в ТКМ. При изучении возможности усиления нахлесточного и Т-образного сварных соединений применяли образцы с привариваемыми накладками (рисунок 4.2, в и г).

Качество сварных соединений оценивали визуально по изменению формы и размеров образцов после сварки и испытанием при растяжении на машинах Tiratest 2300 и ИР 5040-5 при комнатной температуре для определения прочности при сдвиге. Скорость нагружения составляла 5 или 10 мм/мин. Расстояние между зажимами составляло 40, 65 или 75 мм.



1 – соединяемые пластинки; 2- шов; 3- накладки.

Рисунок 4.2- Схема образцов сварных соединений листовых ТКМ, используемых в работе:

Поскольку, как предполагалось, сварка растворителем даст возможность исключить нарушение структуры ТКМ, то представляло интерес перед ее изучением исследование ограничения деформирования материала в зоне шва применением при тепловой сварке дистанционных

элементов, известных в технологии склеивания [5, с. 535] с целью оценки возможности этого метода при выполнении ремонта. Наиболее простой и поэтому доступной из числа тепловых методов можно считать сварку нагретым инструментом, в частности, косвенным нагревом.

4.1 Исследование сварки нагретым инструментом косвенным нагревом

Как показано в разделе 3.3, для реализации свойств ТКМ в сварном соединении предпочтительнее применять сварку нагретым инструментом прямым нагревом. Однако для проведения ремонта деталей из ТКМ наиболее подходит сварка косвенным нагревом. Поэтому была проведена небольшая серия опытов по сварке нагретым инструментом косвенным нагревом. На основе анализа результатов работ по изучению свариваемости ТКМ (см. раздел 3.3) сделан вывод, что сохранить структуру материала в зоне шва, а вместе с этим и обеспечить высокую прочность соединения без ограничения осадки в указанной зоне не представляется возможным. Визуальный осмотр сварных образцов, уложенных непосредственно между плитами, показал, что контактирование пластинок с нагретыми плитами приводит к их вздутию на всем участке, примыкающем к шву, в результате парообразования из поглощенной материалом воды. В середине образцов легко заметить расслоение. Толщина пластинок в результате вздутия возросла от 1,9 мм до 2,6-2,8 мм. При отсутствии дистанционного элемента, как и ожидали, фиксировали сильное утонение шва до 2,7 мм. Наполнитель потерял исходную ориентацию в результате течения расплава матрицы, наиболее сильного в середине пластинок (рисунок 4.3). В процессе такой сварки происходило фактически изменение формы и размеров образцов, а поэтому считать ее пригодность для ремонта листовых деталей не представляется возможным, хотя прочность соединения была достаточно высока (около 1800 Н/см²). Сравнивать эту прочность с прочностью ТКМ при сдвиге нельзя, так

как нахлесточное соединение в результате расплющивания зоны перекрытия переформовывалось (рисунок 4.4) в двухстороннее врезное [5, с. 512]. Чтобы не сделать на основе этих данных о прочности сварных соединений расплющенных образцов ошибочный вывод о пригодности такой сварки со значительным изменением структуры ТКМ, необходимо провести дополнительные исследования по испытанию сварных соединений при различных условиях нагружения. Тем не менее, и без этого видно, что величина прочности сварного соединения 1800 Н/см существенно ниже прочности материала при растяжении (таблица 4.1).



Рисунок 4.3 – Общий вид сварных образцов, изготовленных сваркой нагретым инструментом косвенным нагревом без применения дистанционного элемента (фото образцов - вид сверху)



Рисунок 4.4 – Переформовывание образца нахлесточного соединения (см. рисунок 4.2,а) в двухстороннее врезное соединение при сварке нагретым инструментом косвенным нагревом (вид сбоку); *a* – место сварки.

Для ограничения осадки материала шва применили дистанционные элементы из стальных пластинок, толщина которых меньше суммарной толщины свариваемых образцов на задаваемую величину осадки ТКМ в зоне сварки. Сварку образцов осуществляли между нагретыми до температуры $290\pm 5^\circ\text{C}$ плитами прессы с гидравлическим приводом с максимальной мощностью 10 тс. Теплоту к зоне перекрытия образцов подводили от плит посредством верхнего и нижнего брусков, играющих роль инструментов и площадь рабочей поверхности которых перекрывала площадь сварки. На основе предварительных

экспериментов установлено, что прочность соединения при сдвиге при изменении осадки зоны шва от 0,1 до 0,2 мм не меняется. Поэтому большинство образцов было сварено при ограничении осадки ТКМ величиной 0,1 мм. Изготовление сварных образцов осуществлялась в такой последовательности. Собранные по схеме 4.2, а образцы помещали между указанными брусками, на которых находился антиадгезионный слой из фторопластовой пленки, после чего верхнюю плиту опускали до соприкосновения с верхним брусом. Температура на соединяемых поверхностях достигала температуры плит через 2 мин после их смыкания. Вслед за этим создавали давление с целью уплотнения в зоне контакта свариваемых поверхностей. После выдержки при температуре сварки в течение заданного времени производили размыкание нагретых плит, сваренные образцы извлекали и помещали для охлаждения шва между плитами, имеющими комнатную температуру. Охлаждение сваренных образцов длилось около 5 мин. Выдержку при температуре сварки изменяли в пределах от 1 до 5 мин. Сварку выполняли как без присадки, так и с введением между соединяемыми участками пленки из полисульфона ПС-Н.

Эксперименты подтвердили, что использование дистанционных элементов позволяет регулировать степень осадки материала шва и благодаря этому сохранять в заданных пределах его структуру и достигать необходимой прочности соединения. Испытанием сварных образцов установили, что прочность сварных соединений может быть на уровне 80-90 % прочности ТКМ при сдвиге. Однако сварка нагретым инструментом косвенным нагревом с использованием дистанционных элементов в условиях ремонта листовых деталей на изделии, особенно при одностороннем доступе к нему, в частности, для присоединения накладок к обшивкам ремонтируемых панелей нам представляется невозможной из-за сложности оснащения. Поэтому более детальные исследования сварки нагретым инструментом косвенным нагревом посчитали нецелесообразными.

Для оценки способности соединяться сваркой экструзионным методом и сваркой нагретым газом с присадочным материалом применяли пластины размером 160x75. Образцы такого размера сваривали встык с накладкой.

4.2 Исследование сварки растворителем термопластичного композиционного материала

Сварку полисульфона можно выполнять с помощью чистого растворителя или лаковой композиции, представляющей собой раствор полимера в органическом растворителе. Подобных полимеризующимся композициям, применяемым, например, при сварке растворителем полиметилметакрилата, присадочных материалов для полисульфона не существует. Применение же чистого растворителя без введения повышающего вязкость присадочного материала неэффективно с точки зрения технологии сварки и не дает требуемой прочности сварного соединения. Поэтому остановились на методе сварки с применением в качестве присадочного материала преимущественно лаковой композиции.

Исследования в этой части работы касались выбора растворителя и состава присадочного материала, определения режимов сварки, оценки прочности сварных соединений при сдвиге и разработки технологических рекомендаций по переходу к ремонтной сварке ТКМ¹⁾. В методическом плане эти исследования научной новизной не отличаются. Наибольший интерес представляет изучение возможности упрочнения сварных соединений методами, известными для других адгезионных соединений.

4.2.1 Выбор растворителя и состава присадочного материала

При выборе растворителя для конкретного полимера исходят из того, что разность между параметрами растворимости полимера и растворителя не должна превышать $2,5 \text{ (МДж/м}^3\text{)}^{1/2}$. Растворимость полисульфона изучена, и в

¹⁾Аунг Тху Хан, Г.В. Комаров. Исследование возможности восстановления прочностных термопластичных композиционных материалов, имеющих дефекты, с помощью сварки// Научные труды, МАТИ, 2011 г. Вып. 18(90).- С. 13-18.

настоящей работе при выборе растворителя для приготовления присадочного материала руководствовались литературными данными. Хорошо растворяющие полисульфон диметилформамид и диметилацетамид труднее удаляются из сварного шва и достаточно токсичны. Поэтому остановили свой выбор на хлорсодержащих углеводородах – хлорбензоле, хлороформе и метиленхлориде. У хлорбензола температура кипения 132 °С, у хлороформа 61,2 °С, у метиленхлорида 40,0 °С. В целом хлороформ отличается высокой скоростью сорбции вглубь полисульфона и вместе с тем временным характером пластицирующего действия на полимер, т.е. может быстро диффундировать в периферийные участки зоны шва и таким образом способствовать быстрому затвердеванию его материала. Хлорбензол из-за более высокой температуры кипения имеет меньшую скорость испарения [10]. Работа с метиленхлоридом требует достаточно герметичной упаковки для хранения присадочного материала.

Присадочный материал готовили растворением при комнатной температуре гранулированного, порошкообразного (марки ПСФ-150) или пленочного (марки ПС-Н) полисульфона в хлороформе или для оценки его хранимости - в метиленхлориде. Присадочный материал становится годным для осуществления сварки по истечении от 0,5 ($T = 25 \pm 3^\circ\text{C}$) до 1 ч ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$), считая от начала его приготовления. Качество раствора оценивали визуально по его однородности, по отсутствию включений из нерастворившихся частиц полимера и механических примесей.

В работе были подтверждены данные стоматологов из Osaka University (Япония) [10], исследовавших сварку чистого полисульфона, что оптимальным содержанием полисульфона в составе присадочного материала является 23 %-масс. Присадочный материал с содержанием полисульфона около 10 %-масс. не обеспечивал получение сплошного сварного шва, иногда приводил к расслоению ТКМ в результате проникновения растворителя в толщу материала, а потому и высокой прочности сварного соединения не достигали. При содержании полимера более 25 % из-за повышенной вязкости присадки при ее нанесении не достигали монолитности сварного шва. Воздействие на сварщи-

ка со стороны растворителя присадочного материала ограничивается хранением его и приготовленных на его основе препрегов в герметичной упаковке, в которой сохраняется соотношение полисульфон/хлороформ.

Эксперименты показали, что присадочный материал с выбранным содержанием полимера при хранении в герметично закрытой стеклянной емкости пригоден для осуществления сварки в течение не менее одного месяца. Затаривание его в алюминиевые тубы позволит собрать удобный в работе комплект ремонтного оснащения.

4.2.2 Изготовление и испытание на прочность сварных соединений

Сварку образцов осуществляли в такой последовательности. Соединяемые внахлестку участки образцов на длине перекрытия 15 мм протирали тампоном, смоченным спиртом, и выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение 1 ч. Присадочный материал наносили на свариваемые участки образцов кистью, а при дозировании - с помощью шприца, выдерживая равномерную толщину слоя в пределах 1,0-1,2 мм. Расчеты показали, что расход присадки составляет 20-30 мг/см², т.е. близок к расходу клеев-растворов. При работе одного оператора открытая выдержка первого из пары образцов была неизбежна, так как присадочный материал наносился на пластинки последовательно. Но эта выдержка была очень кратковременной и длилась до момента приведения пластинок в контакт. Взвешивание образцов после быстрого нанесения присадки показало, что увеличение сухого остатка с 23 до 38 % в открытом при комнатной температуре в течение 1 мин слое присадки на поверхности ТКМ не препятствовало сплавлению (совмещению) свариваемых поверхностей, на которых образовывались сухие пленки. Остаточного количества растворителя в слоях присадки было достаточно для растворения сухих пленок. В связи с этим образцы приводили в контакт вручную и вслед за этим создавали давление в интервале времени после нанесения присадки не более 1 мин. При создании давления на винтовом прессе на образцы укладывали слой

из пористой резины, которая обеспечивала равномерный прижим соединяемых участков. Давление грузами или с помощью струбцин действовало в течение всего периода выдержки до момента испытания сварных соединений на прочность.

Воспроизводимые показатели прочности сварных соединений получали при нанесении присадки на обе соединяемые поверхности (рисунок 4.5).

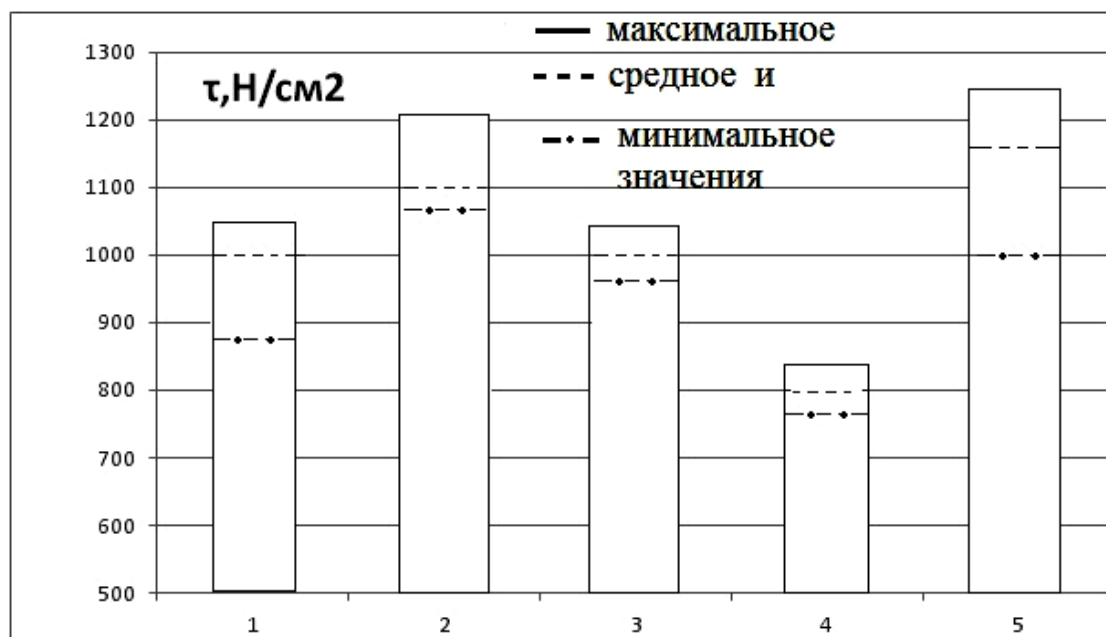


Рисунок 4.5 – Прочность τ при сдвиге (ГОСТ 14759-69) сварных соединений полисульфонового стеклотекстолита КТМС-1П, изготовленных сваркой растворителем. Присадка: 12 %-ный раствор (1,2) и 23 %-ный раствор (3-5) ПСФ-150. Присадку наносили на одну поверхность (1) или на две поверхности (2-5). Толщина стеклотекстолита: 1,0-1,2 мм (3), 0,35 мм (4) и 2,0 мм (1,2,5).

Продолжительность сварки 4 суток.

В результате исследований установлено, что зависимость прочности при сдвиге от продолжительности выдержки для затвердевания материала шва практически не меняется в зависимости от толщины ТКМ за пределом 4-7 суток. Образцы из материала толщиной 2 мм, сваренные с применением 12 %-ного раствора полисульфона, показали прочность при сдвиге на уровне 1000 Н/см². Если разрушающую нагрузку отнести к истинной поверхности разрушения, то прочность составит 1200-1300 Н/см². При нанесении присадки только на одну из соединяемых поверхностей прочность при сдвиге составила не более 900 Н/см² при разрушении образцов у границы перекрытия. Прочность

при сдвиге сварных соединений, изготовленных с применением 23 %-ного раствора полисульфона, находилась на уровне 1000 Н/см^2 для материала толщиной 0,35 мм, 790 Н/см^2 для материала толщиной 1,0-1,2 мм и $1100-1200 \text{ Н/см}^2$ для материала толщиной 2 мм. Характер разрушения образцов зависел от толщины ТКМ. При толщине 0,6 мм и при длине перекрытия до 10 мм был отрыв матрицы от стеклоткани (рис. 4.6), а при длине перекрытия более 10 мм происходил разрыв ТКМ около шва. Различия в прочности сварных соединений объясняются различиями прочности ТКМ разных толщин, которые формировались при разных режимах. В отличие от соединений, изготовленных сваркой нагретым инструментом косвенным нагревом, образцы сохраняли в зоне сварного шва ориентацию наполнителя (рисунок 4.6). Сравнить прочность соединений с экспериментально найденной прочностью τ при сдвиге материала КТМС-1П толщиной 4 мм не представлялось возможным из-за отсутствия данных о величине τ для тонких образцов материала КТМС-1П. Повышенная прочность сварных образцов, изготовленных с применением присадки с содержанием Q сухого вещества 23 %, может быть также объяснена образованием большего наплыва по кромке шва, чем при использовании присадки с меньшим Q . Такая зависимость от величины наплыва наблюдается в клеевых соединениях [5, с. 518].

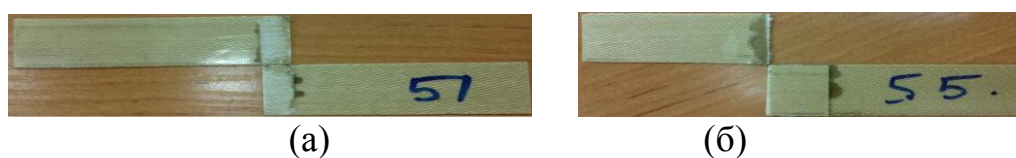


Рисунок 4.6 – Общий вид нахлесточных образцов сварных соединений, разрушившихся по зоне перекрытия ($l_{\text{п}} = 5 \text{ мм}$) в результате отрыва связующего от наполнителя (а) или разрыва около шва (б) ($l_{\text{п}} = 15 \text{ мм}$)

Обнаружено, что при сварке растворителем присадочный материал в отличие от склеивания жидким клеем достаточно нанести на одну из соединяе-

мых поверхностей, что является важным преимуществом такой сварки при выполнении ремонтных работ. Такое отличие в технологиях объясняется различием механизмов склеивания и сварки растворителем. Более низкая, чем у клея, не содержащего растворитель, вязкость присадочного материала и совмещение его с полимерным слоем на поверхности ТКМ исключают образование пор на границе присадочный материал/субстрат, которые удаляются только при двухстороннем нанесении клея (присадки).

Для процессов, сопровождающихся постепенным нарастанием прочности соединения, важным является не только определение выдержки, которая приводит к достижению максимальной прочности соединения, но и времени, достаточном для передачи соединенных деталей на последующую сборку или для их извлечения из сборочного устройства. Достижимая при этом прочность называется «ручной». Ее уровень достаточен, чтобы детали не сместились относительно друг друга.

В работе определяли как время $t_{мп}$, достижения максимальной прочности соединения, так и выдержку $t_{рп}$, достаточную для достижения «ручной» прочности. Параллельно с зависимостью $\tau = f(t)$ находили зависимость потери присадкой растворителя. У образцов нахлесточных соединений через 4-5 мин закрытой выдержки при нормальной температуре достигли прочности при сдвиге около 0,2 МПа. За это время из зоны шва испарилось около 16 % растворителя (рисунок 4.7). Вместе с тем определение прочности при сдвиге еще не дает ответа на вопрос, в каком состоянии находится полимерная матрица в зоне контактирующих образцов. Даже при наличии растворителя в этой зоне соединение, нагружаемое одновременно по всей его поверхности, может сопротивляться разрушению. Поэтому провели исследование влияния выдержки на прочность соединения при расслаивании, которая более чувствительна к деформационным свойствам материала шва, чем прочность при сдвиге, и не зависит от площади соединения, а зависит от его ширины при одинаковых других параметрах.

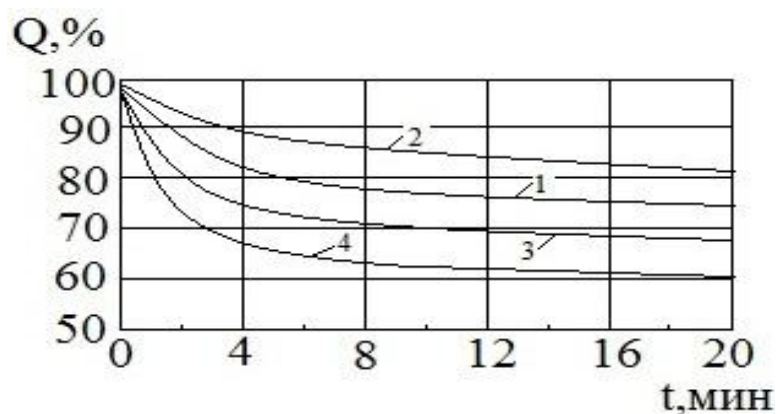


Рисунок 4.7 – Кинетика испарения хлороформа из присадочного материала на основе полисульфона ПСФ-150, расположенного между свариваемыми поверхностями (1,3), между предметными стеклами (2) и на поверхности предметного стекла (4) при температуре 20 °С (1,2,4) и 60 °С(3).

Свариваемым пластинкам шириной 10 мм из стеклотекстолита КТМС-1П толщиной 0,2 мм придавали формованием Г-образный вид, чтобы после сварки получить Т-образное соединение (см. рисунок 4.2). Присадку наносили с помощью шприца на обе полки Г-образных образцов, которые, не давая открытой выдержки, приводили в контакт и размещали в струбцинах, создавая на все образцы одинаковое давление. По истечении различного времени выдержки Т-образные образцы извлекали из струбцин и испытывали при растяжении, определяя прочность при расслаивании. В отличие от нахлесточных образцов через 25 мин выдержки «ручной» прочности при расслаивании соединения достигнуть не удалось (таблица 4.2). Более того, растворитель в шве присутствует в таком количестве, что при расслаивании образцов образуются «тяжи». Более надежное и пригодное для передачи сварного изделия на следующую операцию соединения можно получить за время выдержки 60 мин, если при этом на соединение большие расслаивающие нагрузки не действуют. Возникновения тяжей в этом случае не обнаружено. Визуальный контроль и взвешивание указали на отсутствие растворителя: образцы органолептически казались сухими. Небольшая толщина ТКМ в этом эксперименте не препятствовала быстрому удалению растворителя из шва.

Влияние продолжительности t выдержки от момента контактирования до момента испытания Т-образных сварных образцов стеклотекстолита КТМС-1П при растяжении при комнатной температуре на их прочность P .

t	25 мин	60 мин	5 суток	7 суток
P^* , Н/см	0	9,0	54	53

*Средние результаты испытания не менее 3-х образцов на один вариант режима

Учитывая, что основным недостатком сварки растворителем является большая продолжительность процесса, была проведена небольшая серия опытов по его ускорению применением дополнительной термообработки в термощкафу при температуре 55 °С (ниже температуры 61,2 °С кипения хлороформа), с целью оценки ее влияния на прочность соединения. Как и ожидали, происходит ускорение удаления растворителя из шва (см. рис. 4.7, кривая 4). Время выхода на уровень прочности, достигаемой через 7 суток выдержки при комнатной температуре, при термообработке при 55 °С составляет 10-15 мин. Вместе с тем повышения прочности соединения по сравнению с прочностью соединения без термообработки не обнаружили. Результаты этих экспериментов показали возможность осуществления ускоренной ремонтной сварки с применением специально подобранных нагревателей, не требующих подвода электроэнергии, например, в виде термохимической ленты, представляющей собой гибкий пиротехнический элемент.

4.2.3 Исследование влияния режимов и условий сварки на свойства свариваемого материала

Как показано выше (см. разделы 3.3 и 4.1), при тепловой сварке ТКМ возможно изменение структуры и свойств материала в зоне сварного шва. Одним из методов доказательства таких изменений считают фиксирование низкого значения прочности сварного соединения по сравнению с прочностью свариваемого материала, т.е. низкого значения относительной прочности v

сварного соединения. В качестве показателя прочности сварного соединения листовых ТКМ наиболее часто используют прочность при сдвиге, которую находят, испытывая образцы нахлесточных соединений. В работе [12] установлено, что снижение прочности нахлесточных сварных соединений по сравнению с прочностью ПМ при растяжении происходит в результате специфики нагружения зоны шва, когда усилие на него передается от более тонкого околошовного участка образца, т.е. через зону концентрации напряжений, которой нет в испытываемом на растяжение гладком образце. Чтобы исключить влияние этого фактора в цитируемой работе предложено для сравнения с прочностью исходного ПМ испытывать образцы параллельного соединения (см. рисунок 4.2, б).

Поскольку при изучении прочности сварных соединений зафиксировано снижение ее показателей по сравнению с прочностью свариваемого материала, (см. раздел 4.2.2) для выяснения, не является ли причиной такого факта действие растворителя, были изготовлены в соответствии с рекомендациями [12] образцы параллельных соединений пластинок шириной 15 мм и длиной 150 мм из модельного стеклотекстолита КТМС-1П толщиной 0,4 мм. Присадку в количестве, принятом при сварке нахлесточных образцов, наносили в средней части пластинок на участке длиной 10 мм. Давление на шов, исключаящее образование пор, создавали грузом. Образцы испытывали при растяжении при стандартной скорости нагружения 5 мм/мин через 7 суток их выдержки после приведения свариваемых поверхностей в контакт. Все образцы разрушились вдали от зоны шва около зажимов разрывной машины при усилиях от 3535 до 3911 Н, что указывало на отсутствие изменений структуры и ослабления материала шва под влиянием растворителя.

Для подтверждения правильности сделанного вывода испытанию подвергли два типа образцов, в которых сварное соединение отсутствовало (рисунок 4.8). Эти образцы из сдублированных пластин, не подвергнутых сварке, также разрушились около зажимов при средней нагрузке 3823 Н (коэффициент вариации 29,7 %). Сделан вывод, что метод сравнения прочности образцов

в виде сдублированных без сварки пластин из ТКМ и образцов параллельных соединений может быть пригоден для оценки возможных изменений в структуре и свойствах ТКМ, подвергаемых сварке растворителем. Кроме того, предположили, что этот метод можно использовать для оптимизации режимов сварки растворителем.



a – пресованный образец с перемычкой между сдублированными слоями;
б – сдублированный сложенный образец без образования связи.

Рисунок 4.8 – Схема образцов, альтернативных параллельному соединению, при изучении влияния условий сварки на свойства материала сварного шва.

Рассматривая специфику сварки растворителем, при которой во время образования соединения в первый момент контактируют жидкие поверхности (растворитель+растворитель или лак+лак), то можно утверждать, что дефект типа «зеркальный шов», или «зеркальная пора» образовываться не может, что и подтвердили эксперименты.

Поскольку при сварке растворителем температура во всем объеме свариваемых деталей перед началом процесса и после его завершения остается постоянной, то говорить о термических остаточных напряжениях:

$$\sigma_{\text{ост}} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T / (1 - \mu), \quad (4.1)$$

(здесь E – модуль упругости свариваемого материала; α – температурный коэффициент линейного расширения, $\Delta T = T_{\text{св}} - T_{\text{о}}$; μ – коэффициент Пуассона) в шве, возникающих при тепловой сварке, говорить не приходится, поскольку температура $T_{\text{св}}$ сварки и температура $T_{\text{о}}$ окружающей среды одинаковые.

Больше имеется оснований обсудить возможность возникновения диффузионных напряжений в контактирующих участках свариваемых элементов из ТКМ вследствие неравномерного распределения в них

растворителя и последующей сушки. В процессе набухания концентрация растворителя в контактирующих (свариваемых) слоях гораздо выше, чем в толще стенки из ТКМ, так как скорость адсорбции растворителя контактирующими его поверхностями больше скорости диффузии его в глубину. В результате этого в набухающем материале контактирующие слои ТКМ сжаты, а глубинные растянуты. При последующей выдержке, представляющей собой сушку, контактирующие слои растянуты, а глубинные слои сжаты из-за высокой скорости испарения растворителя из шва. Возможность влияния диффузионных напряжений на прочность сварного соединения оценили проведением дополнительной термообработки соединений, выполненных по оптимальному режиму. Термообработку осуществили при температуре 150 °С в течение 2 ч. При визуальном осмотре образцов нахлесточных соединений изменений их внешнего вида не обнаружили. Прочность соединений при сдвиге осталась на исходном уровне.

Наряду с исследованием технологии сварки растворителем в работе оценили возможности регулирования прочности соединений изменением их геометрии.

4.2.4 Исследование возможности упрочнения сварных соединений

В технологии клеевых соединений известен [5, с. 350] метод их упрочнения применением дополнительных накладок в зоне шва при сохранении толщины соединяемых деталей. Поскольку сварка растворителем по способу осуществления процесса соединения близка к склеиванию, посчитали, что для повышения прочности сварного соединения до уровня прочности соединяемого материала можно также воспользоваться присоединением накладок в зоне шва. Проведением настоящей серии экспериментов была оценена эффективность применения при сварке растворителем мало изученных в технологии сварных соединений конструкторских методов повышения их прочности.

Одним из геометрических параметров нахлесточного клеевого соединения, влияющих на его прочность, является длина перекрытия (длина нахлеста). Влияние этого параметра на прочность сварного соединения листовых композиционных материалов кратко освещено в работе Г.В. Комарова по химической сварке феноло-ацетального стеклотекстолита марки КАСТ-В [13]. В настоящих экспериментах использовали полисульфоновый стеклотекстолит марки КТМС-1П толщиной 0,6 мм. Соединению подвергали пластинки шириной 20 мм, а длину перекрытия изменяли от 10 до 25 мм, т.е. в тех пределах, которые встречаются в работах по клеевым соединениям листовых образцов. Увеличение длины перекрытия в нахлесточном сварном соединении приводит к снижению разрушающего напряжения (таблица 4.3), хотя разрушение образцов при длине перекрытия 10 мм и выше происходило по основному материалу в околошовной зоне. Величина разрушающей нагрузки практически стабилизируется при длине перекрытия 20-25 мм. Это указывает на такую же схему распределения касательных напряжений в сварном нахлесточном соединении, как и в клеевом аналогичной конструкции, т.е. на концентрацию напряжений по краям перекрытия.

Таблица 4.3

Влияние длины перекрытия на прочность при сдвиге сварных образцов шириной 20 мм из стеклотекстолита КТМС-1П толщиной 0,6 мм.

№№ п/п	Длина перекрытия, мм	Разрушающая нагрузка, Н	Разрушающее напряжение при сдвиге ^{***} , Н/см ²
1	6,0 [*]	2650	2209
2	9,2 [*]	2889	1570
3	14,0 [*]	3394	1248
4	19,0 ^{**}	3120	821
5	26,0 ^{**}	3479	669

^{*}Расстояние между зажимами 40 мм. ^{**}Расстояние между зажимами 80 мм.

^{***}Средние результаты испытания не менее 3-х образцов.

При изучении свариваемости термопластичных пленок [12] установлено, что прочность Т-образных сварных швов при растяжении в значительной мере зависит от объема материала шва. Авторами был сделан вывод, что увеличение указанного объема при сохранении толщины свариваемых деталей

может быть средством повышения прочности при расслаивании. Применительно к сварке ТКМ изучение влияния увеличения с помощью дополнительной накладки толщины материала шва по сравнению с толщиной деталей может быть предметом самостоятельного исследования. В настоящей же работе было проверено, как такой прием может отразиться на прочности Т-образных соединений, изготовленных сваркой растворителем.

Для экспериментов использовали стеклотекстолит КТМС-1П толщиной 0,2 мм. Двухсторонние накладки из него в зоне перекрытия Т-образных образцов (см. рисунок 4,з) присоединяли через 1 ч после соединения Г-образных образцов. После приведения Г-образных образцов в контакт производили удаление наплыва из выдавившегося присадочного материала в устье шва, чтобы исключить его влияние на прочность соединения при расслаивании, которое по аналогии со сваркой продолжают изучать специалисты, занятые исследованием Т-образных клеевых соединений [14]. Увеличение толщины накладок осуществляли присоединением дополнительных слоев материала КТМС-1П. Из данных таблицы 4.4 видно, введение утолщения материала Т-образных швов ТКМ, изготовленных сваркой растворителем, дает такой же заметный эффект в повышении их прочности, как и при тепловой сварке термопластов [12].

Таблица 4.4

Влияние толщины двухсторонних накладок в Т-образных соединениях сваркой растворителем стеклотекстолита КТМС-1П на их прочность* при расслаивании.

№ п/п	Толщина накладки, мм	Разрушающее усилие, Н/10 мм	Характер разрушения
1	-	26,7	Расслоение по шву
2	0,2	61,0	То же
3	0,4	84,2	То же
4	0,6	92,9	То же
5	1,0	>160,0	Разрыв около зажима
6	2,0	>135,0	То же

*Средние результаты испытания не менее 3-х образцов.

Прикидочными экспериментами на небольшом числе образцов установлено, что увеличивать прочность благодаря дополнительной конструкторской

доработке – приварке накладки на зону перекрытия можно и у нахлесточного сварного соединения:

Толщина образцов, мм	Толщина накладки, мм	Разрушающая нагрузка, Н	Площадь сварного шва, см ²	Прочность при сдвиге, Н/см ²
1,1	-	2650	2,73	970
1,2	0,4	3127	2,6	1202
1,2	1,0	3750	2,73	1373
1,2	2,0	3031	2,25	1350

Систематизированные исследования позволят получить более достоверные данные о влиянии на прочность при сдвиге накладок в нахлесточном соединении.

Полученные результаты по определению режимов сварки позволили перейти к исследованию возможности восстановления несущей способности дефектной детали с помощью привариваемых накладок.

4.3 Исследование ремонтной сварки присоединением усиливающей накладки к дефектной детали

Методы устранения дефектов зависят от их типа, места их расположения, требований к сохранению свойств дефектного участка детали, условий ремонта (см. раздел 3.3). В настоящей работе ставилась задача оценить возможности восстановления прочности дефектных деталей из термопластичного стеклотекстолита на основе полисульфоновой матрицы.

В образцах из стеклотекстолита марки КТМС-1П на основе полисульфона марки ПСФ-150 и ткани марки Т-15(П)-76 были выполнены наиболее опасные, как представляется, дефекты для конструктивных деталей, это дефекты типа разрыв стенки или отверстие. В работе использовали результаты предварительных экспериментов по нахождению режимов сварки полисульфонового стеклотекстолита с помощью лаковой композиции, представляющей собой раствор полисульфона марки ПСФ-150 в хлорпроизводных углеводородах (см. раздел 4.2). В средней части образцов

из стеклотекстолита различной толщины (от 0,4 до 2,0 мм), длиной 200 мм и шириной 25 мм создавали дефекты типа боковая прорезь длиной 6 мм в направлении поперек направлению основы в армирующей ткани или отверстие диаметром 6 мм в центре образца (рисунок 4.9).

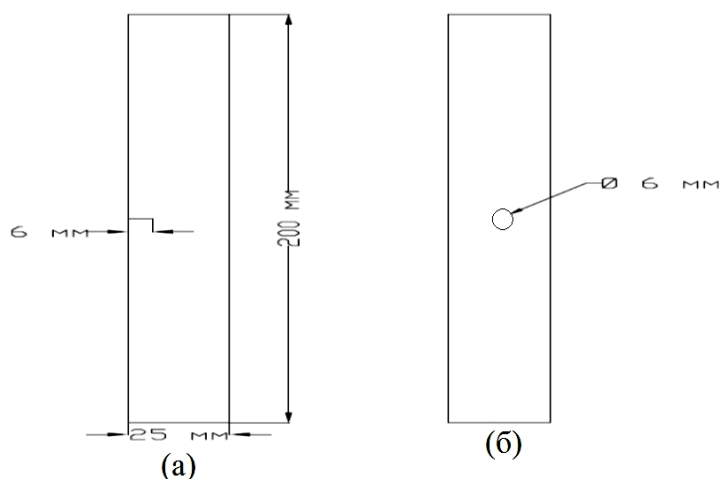


Рисунок 4.9 – Схема образцов с дефектами «боковая прорезь» (а) и «отверстие»(б)

Чтобы обеспечить идентичность ремонтируемого ТКМ и материала усиливающих накладок для одновременного включения их в работу при нагружении, в качестве ремонтного материала выбрали пластинки из готового стеклотекстолита той же марки КТМС-1П, что и ремонтируемые образцы, и препреги на основе раствора полисульфона и стеклотканей двух марок: российской Т-15(П)-76 (ТУ 6-48-53-90, партия № 962 от 27.08.2008 г.) толщиной 0,180 мм и с поверхностной плотностью 168 г/м² и фирмы Porcher (Франция) 7581-К 506 толщиной 0,27-0,29 мм. Готовые препреги хранили в герметичной упаковке. Технологический процесс ремонта *по первому варианту* с помощью накладок из готового стеклотекстолита содержал операции и переходы, аналогичные во многом операциям и переходам ТП ремонта с помощью склеивания, а по сути своей заключался в приварке растворителем с одной или с двух сторон дефектных участков накладок из стеклотекстолита заданных толщины и длины. Присадочный материал – лаковую композицию наносили на обе соединяемые поверхности. *При втором варианте* ремонта процесс внешне выглядел как приформовка

препрегов на основе реактивного связующего [5 с. 555], но механизм процесса присоединения накладок из слоев препрегов на основе указанных выше тканей и полисульфоновой лаковой композиции к дефектным участкам был иным¹⁾. Растворитель лаковой композиции вызывал набухание слоя полисульфоновой матрицы на поверхности дефектного образца, и происходило диффузионное соединение наклейки и ремонтируемого ТКМ. К накладкам прикладывали давление около 0,5 бара, предполагая, что в производственных условиях ремонта его несложно создать с помощью вакуумного мешка. В работе регулировали толщину, длину и форму накладок. Для создания толщины наклейки, способной восстановить прочность дефектного участка, монтаж ее слоев проводился последовательно с перекрытием краев предыдущего слоя последующим слоем (рисунок 4.10) подобно тому, как это осуществляется при выполнении соединения приформовкой препрега на основе жидкого реактивного связующего [5, с. 544]. Прочность соединения привариваемых накладок, достаточную для выполнения последующих после ремонта монтажных операций, можно получить после выдержки под давлением и при нормальной температуре уже в течение 1 ч. Формование многослойной наклейки из препрега длится не менее 1 суток. Двухстороннее нанесение накладок с точки зрения обеспечения более плавного перехода от стенки детали к дефектной зоне предпочтительнее одностороннего, но требует в условиях производства доступа к дефектной зоне с двух сторон.

Ускорить процесс формования накладок удалось применением гибких термохимических нагревательных элементов российского (рисунок 4.11) или японского производства (рисунок 4.12).

¹⁾Аунг Тху Хан, Комаров Г.В. Исследование технологии ремонта деталей из ПКМ с применением приформовываемых накладок из ТКМ// «XXXVI Гагаринские чтения». Научные труды Междунар. молодежной научн. конф. В 8 томах. Москва, 6-10 апреля 2010 г.- М.: МАТИ, 2010.- Т. 1.- С. 10.

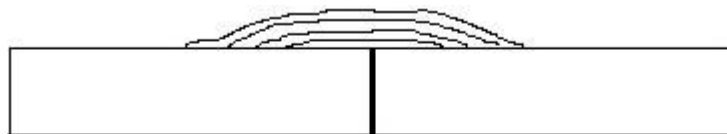


Рисунок 4.10 – Схема укладки слоев препрега при монтаже ремонтной накладки методом приформовки; а – боковая прорезь.



Рисунок 4.11 - Гибкий термохимический нагревательный элемент российского производства.



Рисунок 4.12 – Гибкий термохимический нагревательный элемент японского производства

Образцы с приваренными усиливающими накладками подвергали испытанию при растяжении при стандартизованных условиях. Их прочность сравнивали с прочностью исходных целых образцов и образцов, имеющих обозначенные выше дефекты. Из данных таблицы 4.5 видно, что эти дефекты

приводят к существенному снижению прочности образцов из ТКМ по сравнению с целым материалом (см. №№ 6, 10, 13).

Таблица 4.5

Влияние на прочность дефектных образцов из полисульфонового стеклотекстолита КТМС-1П присоединения к ним сваркой растворителем или приформовкой диффузионным способом усиливающих накладок из полисульфонового стеклотекстолита.

№ п/п	Способ ремонта	Толщина образца, мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	Тип образца	Тип накладки	Длина накладки, мм	Разрушающая нагрузка при растяжении, Н	Прочность при растяжении, Н/мм ²	v ¹⁾ , %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Ремонт с применением приформовки препрега	0,4	10	Целый материал	-	-	4725	472,5		
2				С дефектом типа боковая прорезь	С одной стороны на основе ткани Т-15(П)-76	40+40 ²⁾	2975	297,5	63,0	
3						20+30+50 ²⁾	3060	306,0	64,8	
4						20+30+40+50 ²⁾	2809	280,9	59,4	
5	Ремонт с применением сварки	0,6	15	Целый материал	-	-	4927	328,47	-	
6			11,4	С дефектом типа боковая прорезь	С одной стороны из одного слоя КТМС-1П толщиной 0,4 мм	-	-	1257 ³⁾	110,3	33,8
7			15			70	4071 ⁴⁾	271,4	82,6	

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	Ремонт с применением сварки		15		С двух сторон по одному слою из КТМС-1П толщиной 0,4 мм	70	5040 ³⁾	336,0	100
9		1,0	25	Целый материал	-	-	8430	337,2	-
10		1,1	20,9	С дефектом типа боковая прорезь	-	-	4918	235,3	69,8
11		1,0	25		С одной стороны из КТМС-1П толщиной 0,6 мм	30	5735 ⁴⁾	229,4	68,0
12			25		С одной стороны 4 слоя и с другой стороны 1 слой из КТМС-1П толщиной 0,2 мм	40	6330 ⁴⁾	253,2	75,1
13			25	С дефектом типа отверстие диаметром 6 мм	С одной стороны 4 слоя и с другой стороны 1 слой из КТМС-1П толщиной 0,2 мм	20+30+40+50 ²⁾ и 50	7656 ⁴⁾	306,2	90,8
14		Ремонт с применением приформовки	1,0	19	С дефектом типа отверстие диаметром 6 мм	-	-	4330	228,0
15	1,0		25	С одной стороны на основе ткани 7581-К 506		40+45 ²⁾	8220	328,8	97,5
16	1,0		25	С одной стороны 3 слоя и с другой стороны 2 слоя на основе ткани 7581-К 506		30+40+60 ²⁾ и 55+55 ²⁾	9274 ⁵⁾	370,9	100

¹⁾Относительная прочность. ²⁾Чередование слоев по толщине накладки.

³⁾Разрушение в зажимах разрывной машины. ⁴⁾Разрушение в зоне дефекта.

⁵⁾Разрушение по кромке накладки.

Одновременно обнаружили, что изготовление прорези механической резкой у материала толщиной 0,6 мм вызвало большее снижение прочности (см. № 6), чем у материала толщиной 1,1 мм (см. № 10). Однако и в обоих случаях применение усиливающих накладок, присоединяемых методом сварки или формируемых из препрегов на дефектном участке, позволяет восстанавливать его прочность до достаточно высокого уровня. Однако увеличение толщины и размеров накладок не всегда повышает относительную прочность ν усиленных образцов (см. №№ 2,3 и 4). Сравнивая данные для материалов толщиной 0,4 (№№ 2,3 и 4) и 0,6 мм (№ 7), отличающихся прочностью, можно констатировать, что чем прочнее исходный ремонтируемый материал, тем ниже степень восстановления его несущей способности в процессе ремонта. В этой части обнаружено аналогичное поведение сварных соединений с накладками и клеевых соединений ПМ с накладками из аморфного металла [5, с. 27]. Разрушение образцов при этом носит когезионный характер (рисунок 4.13). В целом степень восстановления прочности дефектных образцов можно регулировать, изменяя толщину и площадь накладок (см. №№ 11 и 12, 15 и 16). Двухстороннее нанесение также повышает относительную прочность усиленных образцов (см. №№ 7 и 8).

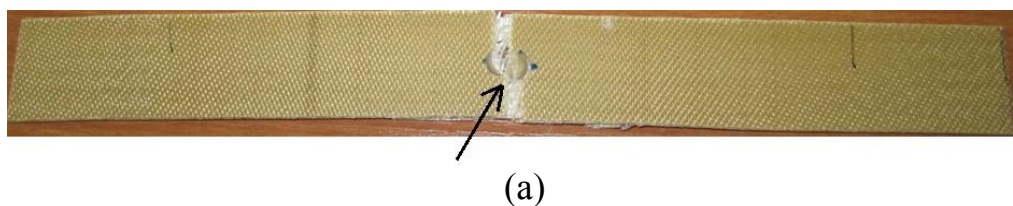


Рисунок 4.13 – Общий вид образца, имеющего дефект в виде отверстия, с приваренными накладками из препрега, разрушившегося по месту дефекта;
а – место дефекта

Как и ожидали, образцы с ремонтными накладками при действии воды вели себя так же, как и исходный материал: падения прочности не обнаружено.

Присадочный материал в виде лаковой композиции апробирован для устранения дефектов типа царапина, не затрагивающая верхний армирующий слой ТКМ, и межслоевое разрушение.

Как самостоятельное исследование, можно рассматривать изучение влияния введения нанонаполнителей на прочность сварных соединений ТКМ и других ПМ. В работе для оценки возможностей упрочнения сварных соединений таким образом были выполнены ограниченные эксперименты. Были изготовлены Т-образные соединения, в которых присадочный материал был модифицирован нанонаполнителем – монтмориллонитом. После нанесения лаковой композиции на основе полисульфона на ее слой наносили опудриванием нанопорошок монтмориллонита без фиксирования его расхода. Прочность при расслаивании на ограниченном числе образцов повысилась на 15 %. Даже такой эксперимент при неконтролируемом содержании нанонаполнителя показал перспективность указанного модифицирования зоны сварного шва ПМ с целью повышения прочности и других характеристик соединения.

Список использованных источников

1. Кораб Г.Н., Шестопад А.Н., Комаров Г.В. и др. Словарь-справочник по сварке и склеиванию пластмасс/ Под ред. Б.Е. Патона.- Киев: Наукова думка, 1988.- 160 с.
2. Тростянская Е.Б., Комаров Г.В., Шишкин В.А. Сварка пластмасс.- М.: Машиностроение, 1967.- С. 229-235.
3. Комаров Г.В. Сварка органического стекла с помощью растворителей// Сварочное производство.- 1975. - № 11.- С. 40-42.
4. Комаров Г.В., Царахов Ю.С. Конструктивно-технологические возможности сварки изделий из полимерных материалов// Сварка полимерных материалов. Материалы семинара.- М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1974.- С. 84-88.

5. Комаров Г.В. Соединения деталей из полимерных материалов: Учеб. пособие.- СПб.: Профессия, 2006.- 592 с.
6. Гончаренко В.А. О механизме сварки в расплаве термопластичных материалов. Часть 1.// Сварочное производство.- 1996.- № 7.- С. 2-6.
7. Гончаренко В.А. О механизме сварки в расплаве термопластичных материалов. Часть 2.// Сварочное производство.- 1996.- № 8.- С. 31-35.
8. Комаров Г.В., Мацюк Л.Н., Шадрин А.А., Шестопад А.Н. Сварка термопластичных композиционных материалов: Обзор.- Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1992.- 32 с.
9. Михайлин Ю.А. Теплостойкие полимеры и полимерные материалы.- СПб.: Профессия, 2006.- С. 240.
10. Kimura H., Teraoka F. Solvent welding of polysulfone// Japan Plastics Age.- 1983.- V. 21, No. 190.- P. 29-34.
11. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Литьевые термопластичные материалы авиакосмического назначения// Российский хим. журнал (Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева).- 2010.- Т. LIV, № 1.- С. 41-45.
12. Тростянская Е.Б., Комаров Г.В., Царахов Ю.С. К вопросу о прочности сварных соединений полимерных пленок и способах ее повышения// Механика полимеров.- 1974.- № 1.- С. 55-59.
13. Комаров Г.В. Разработка и исследование химической сварки отвержденных стеклопластиков токами высокой частоты и ультразвуком.- Дисс. ...канд. техн. наук.- М.: МАТИ, 1963.- С. 146.
14. Hu Ping, Shao Qi, Li Weidong, Han Xiao. Experimental and numerical analysis on load capacity and failure process of T-joint: Effect produced by the bond-line length// Int. J. Adhesion and Adhesive. [Электронный ресурс].- 2012.- V. 38.- P. 17-24.

Общие выводы

1. Решение проблем ремонта изделий из ПМ требует комплексного подхода с позиций материаловедения, технологии и механики соединений ПМ. При выборе метода ремонта необходимо учитывать как структуру, состав, так и весь комплекс механических, теплофизических и химических характеристик ПМ изделия. Сохранить волокнистую структуру термопластичного КМ в зоне сварного шва и вместе с этим достичь прочности сварного соединения, близкой к прочности при сдвиге соединяемого ТКМ, удается применением сварки растворителем, которая может рассматриваться как альтернатива другим методам в технологии восстановления несущей способности дефектных деталей из ТКМ.

2. Поскольку сущность процессов тепловой сварки и сварки растворителем в общем виде одинакова, то результаты исследования свариваемости растворителем позволяют получить ожидаемые данные о свойствах сварных соединений, изготовленных тепловыми методами. Приформовку накладок из препрегов на основе раствора матрицы ремонтируемого ТКМ и волокнистого наполнителя можно отнести к диффузионному соединению и рассматривать его аналогом сварки металлов наплавкой. Такие накладки могут быть нанесены как на прямолинейные, так и на криволинейные поверхности.

3. Выбирать продолжительность сварки растворителем, обеспечивающей достижение «технологической прочности» соединений, целесообразно по результатам их испытания на расслаивание, в процессе которого прочность более чувствительна к деформационным свойствам материала шва, чем при сдвиге, и при одинаковых других характеристиках не зависит от площади соединения. «Технологическая прочность» нахлесточного соединения при сварке растворителем полисульфонового стеклопластика достигается за время закрытой выдержки при комнатной температуре в течение 60 мин.

4. При сварке растворителем об отсутствии негативного влияния режимов и условий сварки на свойства ТКМ можно судить по результатам испытания при растяжении двух слоев сваренных посередине пластинок (так называемого параллельного соединения).


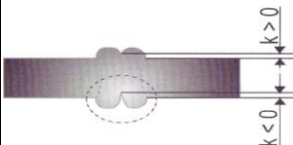
5. Прочность восстановленного с помощью сварки растворителем дефектного участка может быть близкой к 100 % исходной прочности ремонтируемого ТКМ. Оценивая ремонтпригодность материалов, отличающихся прочностью, можно констатировать, что чем прочнее исходный ремонтируемый материал, тем ниже степень восстановления его несущей способности.


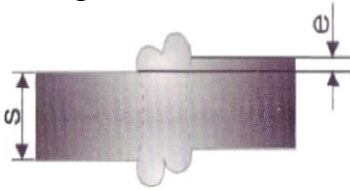
6. Изготовление утолщения материала Т-образных швов ТКМ, выполненных сваркой растворителем, дает такой же заметный эффект повышения прочности, как и при тепловой сварке термопластов. Увеличить прочность благодаря дополнительной конструкторской доработке – приварке накладки на зону перекрытия можно и у нахлесточного сварного соединения.

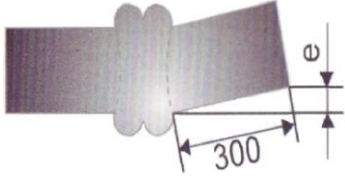
7. При исследовании влияния длины перекрытия на прочность оди-нарных нахлесточных сварных соединений ТКМ пришли к заключению, что распределение касательных напряжений в нем такое же, как и в клеевом ана-логичной конструкции, т.е. имеет место концентрация напряжений по краям перекрытия. Величина разрушающей нагрузки для полисульфонового стекло-текстолита марки КТМС-1П толщиной 0,6 мм практически стабилизируется при длине перекрытия 20-25 мм.

Приложения

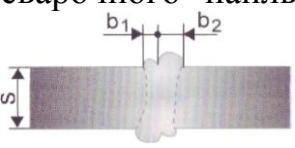
Описание дефектов соединений встык, которые изготовлены сваркой нагретым инструментом, оцениваемых по трем группам их допустимости.

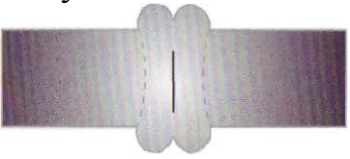

№ п/п	Название и схема дефекта	Характеристика дефекта	Оценка по группам допустимости		
			I	II	III
1	2	3	4	5	6
Внешние дефекты					
1.	<p>Трещины</p> 	<p>Продольные или поперечные к направлению шва трещины. Они могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - в сварном шве; - в основном материале; - в зоне термического влияния 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
2.	<p>Надрезы в сварочном наплыве</p> 	<p>Надрезы размером $k < 0$ могут быть результатом, например:</p> <ul style="list-style-type: none"> - низкого давления на стадии соединения; - слишком короткой продолжительности нагрева; - слишком короткой продолжительности охлаждения; - отсутствия соосности деталей; - изменения фиксации деталей во время сварки; - отсутствия выравнивания соединяемых поверхностей 	При $k < 0$ недопустимы	При $k < 0$ недопустимы	При $k < 0$ недопустимы

1	2	3	4	5	6
3.	<p>Надрезы и зарубки</p> 	<p>Надрезы около кромки трубы в основном материале в продольном или поперечном направлении по отношению к направлению шва, образующиеся в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - действия зажимов; - неправильной транспортировки деталей (например, труб); - ошибочных действий при подготовке к сварке 	<p>Локально допустимы, если расположены на поверхности и основании надреза не заострено и $\Delta s \leq 0,1 s$, но $\Delta s \leq 0,5$ мм</p>	<p>Локально допустимы, если расположены на поверхности и основании надреза не заострено и $\Delta s \leq 0,1 s$, но $\Delta s < 1$ мм</p>	<p>Локально допустимы, если расположены на поверхности и основании надреза не заострено и $\Delta s \leq 0,1 s$, но $\Delta s \leq 2$ мм</p>
4.	<p>Смещение соединяемых поверхностей</p> 	<p>Соединяемые поверхности смещены во время монтажа деталей или неудовлетворительно подогнаны при подготовке к сварке. В зависимости от типа ПМ и толщины может происходить снижение качества сварного соединения</p>	<p>Допустимы, если $e \leq 0,1 s$</p>	<p>Допустимы, если $e \leq 0,15 s$</p>	<p>Допустимы, если $e \leq 0,2 s$</p>

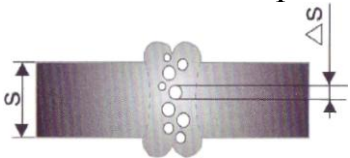
1	2	3	4	5	6
5.	<p>Перекося соединяемых деталей</p> 	<p>Причины перекося могут быть следующие:</p> <ul style="list-style-type: none"> - отклонения от нормы в работе сварочной машины; - неправильная работа направляющих сварочной машины; - чрезмерная величина давления на стадии охлаждения соединения; - коробление деталей при охлаждении сварного шва; - преждевременное освобождение деталей в зажиме 	<p>Для труб (прутков) и плит допустимы, если $e \leq 1 \text{ мм}$</p>	<p>Для труб (прутков) и плит допустимы, если $e \leq 2 \text{ мм}$</p>	<p>Для труб (прутков) и плит допустимы, если $e \leq 4 \text{ мм}$</p>
6.	<p>Невоспроизводимая форма сварочного наплыва</p>	<p>При большом числе типов и групп материалов и возможных вариантах наплавов единую схему их оценки задать невозможно. Высказать прогноз о долговечности сварных швов на основе данных о форме сварочного наплыва невозможно</p>	<p>Заключение о пригодности можно сделать после испытания опытного сварного соединения</p>		

Продолжение таблицы 3.3


1	2	3	4	5	6
7.	Слишком большой или слишком маленький сварочный наплыв	Причина появления дефекта в неправильном выборе параметров режима сварки. Появление дефектов предотвращается перепроверкой режима сварки и сравнением свойств сварных соединений	Недопустим	Недопустим	Недопустим
8.	<p>Неодинаковые размеры частей сварочного напльва</p> 	Различные части сварочного напльва с каждой стороны стыка от первоначальной границы контакта соединяемых поверхностей частично или по всей длине шва или его объема	Допустимы, если $b_1 \geq 0,7b_2$	Допустимы, если $b_1 \geq 0,6b_2$	Допустимы, если $b_1 \geq 0,5b_2$
9.	Поверхность напльва с пузырями или вздутиями	<p>Причина дефектов в термическом повреждении ПМ под влиянием:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком высокой температуры нагретого инструмента; - слишком большой продолжительности оплавления и/или нагрева; - повышенной влажности ПМ. <p>При сварке жесткого ПВХ или хлорированного ПВХ образование пузырьков на поверхности напльва, обусловленное влиянием ПМ, на качество сварного соединения никакого влияния не имеет</p>	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы


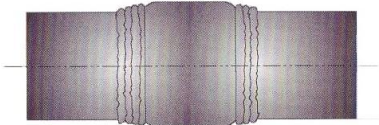
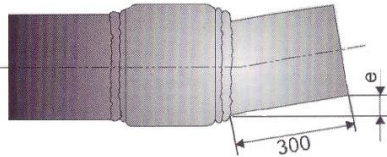
1	2	3	4	5	6
Внутренние дефекты					
10.	<p>Отсутствие сцепления</p> 	<p>Отсутствие или неполное сцепление соединяемых поверхностей, частичное или по всему поперечному сечению шва, с или без пупырей или вкраплений обусловлено, например, влиянием:</p> <ul style="list-style-type: none"> - влаги на соединяемых поверхностях; - загрязнений соединяемых поверхностей; - оксидирования ПМ на соединяемых поверхностях; - слишком большой технологической паузы; - неправильно заданной температуры нагретого инструмента; - слишком малого давления на стадии образования соединения 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
11.	<p>Поры и включения чужеродных веществ</p> 	<p>Отдельные, многочисленные рассредоточенные или в отдельных местах сгруппированные поры или соответственно включения могут возникнуть в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - образования пара (воды, растворителя, очистителя и т.п.) в процессе сварки; - загрязнения нагретого инструмента 	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,05s$</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,10s$</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,15s$</p>

Продолжение таблицы 3.3

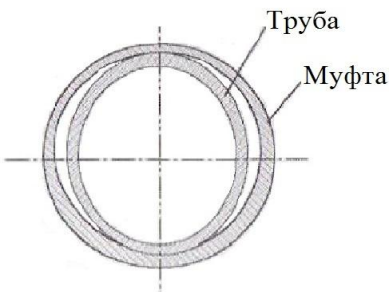
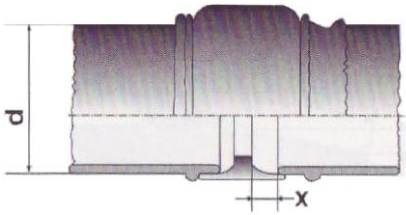
1	2	3	4	5	6
12.	<p>Раковины или поры</p> 	<p>Полости в зоне соединяемых поверхностей могут возникнуть в результате, например:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком низкого давления на стадии образования соединения; - слишком короткой продолжительности охлаждения. <p>Полости могут быть обусловлены физической усадкой ПМ с высокой степенью кристалличности, например, ПП, ПВДФ</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,05s$</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,10s$</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,15s$</p>

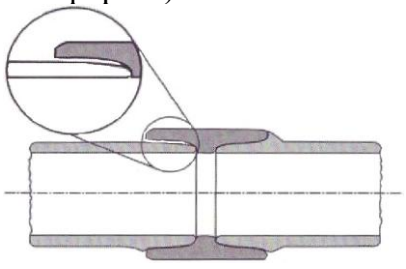
Описание дефектов соединений труб, которые изготовлены сваркой нагретым инструментом в раструб с помощью муфты, оцениваемых по трем группам их допустимости.

№ п/п	Название и схема дефекта	Характеристика дефекта	Оценка по группам допустимости		
			I	II	III
1	2	3	4	5	6
Внешние дефекты					
1.	<p>Искаженная форма напльва как правило в сочетании с внутренними дефектами при слишком короткой продолжительности сварки</p> 	<p>Образование неодинаковых напльвов (b) или отсутствие напльва с одной или с двух сторон (a) (частично или по всему периметру муфты в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - повышенной температуры нагретого инструмента (b); - слишком большой продолжительности нагрева (b); - слишком низкой температуры нагретого инструмента (a); - слишком короткой продолжительности нагрева (a); - слишком высокого усилия зажима муфты в призматическом приспособлении. <p>При правильном выполнении сварки по кромке муфты образуется равномерный наплыв. Такой наплыв служит первым признаком подходящего сварного соединения</p>	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы

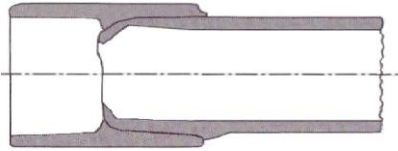
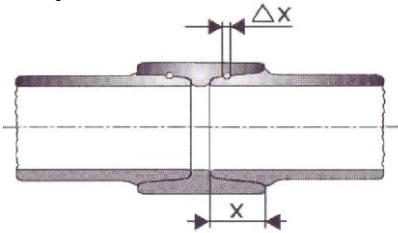
1	2	3	4	5	6
2.	<p>Одностороннее образование наплыва</p> 	<p>Образование такого дефекта происходит в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком короткого времени нагрева; - слишком низкой температуры нагретого инструмента; - несоблюдения допусков; - нагрева только одной из деталей 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
3.	<p>Чрезмерное вытекание расплава</p> 	<p>Образование такого дефекта происходит в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком высокой температуры нагретого инструмента; - неправильного перемещения соединяемых деталей, например, из-за отсутствия их фиксирования; - несоблюдения допусков 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
4.	<p>Перекос соединяемых деталей (угловое отклонение)</p> 	<p>Причины одно- или двухстороннего перекоса при сварке трубы с муфтой с незначительным натягом могут быть следующие:</p> <ul style="list-style-type: none"> - отклонения от нормы в работе сварочной машины; - неправильная работа направляющих сварочной машины 	Допустимы, если $e \leq 1$ мм	Допустимы, если $e \leq 2$ мм	Допустимы, если ≤ 4 мм

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6
5.	<p>Отсутствие соединения (из-за радиального зазора между трубой и муфтой)</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть деформирование или овальность конца трубы или муфты при слишком низком давлении сварки из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - небольшого радиуса кривизны у охватывающей муфты; - неправильного хранения трубы и/или муфты 	<p>Допустимо отклонение среднего внешнего диаметра трубы 1,5 %, но максимум 1,5 мм</p>	<p>Допустимо отклонение среднего внешнего диаметра трубы 2 %, но максимум 2 мм</p>	<p>Допустимо отклонение среднего внешнего диаметра трубы 3 %, но максимум 2 мм</p>
6.	<p>Отсутствие соединения по всей длине муфты (из-за неполной задвижки труб в раструб муфты)</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком короткие продолжительности нагрева; - отсутствие перпендикулярности соединяемых поверхностей по отношению к оси муфты; - слишком низкая температура нагретого инструмента; - осевое смещение во время фазы образования соединения; - слишком длительная пауза; - неравномерная скорость задвижки трубы 	<p>Допустимы при значительном снижении заданной длины сварного шва и свободном от надрезов замкнутого наплыва и при $x \leq 0,05 d$ и $x \leq 0,1$ глубины муфты</p>	<p>Допустимы при $x \leq 0,1 d$ и $x \leq 0,15$ глубины муфты</p>	<p>Допустимы при $x \leq 0,1 d$ и $x \leq 0,2$ глубины муфты</p>


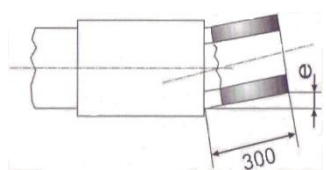
1	2	3	4	5	6
Внутренние дефекты					
7.	<p>Отсутствие соединения (из-за неполной замкнутости формы)</p> 	<p>Локальное поверхностное вдоль оси или по окружности образование канала в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - образования канавки на поверхности трубы; - превышения допуска на диаметр трубы или муфты; - неправильной механической обработки; - отсутствия соосности трубы и муфты 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
8.	Отсутствие соединения из-за недостаточного сцепления ПМ трубы и муфты	<p>Локальный или поверхностный несовершенный шов с разрывом в зоне соединяемых поверхностей в случае:</p> <ul style="list-style-type: none"> - сверх заданной задвижки трубы в муфту; - термической деструкции; - неправильного выбора ПМ для свариваемых деталей; - присутствия остатков прилипшего ПМ на нагретом инструменте 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы

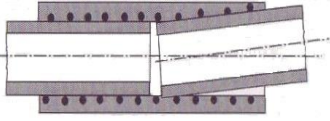
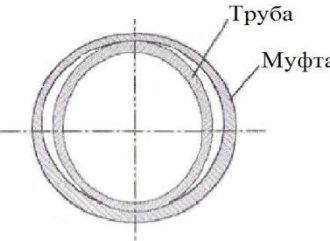
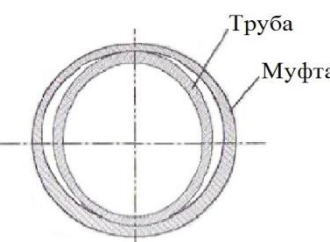
Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6
9.	<p>Зауженное поперечное сечение трубы</p> 	<p>Причиной дефекта служит чрезмерная задвижка трубы при нагреве или соединении в случае:</p> <ul style="list-style-type: none"> - сварки слишком тонких труб /муфт; - слишком длительной продолжительности нагрева; - осевого смещения во время охлаждения шва; - слишком высокой температуры нагретого инструмента 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
10.	<p>Поры из-за включений инородных веществ</p> 	<p>Отдельные, многочисленные или сосредоточенные в отдельных местах поры или соответственно включения, которые появились в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - образования паров (воды, растворителя) во время сварки; - загрязнения нагретого инструмента; - присутствия чужеродных тел на поверхности деталей 	Отдельные поры допустимы, если $\Delta x \leq 0,05 x$	Поры и ряд пор допустимы, если $\Delta x \leq 10 x$	Поры и ряд пор допустимы, если $\Delta x \leq 15 x$

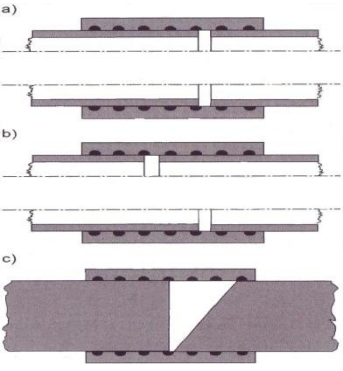
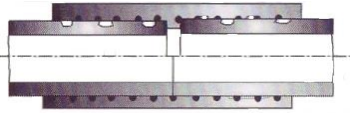
Приложение 3.
Таблица 3.5

Описание дефектов соединений, которые изготовлены сваркой закладным нагревательным элементом в виде спирали, оцениваемых по трем группам их допустимости.

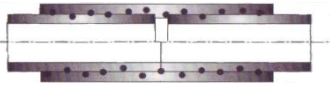
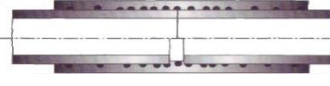
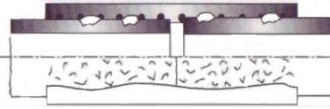
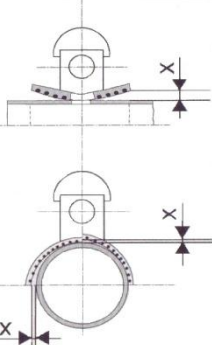
№ п/п	Название и схема дефекта	Характеристика дефекта	Оценка по группам допустимости		
			I	II	III
1	2	3	4	5	6
Внешние дефекты соединений прямых отрезков труб, ответвлений и седёлок					
1.	<p>Вытекание расплава в зоне контакта муфты и трубы</p> 	<p>Дефект представляет собой выступивший из зоны шва из-под муфты наружу расплав, расположенный локально или по всей окружности муфты с одной или с двух ее сторон и в большинстве случаев с глянцевой или пузырчатой поверхностью. Причиной образования дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком высокая энергия сварки; - слишком большая продолжительность сварки; - тотчас повторно прошедший процесс сварки; - ошибки сварочного аппарата; - посадка с натягом 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
2.	<p>Перекас* соединяемых деталей (угловое отклонение).</p>  <p>*Перекас представляет собой внешний дефект, который может повлечь за собой появление внутреннего дефекта.</p>	<p>Одно или двухсторонний перекас трубы в муфте. Образование такого дефекта происходит в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ошибки при монтаже деталей; - изменения положения деталей в процессе сварки 	<p>Допустимы.</p> <p>Для труб (стержней) $e \leq 2$ мм/0,4°; Для ПЭ типа РЕ-Х допустимы, если $e \leq 1$ мм</p>	<p>Допустимы.</p> <p>Для труб (стержней) $e \leq 3$ мм/0,6°; Для ПЭ типа РЕ-Х допустимы, если $e \leq 2$ мм</p>	<p>Допустимы.</p> <p>Для труб (стержней) $e \leq 6$ мм/1,2°; Для ПЭ типа РЕ-Х допустимы, если $e \leq 4$ мм</p>

1	2	3	4	5	6
Внутренние дефекты соединений прямых отрезков труб, ответвлений и седелок					
3.	<p>Смещение нагревательной спирали</p> 	<p>Угловое смещение со сдвигом нагревательной спирали и расплава из-за различного давления (в зоне) сварки с или без расстыковки в плоскости соединения. Причиной дефекта могут быть</p> <ul style="list-style-type: none"> - отсутствие соосности концов труб; - слишком маленькие радиусы кривизны у охватываемой детали; - действие изгибающего момента 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
4.	<p>Деформация</p> 	<p>Измененный контур или овальность конца трубы или муфты. Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - отсутствие давления по всей окружности труб особенно у охватываемой детали; - неправильно уложенные трубы и трубчатые муфты 	Допустимое отклонение от среднего внешнего диаметра трубы 1,5 %, но ≤ 3 мм		
5.	<p>Дефект сцепления из-за ошибок при подготовке к сварке</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - отсутствие механической обработки соединяемых поверхностей; - снятие излишнего слоя при обработке при недостаточном контакте между муфтой и трубой; - обработка со сплющиванием; - непригодность зажимных приспособлений (например, призматических зажимов) 	Недопустим	Недопустим	Недопустим

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6
6.	<p>Дефект сцепления из-за неполного вдвигания трубы</p> 	<p>Неодинаковое смещение по оси и отсутствие прилегания друг к другу концов труб с одной или с другой стороны муфты или неполное их прилегание. Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неодинаковое и/или недостаточное вдвигание труб с одной или с другой стороны муфты (а); - не перпендикулярно отрезанные концы труб (b) 	<p>Допустимы, если предусмотренная длина вдвигания трубы в муфту не превышает 10 %</p>		<p>Допустимы, если предусмотренная длина вдвигания трубы в муфту не превышает 15 %</p>
7.	<p>Дефект сцепления из-за недостаточного замыкания связи формой</p> 	<p>Локальное или вдоль оси по поверхности или по окружности образование каналов. Причиной дефектов могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - канавки на поверхности труб; - превышение допусков на диаметры труб или муфты, - неправильная механическая обработка; - слишком впалые концы труб 	<p>Недопустимы</p>	<p>Недопустимы</p>	<p>Недопустимы</p>
8.	<p>Дефект сцепления из-за недостаточного замыкания связи веществом</p>	<p>Локальное или поверхностное неполное образование сварного соединения с или без расстыковки в плоскости соединения. Причиной дефектов могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком низкая энергия сварки; - повреждение закладного нагревательного элемента; - влага на соединяемых поверхностях; - загрязнения поверхностей; - несоответствие ПМ трубы и муфты инструкции на сварку 	<p>Недопустимы</p>	<p>Недопустимы</p>	<p>Недопустимы</p>

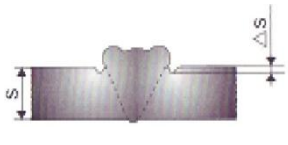
Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6
9.	<p>Радиальное смещение нагревательной спирали</p> 	<p>Нагревательная спираль размещена волнисто, неравномерно, скученно или со смещением в зоне сварки из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - перегрева сварного шва; - загрязнений свариваемых поверхностей; - посадки с натягом 	Недопустимы	Незначительная волнистость нагревательной спирали допустима	Волнистость нагревательной спирали допустима
10.	<p>Сдвиг нагревательной спирали</p> 	<p>Локальная в осевом направлении скученность витков из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - превышения допусков на соединяемые детали; - вдвигания трубы с перекосом; - косога отрезания трубы; - западания концов труб 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
11.	<p>Включения чужеродных веществ</p> 	<p>Локальное или вдоль оси по поверхности или по окружности образование каналов, разрывов и отслоений нагревательной спирали из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - загрязнения поверхностей; - образование паров воды или газов во время сварки 	Недопустимы (отдельные поры допустимы)	Недопустимы (отдельные поры допустимы)	Недопустимы (отдельные поры допустимы)
12.	<p>Дефект сцепления из-за недостаточного замыкания связи формой</p> 	<p>Причина образования дефекта из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - недостаточного осевого замыкания связи формой при зажиме седелки - недостаточного радиального замыкания связи формой 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы

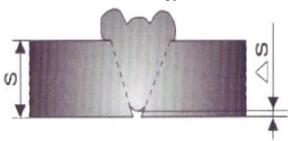
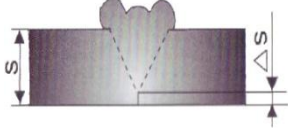
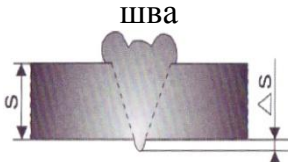
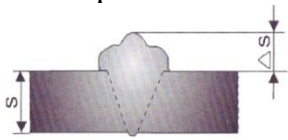
Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6
13.	<p>Дефект сцепления в зоне седёлки из-за недостаточного замыкания связи формой на свариваемой поверхности</p> 	<p>Причина образования дефекта из-за локального или поверхностного образования каналов или соответственно полостей</p>	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
14.	<p>Дефект сцепления из-за искривления трубы</p> 	<p>Локальное или поверхностное неполное образование сварного соединения с или без расстыковки на поверхности соединения из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неравномерного приложения усилия; - одностороннего применения зажимного устройства; - несовершенной внешней геометрии фасонной детали 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы


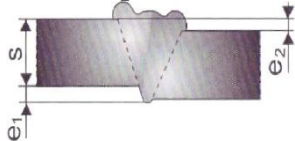
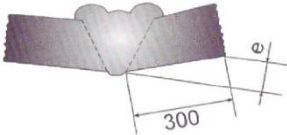
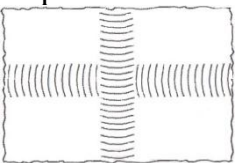
Описание дефектов соединений, которые изготовлены сваркой нагретым газом, оцениваемых по трем группам их допустимости.

№ п/п	Название и схема дефекта	Характеристика дефекта	Оценка по группам допустимости		
			I	II	III
1	2	3	4	5	6
Внешние дефекты V-образных и X-образных швов					
1	<p>Риски</p> 	<p>Риски вдоль или поперек сварного шва:</p> <ul style="list-style-type: none"> - в сварном шве; - в основном материале - в зоне термического влияния 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
2.	<p>Надрез в наплыве</p> 	<p>Четко наблюдаемое и заметное углубление вдоль шва между уложенными отдельными прутками, образовавшееся из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дефекта на сопле насадки для скоростной сварки (втягиванием) присадочного прутка); - неправильной укладки присадочного прутка; - неправильной схемы укладки присадочного прутка 	<p>Допустимы, если $0 < k \leq 0,3 d$</p>	<p>Допустимы, если $0 < k \leq 0,4 d$</p>	<p>Допустимы, если $0 < k \leq 0,5 d$</p>
3.	<p>Надрезы по кромке шва</p> 	<p>Надрезы в основном материале вдоль сварного шва, образовавшиеся в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - внедрения кромок сопла для сварки втягиванием присадочного прутка; - обработки сварного шва; - неудовлетворительной сварки по кромке шва 	Недопустимы	<p>Локальные дефекты допустимы, если $\Delta s \leq 0,1s$, но $\Delta s \leq 1 \text{ мм}$</p>	<p>Непрерывные дефекты допустимы, если $\Delta s \leq 0,1s$, но $\Delta s \leq 1 \text{ мм}$</p>

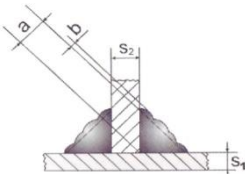
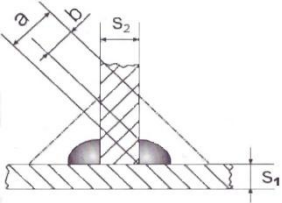
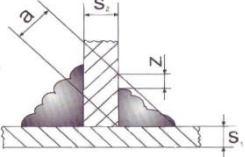
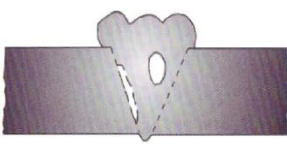
Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6
4.	<p>Несваренный корень шва</p> 	<p>Надрез в корне шва из-за неполного заполнения полости между деталями, образовавшийся в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком маленького угла раскрытия при подготовке шва; - слишком маленького зазора в корне шва; - слишком толстого присадочного прутка для заполнения корня шва; - слишком низкого усилия прижима прутка; - слишком слабого предварительного нагрева 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
5.	<p>Не полностью сваренный стык</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неудовлетворительной подготовки сварного шва; - недостаточное давление сварки; - слишком слабый предварительный нагрев 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
6.	<p>Увеличенный корень шва</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком большой зазор в корне шва; - слишком продавленный пруток в корне шва 	<p>Локально ограничено допустим, если $\Delta s \leq 0,15s$, но $\Delta s \leq 2$ мм</p>	<p>Допустим, если $\Delta s \leq 0,2s$, но $\Delta s \leq 3$ мм</p>	<p>Допустим, если $\Delta s \leq 0,25s$, но $\Delta s \leq 4$ мм</p>
7.	<p>Увеличенная высота сварного шва</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - увеличенное число проходов; - неудовлетворительная подготовка сварного шва 	<p>Непрерывный дефект допустим, если $0,1s \leq \Delta s \leq 0,4s$,</p>	<p>Непрерывный дефект допустим, если $0,05s \leq \Delta s \leq 0,5s$,</p>	<p>Непрерывный дефект допустим, если $0,05s \leq \Delta s \leq 0,6s$,</p>


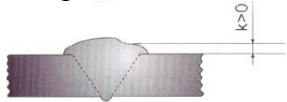
Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6
8.	<p>Неполное заполнение сечения шва</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - отсутствие заключительных проходов при укладке присадочных прутков; - недостаточное заполнение полости шва 	Недопустим	Недопустим	Недопустим
9.	<p>Смещение соединяемых поверхностей</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неустраненные различия толщин стенок деталей; - смещение деталей с одинаковой толщиной стенок; - влияние свойств ПМ толщины стенки детали: возможное снижение качества сварного шва, например, при сварке ПП и ПВДФ 	<p>Допустим, если $e_1 \leq 0,1 s$ $e_2 \leq 0,1 s$</p>	<p>Допустим, если $e_1 \leq 0,15 s$ $e_2 \leq 0,15 s$</p>	<p>Допустим, если $e_1 \leq 0,2 s$ $e_2 \leq 0,2 s$</p>
10.	<p>Угловые отклонения</p> 	<p>Если в зависимости от типа ПМ, кристалличности, свариваемой пары ПМ и толщин стенки допустимое угловое отклонение не соблюдается, то экспериментами приводится доказательство, что угловое отклонение получается исключительно из вышеназванных свойств</p>	<p>Допустим, если $e \leq 3$ мм</p>	<p>Допустим, если $e \leq 5$ мм</p>	<p>Допустим, если $e \leq 8$ мм</p>
11.	<p>Пересечения швов</p> 		Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
13.	<p>Шероховатая поверхность шва (термическое повреждение)</p>	<p>Окрашивание, открытые пузырьки, выступы и подобные дефекты, вызванные, например,</p> <ul style="list-style-type: none"> - загрязнением сопла подачи нагретого газа; - слишком высокой температурой нагретого газа 	Недопустим	Отдельные участки допустимы	Ограниченные участки допустимы
14	<p>Дефект начала шва</p>	<p>Неполностью заваренное поперечное сечение начала шва или соответственно конца шва</p>	Недопустим	Допустимо незначительное уменьшение поперечного сечения без образования резких переходов в шве	

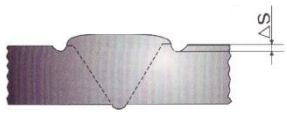
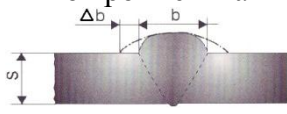

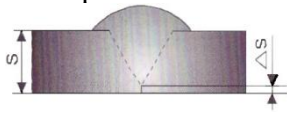
Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6
Внешние дефекты на поверхности угловых швов					
15.	<p>Увеличенная толщина шва</p> 	<p>Превышение толщины шва по сравнению с заданным нормальным размером $a = 0,7 s_1, s_2 > s_1$</p>	<p>Допустим, если $b \leq 0,4 a$</p>	<p>Допустим, если $b \leq 0,5 a$</p>	<p>Допустим, если $b \leq 0,6 a$</p>
16.	<p>Пониженная толщина шва</p> 	<p>Понижение толщины шва по сравнению с заданным нормальным размером $a = 0,7 s_1, s_2 > s_1$; - отсутствие покрывающего слоя</p>	<p>Недопустим</p>	<p>Допустим, если заданный размер a локален и понижение толщины незначительно: $b \leq 0,15 a$</p>	<p>Допустим, если заданный размер a локален и понижение толщины $b \leq 0,3 a$. У ненагруженных швов допустим</p>
17.	<p>Не полностью заполненное поперечное сечение углового шва</p> 	<p>$a = 0,7 s_1, s_2 > s_1$</p>	<p>Недопустим</p>	<p>Допустим, если $z \leq 0,15 a$</p>	<p>Допустим, если $z \leq 0,3 a$</p>
Внутренние дефекты V-образных и угловых швов					
18.	<p>Дефект сцепления</p> 	<p>Горизонтальный или вертикальный дефект сцепления в сварном шве или на боковых участках шва, отдельные или сосредоточенные поры или соответственно включения. Причиной дефекта могут быть: - слишком низкие температуры сварки; - загрязнения соединяемых поверхностей; - включения чужеродных веществ; - образование паров во время сварки</p>	<p>Недопустим</p>	<p>Недопустим</p>	<p>Недопустим</p>

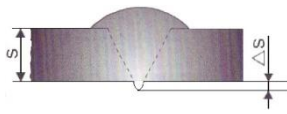
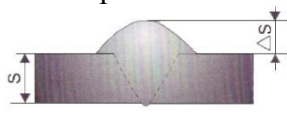
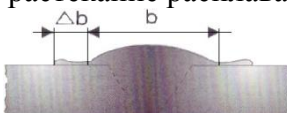
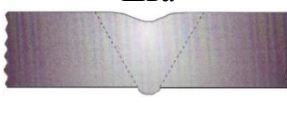
Описание дефектов соединений, которые изготовлены экструзионно-газовой сваркой, оцениваемых по трем группам их допустимости.

№ п/п	Название и схема дефекта	Характеристика дефекта	Оценка по группам допустимости		
			I	II	III
1	2	3	4	5	6
Внешние дефекты поверхности V-образных и X-образных швов					
1.	<p>Риски</p> 	<p>Отдельные риски или слияния рисок с или без их разветвления вдоль или поперек сварного шва. Они могут находиться</p> <ul style="list-style-type: none"> - в сварном шве; - в основном материале; - в зоне термического влияния 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
2.	<p>Углубление на покрывающем слое</p> 	<p>Непрерывная или локальная деформация в продольном направлении сварного шва, созданная:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дефектом сварочного башмака; - ошибкой при перемещении сварочного аппарата; - дефектной усадкой шва 	Допустимы, если локальное ограничение и $k > 0$	Допустимы, если локальное ограничение и $k > 0$	Допустимы, если локальное ограничение и $k > 0$

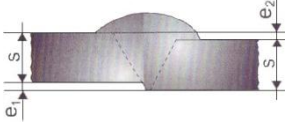
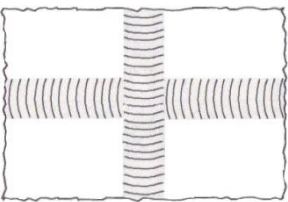
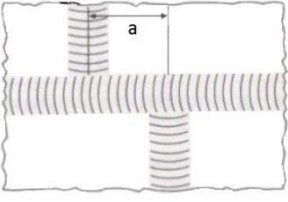

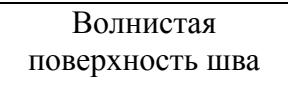
Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6
3.	<p>Надрезы по кромке шва</p> 	<p>Надрезы в основном материале вдоль сварного шва, образовавшиеся в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ошибки при перемещении сварочного аппарата; - неправильной обработки околшовной зоны; - ошибочного действия сварочного башмака 	<p>Допустимы, если локально ограничены, расположены на поверхности и $\Delta s \leq 0,1 s$, но $\Delta s \leq 1$ мм</p>	<p>Допустимы, если расположены на поверхности и $\Delta s \leq 0,1 s$, но $\Delta s \leq 2$ мм</p>	<p>Допустимы, если расположены на поверхности и $\Delta s \leq 0,2 s$, но $\Delta s \leq 3$ мм</p>
4.	<p>Недостаточная сварка по кромке шва</p> 	<p>Недостаточное одно-или двухстороннее перекрытие кромки полости шва, одно-или двухстороннее, образовавшееся в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ошибочного действия сварочного башмака; - неправильного выбора ширины сварочного башмака; - слишком высокой скорости сварки 	<p>Допустимы при отсутствии надразов в переходной зоне и $\Delta b \geq 0,2 s$, но $\Delta b \geq 3$ мм</p>	<p>Допустимы при отсутствии надразов в переходной зоне и $\Delta b \geq 0,1 s$, но $\Delta b \geq 2$ мм</p>	<p>Допустимы при отсутствии надразов в переходной зоне и $\Delta b \geq 0,05 s$, но $\Delta b \geq 1$ мм</p>
5.	<p>Надрез в корне шва</p> 	<p>Надрез из-за недостаточного заполнения корня сварного шва. Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - изогнутые и несваренные соединяемые поверхности; - слишком низкое усилие прижима (присадочного материала); - усадка ПМ в корне шва 	<p>Недопустим</p>	<p>Недопустим</p>	<p>Допустим, если $\Delta s \leq 0,1 s$, но $\Delta s \leq 1$ мм</p>
6.	<p>Не полностью сваренный стык</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неправильная подготовка шва; - недостаточное усилие прижима расплава; - недостаточный предварительный нагрев 	<p>Недопустим</p>	<p>Недопустим</p>	<p>Допустим, если локально ограничены и $\Delta s \leq 0,1 s$</p>

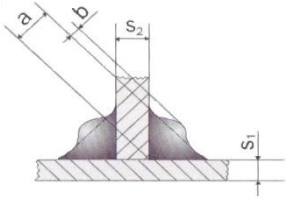
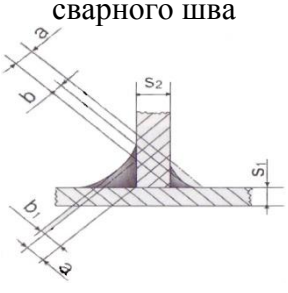
Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6
7.	<p>Увеличенный корень шва</p> 	<p>Причиной дефекта могут быть</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком большой зазор в зоне корня шва; - неправильно выбранные параметры сварки (скорость, температура, усилие прижима) 	<p>Для ПЭ и ПП допустим, если $0,1s \leq \Delta s \leq 0,25s$ и если корень шва сварен без надрезов</p>	<p>Для ПЭ и ПП допустим, если $0,05s \leq \Delta s \leq 0,3s$ и если корень шва сварен без надрезов</p>	<p>Для ПЭ и ПП допустим, если $0 \leq \Delta s \leq 0,4s$ и если корень шва сварен без надрезов</p>
Другие ПМ требуют специального рассмотрения					
8.	<p>Увеличенный размер сварного шва</p> 	<p>Недопустимое отклонение от заданной высоты шва может быть обусловлено:</p> <ul style="list-style-type: none"> - применением дефектного сварочного башмака; - приложением слишком низкого усилия прижима присадочного материала 	<p>Допустим, если $0,1s \leq \Delta s \leq 0,3s$, но $\Delta s \leq 6$ мм</p>	<p>Допустим, если $0,05s \leq \Delta s \leq 0,4s$, но $\Delta s \leq 8$ мм</p>	<p>Допустим, если $0 \leq \Delta s \leq 0,5s$, но $\Delta s \leq 10$ мм</p>
9.	<p>Чрезмерное растекание расплава</p> 	<p>Одно- или двухстороннее растекание расплава присадочного материала в большинстве случаев без достаточного сцепления с основным материалом, обусловленное:</p> <ul style="list-style-type: none"> - применением дефектного сварочного башмака; - ошибкой при ведении сварочного аппарата; - отсутствием должной обработки свариваемых поверхностей 	<p>Недопустим</p>	<p>Допустим, если локально ограничен и $\Delta b \leq 5$ мм</p>	<p>Допустим, если $\Delta b \leq 10$ мм</p>
10.	<p>Вогнутость сварного шва</p> 	<p>Несоответствие заданному поперечному сечению шва, обусловленное:</p> <ul style="list-style-type: none"> - усадкой присадочного ПМ; - увеличенной скоростью сварки; - применением дефектного или с увеличенными размерами сварочного башмака 	<p>Недопустим</p>	<p>Недопустим</p>	<p>Недопустим</p>

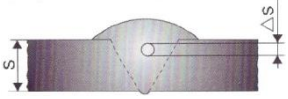

Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6
11.	<p>Смещение соединяемых поверхностей</p> 	<p>Дефект возможен из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неустранимого различия толщин стенок деталей; - смещения стенок 	<p>Допустим, если</p> $e_1 \leq 0,1 s$ $e_2 \leq 0,1 s$	<p>Допустим, если</p> $e_1 \leq 0,2 s$ $e_2 \leq 0,2 s$	<p>Допустим, если</p> $e_1 \leq 0,3 s$ $e_2 \leq 0,3 s$
12.	<p>Пересечение сварных швов</p> 		Недопустим	Недопустим	Недопустим
13.	<p>Смещенные стыки швов</p> 		<p>Допустимы если:</p> $a =$ утроенной ширине покрывающих слоев, но не менее 50 мм	<p>Допустимы если:</p> $a =$ утроенной ширине покрывающих слоев, но не менее 50 мм	<p>Допустимы если:</p> $a =$ утроенной ширине покрывающих слоев, но не менее 50 мм
14.	<p>Несимметричное перекрытие кромок шва</p> 	<p>Сварочный башмак проведен не посередине сварного шва</p>	Недопустим	<p>Допустим, если локально ограничен и никаких других отклонений не имеется</p>	<p>Допустим, если никаких других отклонений не имеется</p>
15.	<p>Волнистая поверхность шва</p> 	<p>Дефект обусловлен:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неравномерным приложением давления; - неравномерной скоростью сварки 	<p>Допустим, если локально ограничен</p>	Допустим	Допустим


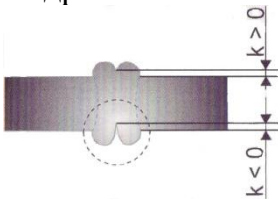
Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6
16.	Шероховатая поверхность шва	Мелкие открытые пузырьки, шлиры, выступы и подобные дефекты обусловлены: - присутствием влаги в присадочном ПМ; - неправильно заданной температурой присадочного ПМ; - неправильно заданной температурой сварочного башмака; - использованием непригодного ПМ для присадочного материала; - неправильным приготовлением присадочного материала	Недопустим	Недопустим	Недопустим
17.	Термическое повреждение	Окрашивание поверхности, образование выступов, образование глянцевой поверхности шва и им подобных дефектов	Недопустим	Недопустим	Недопустим
Внешние дефекты поверхности угловых швов					
18.	Увеличенная толщина шва 	Недопустимое отклонение геометрии шва по сравнению с заданным нормальным размером $a = 0,7 s_1, s_2 > s_1$, обусловленное: - использование дефектного сварочного башмака; - слишком низким усилием прижима	Допустим, если $b \leq 0,2 a$, но $b \leq 4$ мм	Допустим, если $b \leq 0,4 a$, но $b \leq 6$ мм	Допустим, если $b \leq 0,6 a$, но $b \leq 8$ мм
19.	Различие в поперечном сечении сварного шва 	Отклонение от заданного поперечного сечения из-за снижения или превышения заданного размера a ($a = 0,7 s_1, s_2 > s_1$). Причиной дефекта могут быть: - неправильные данные конструкции соединения; - усадка присадочного материала; - дефект сварочного башмака; - недостаточное давление прижима	Допустим, если $b \geq a$ $b_1 \leq 1,2 a$	Допустим, если $b \geq 0,9 a$ $b_1 \leq 1,4 a$	Допустим, если $b \geq 0,8 a$ $b_1 \leq 1,6 a$



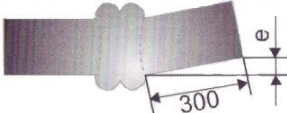
Продолжение таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6
Внутренние дефекты V-,X-образных и угловых швов					
20.	<p>Поры и пустоты</p> 	<p>Отдельные, многочисленные распределенные или скученные поры или включения, обусловленные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - образованием паров воды или растворителей во время сварки; - слишком быстрым и неравномерным охлаждением (образование пустот) 	<p>Отдельные малые поры допустимы, если $\Delta s \leq 0,1 s$</p>	<p>Поры и ряд пор допустимы, если $\Delta s \leq 0,15 s$</p>	<p>Поры и ряд пор допустимы, если $\Delta s \leq 0,2 s$</p>
21.	<p>Отсутствие сцепления</p> 	<p>Полное или частичное отсутствие сцепления под наплавленным слоем, в местах прихватки и по бокам шва, обусловленное:</p> <ul style="list-style-type: none"> - загрязнением соединяемых поверхностей; - слишком низким усилием прижима; - недостаточным нагревом 	<p>Недопустим</p>	<p>Недопустим</p>	<p>Недопустим</p>

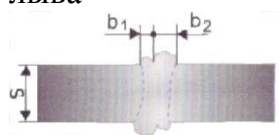

Описание дефектов соединений встык, которые изготовлены инфракрасной сваркой (бесконтактной сваркой нагретым инструментом), оцениваемых по трем группам их допустимости.

№№ п/п	Название и схема дефекта	Характеристика дефекта	Группы допустимости		
			I	II	III
1	2	3	4	5	6
Внешние дефекты					
1	<p>Риски</p> 	<p>Риски вдоль или поперек сварного шва:</p> <ul style="list-style-type: none"> - в сварном шве; - в основном материале; - в зоне термического влияния 	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
2.	<p>Надрезы в наплыве</p> 	<p>Надрезы размером $k < 0$ могут быть результатом, например:</p> <ul style="list-style-type: none"> - низкого давления на стадии соединения; - слишком короткой продолжительности нагрева; - слишком короткой продолжительности охлаждения; - отсутствия соосности деталей; - изменения фиксации деталей во время сварки 	Недопустимы при $k < 0$	Недопустимы при $k < 0$	Недопустимы при $k < 0$



Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6
3.	<p>Надрезы и зарубки</p> 	<p>Надрезы около кромки шва в основном материале в продольном или поперечном направлении по отношению к направлению шва, образующиеся в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - действия зажимов; - неправильной транспортировки деталей; - ошибочных действий при подготовке к сварке 	<p>Локально допустимы, если расположены на поверхности и основание надреза не заострено и $\Delta s \leq 0,1s$, но $\Delta s \leq 0,5$ мм</p>	<p>Локально допустимы, если расположены на поверхности и $\Delta s \leq 0,1s$, но $\Delta s \leq 1$ мм</p>	<p>Локально допустимы, если расположены на поверхности и $\Delta s \leq 0,1s$, но $\Delta s \leq 2$ мм</p>
4.	<p>Смещение соединяемых поверхностей</p> 	<p>Соединяемые поверхности смещены во время монтажа деталей или неудовлетворительно подогнаны при подготовке к сварке. В зависимости от типа ПМ и толщины может происходить снижение качества сварного соединения, например, ПВДФ</p>	<p>Допустимы, если $e \leq 0,1s$, но $e \leq 2$ мм</p>	<p>Допустимы, если $e \leq 0,15s$, но $e \leq 4$ мм</p>	<p>Допустимы, если $e \leq 0,2s$, но $e \leq 5$ мм</p>
5.	<p>Перекося соединяемых деталей</p> 	<p>Причины перекося могут быть следующие:</p> <ul style="list-style-type: none"> - отклонения от нормы в работе сварочной машины; - неправильная работа направляющих сварочной машины; - чрезмерная величина давления на стадии охлаждения соединения 	<p>Для труб (прутков) допустимы, если $e \leq 1$ мм; для плит допустимы, если $e \leq 2$ мм</p>	<p>Для труб (прутков) допустимы, если $e \leq 2$ мм для плит допустимы, если $e \leq 3$ мм</p>	<p>Для труб (прутков) допустимы, если $e \leq 4$ мм для плит допустимы, если $e \leq 6$ мм</p>

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6
6.	Невоспроизводимая форма сварочного наплыва	При большом числе типов и групп материалов и возможных вариантах наплывов единую схему их оценки задать невозможно	Рекомендуется изготовить и испытать опытное сварное соединение		
7.	Слишком большой или слишком маленький сварочный наплыв	Неправильно заданные параметры сварки. Необходимо провести сравнение сварных соединений, изготовленных при различных параметрах сварки	Недопустим	Недопустим	Недопустим
8.	Неодинаковые размеры частей сварочного наплыва 	Различные части сварочного наплыва с каждой стороны стыка от первоначальной границы контакта соединяемых поверхностей частично или по всей длине шва или его объема	Допустимы, если $b_1 \geq 0,7 b_2$	Допустимы, если $b_1 \geq 0,6 b_2$	Допустимы, если $b_1 \geq 0,5 b_2$
9.	Поверхность наплыва с пузырями или вздутиями	Причина дефектов в термическом повреждении ПМ под влиянием: - слишком высокой температуры нагретого инструмента – излучателя; - слишком большой продолжительности нагрева; - повышенной влажности ПМ.	Недопустимы	Недопустимы	Недопустимы
Внутренние дефекты					
10.	Отсутствие сцепления 	Отсутствие или неполное сцепление соединяемых поверхностей, частичное или по всему поперечному сечению шва, с или без пузырей или вкраплений обусловлено, например, влиянием: - влаги на соединяемых поверхностях; - загрязнений соединяемых поверхностей; - окислирования ПМ на соединяемых поверхностях; - слишком большой технологической паузы; - неправильно заданной температуры нагретого инструмента; - слишком малого давления на стадии образования соединения	Недопустим	Недопустим	Недопустим

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6
Внутренние дефекты					
11.	<p>Поры и включения чужеродных веществ</p> 	<p>Отдельные, многочисленные рассредоточенные или в отдельных местах сгруппированные поры или соответственно включения могут возникнуть в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> - образования пара (воды, растворителя, очистителя и т.п.) в процессе сварки 	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,05s$</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,10s$</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,15s$</p>
12.	<p>Раковины</p> 	<p>Полости в зоне соединяемых поверхностей могут возникнуть в результате, например:</p> <ul style="list-style-type: none"> - слишком низкого давления на стадии образования соединения; - слишком короткой продолжительности охлаждения. <p>Полости могут быть обусловлены физической усадкой ПМ с высокой степенью кристалличности, например, ПП, ПВДФ</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,05s$</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,10s$</p>	<p>Маленькие отдельные поры допустимы, если их размер $\Delta s \leq 0,15s$</p>