Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Приокский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ПГУ»)

На правах рукописи

ЖУРАВЛЕВА ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОШИВКИ

Специальность 05.02.08- Технология машиностроения

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Г.В. Барсуков

Орел 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЗАНИЯ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ 13

1.1 Актуальность производства деталей из стеклотекстолитов 13

1.2 Классификация стеклопластиков 15

1.2.1 Классификация стеклопластиков по методу изготовления 16

1.2.2 Классификация стеклопластиков по типу и ориентации стекловолокна 18

1.2.3 Классификация стеклопластиков по типу связующего 23

1.3 Основные методы обработки листовых стеклотекстолитов 25

1.4 Влияние состава, структуры и физико-механических свойств стеклопластиков на их обрабатываемость резанием 29

1.5 Анализ методов резания стеклотекстолитов: достоинства и недостатки 32

1.5.1 Разрезка стеклотекстолитов 36

1.5.2 Точение стеклотекстолитов 38

1.5.3 Сверление стеклотекстолитов 39

1.5.4 Фрезерование стеклотекстолитов 40

1.6 Технологические особенности гидроабразивного резания стеклотекстолитов: преимущества, проблемы, недостатки 41

1.7 Обзор исследований разрушения твердых материалов жидкостными струями высокого давления 49

1.8 Выводы, постановка цели и задач исследования 59

Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА РАССЛОЕНИЯ В СТЕКЛОТЕКСТОЛИТАХ ПРИ ПРОНИКАНИИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ 61

2.1 Физическая модель разрушения стеклотекстолитов под действием гидроабразивной струи 61

2.2 Анализ напряженно-деформированного состояния стеклотекстолита при проникании гидроабразивной струи под действием сосредоточенной силы..... 65

2.3 Выводы по второй главе 87

Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОШИВКИ ЛИСТОВЫХ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ СТЭФ-I ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУЕЙ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАССЛОЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ..... 88

3.1 Исследование влияния режимов прошивки с движением фокусирующей трубки по окружности на величину и глубину расслоений поверхности деталей из стеклотекстолита 91

3.2 Исследование влияния режимов прошивки с неподвижной фокусирующей трубкой на величину и глубину расслоений поверхности деталей из стеклотекстолита 101

3.3 Исследование влияния режимов прошивки под углом к поверхности резания на величину и глубину расслоений поверхности деталей из стеклотекстолита 108

3.4 Анализ особенностей расслоения поверхности деталей из стеклотекстолита при резании гидроабразивной струей 111

3.5 Выводы по третьей главе 114

Глава 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ..... 116

4.1 Количественная оценка обрабатываемости стеклотекстолитов по коэффициенту относительной обрабатываемости по расслоению 116

4.2 Методика диагностирования и определения коэффициента относительной обрабатываемости по расслоению обрабатываемого стеклотекстолита 122

4.3 Разработка технологических рекомендаций по коррекции траектории рабочих ходов по критерию относительной обрабатываемости, обеспечивающих повышение качества гидроабразивного резания стеклотекстолитов 125

4.4 Технико-экономическая эффективность от внедрения результатов работы 135

4.5 Выводы по четвертой главе 141

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ 144

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 146

Приложение А 159

Приложение Б Акты внедрения результатов работы 168

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изделия из листовых слоистых стеклопластиков потребляются во многих отраслях промышленности, и в первую очередь, в машиностроении, электротехнической и оборонной промышленности, что позволяет заменить и сэкономить большое количество черных и цветных металлов.

Среди многочисленных материалов, относящихся к листовым стеклопластикам, особое место занимают стеклотекстолиты, как материалы наиболее широко применяемые при изготовлении деталей, используемых в данных отраслях промышленности. В конструкции этих деталей, как правило, содержится большое количество сквозных элементов (отверстий, окон и пазов различной конфигурации), получение которых не обходится без применения дополнительных операций обработки различными методами.

Растущая потребность использования деталей из листовых стеклотекстолитов, вызванная расширением номенклатуры и областей их применения, обуславливает повышенный интерес к теоретическим и практическим работам, посвященным обработке данных материалов.

В настоящее время основными методами обработки листовых стеклотекстолитов являются обработка резанием и разделительная штамповка. Разделительной штамповкой на просечных штампах получают изделия из тонколистовых стеклотекстолитов (толщиной от 0,5 до 3мм). Как правило, штамповка применяется в серийном и массовом производстве, когда экономически оправдано изготовление оснастки.

В единичном производстве обработку деталей из стеклотекстолитов в основном производят различными методами резания: точением, фрезерованием, сверлением и др. Однако применение данных методов обработки, для рассматриваемых материалов связано с рядом трудностей и недостатков.

Эти трудности заключаются в низкой стойкости режущего

инструмента, высоком уровне шума и запыленности на рабочем месте и объясняются, в основном, особенностями свойств, строения и структуры материала, их высокой анизотропией и неоднородностью составных частей. Вследствие интенсивного затупления режущей части инструмента, вызванного высокими абразивными свойствами наполнителя, требуется большое количество переточек.

При исследовании процесса механической обработки стеклотекстолитов основное внимание уделяется вопросу стойкости режущего инструмента, так как производительность и качество механической обработки данных материалов находятся от нее в прямой зависимости.

Основными путями повышения стойкости инструмента являются: разработка новых материалов режущей части инструмента, изменение конструкции инструмента и геометрии его заточки, подбор оптимальных режимов резания, нанесение износостойких покрытий на режущие кромки и др.

Вышеперечисленные меры позволяют несколько повысить стойкость инструмента, но полностью не устраняют трудности обработки данных материалов.

Технический прогресс в отрасли машиностроения зависит от внедрения и широкого использования высокопроизводительных технологий, позволяющих значительно сократить производственный цикл изготовления изделий при обеспечении необходимого качества обработки и требуемой точности.

К современным перспективным методам разделения материалов можно отнести метод гидроабразивного резания (ГАР), который основан на процессах разрушения под действием сверхзвукового абразивно-жидкостного потока [1-7].

Основной проблемой обработки стеклотекстолитов методом ГАР является возникновение расслоений различной величины (до 70… 80 мм) во

время прошивки материала гидроабразивной струей.

Согласно ГОСТ 20406-75, расслоение - дефект, выраженный в полном или частичном отделении друг от друга слоев слоистого материала. По ОСТ 107.460053.011-2003 по контуру изделий из пластмасс допускаются расслоения площадью до 0,5 мм^2 и глубиной не более 0,15 толщины материала.

В существующих в настоящее время научных разработках в области обработки слоистых полимерных композиционных материалов методом ГАР рассматриваются в основном вопросы обеспечения размерной точности получаемых заготовок и требуемой шероховатости поверхности резания. Вопрос образования расслоений во время прошивки данных материалов мало изучен.

В направлении увеличения производительности и обеспечения качества резания полимеров сверхзвуковой струей жидкости следует отметить работы Р.А. Тихомирова, Е.Н Петухова, Д.В. Кравченко, М.А. Бурнашова, Р.Г. Мирзоева, P. D. Unde, M. D. Gayakwad, N. G. Patil, R. S. Pawade, D. G. Thakur, P. K. Brahmankar, F. Cénac, M. Déléris, F. Collombet, R. Zitoune J. Zeng, P. Tambe, M. Shukla, D.K. Shanmugam, T. Nguyen, J. Wang [8-25].

В области создания и разработки гидрорежущего оборудования необходимо выделить труды В.А. Слабодянюка, И.И. Шапиро, А.Т. Момчилова, В.С. Гуенко, В.А. Новикова, И.В. Петко, Ю.Н. Лаптева, С.В. Беляева, С.Н. Полянского, M. Hashish, C. Brandt, R. Kovacevic, B. Liu, J. Fair, и др. [26-30].

Много работ посвящено вопросам исследования применяемого абразивного материала (размера абразивного зерна, состава абразива, его формы и механических свойств и т.д.). Результаты изучения влияния свойств абразива на качество поверхности реза и достигаемой производительности представлены в трудах Ю.С. Степанова, Г.В. Барсукова, И.В. Петко, В.А. Слабодянюка, А.В. Михеева, Ю.В. Клапцова, M. Agus, R. Badruddin,

H. Wadell, A. Laurinat , S. Bahadur, H. Heywood, J. Vasek [31-42].

Современное программное обеспечение позволяет моделировать взаимодействие между струей и материалом, программировать траекторию движения инструмента, определять время обработки. Существенный вклад в развитие данной области внесли И.И. Шапиро, Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев, А.Л. Галиновский, А.А. Барзов, В.М. Елфимов, М.И. Абашин, Г.М. Иванов, М.В. Барабанов, В.К. Свешников, M. Hashish, J. Zeng, A. Momber, H.-T. Liu, E. Schubert, J. Munoz, E.S. Geskin, D. Arola, M. Ramulu, P. Singh, A. Thomas, R. Kovacevic, R. Mohan, M. Varghese и др. [43-46].

Тем не менее, при большом количестве работ, посвященным ГАР, отсутствуют практически применимые рекомендации и расчетные модели по выбору способов и режимов прошивки листовых стеклотекстолитов, позволяющие исключить возникновение расслоений во время прошивки данных материалов.

Исходя из сказанного, изучение зависимостей влияния режимов и способов прошивки листовых стеклотекстолитов на величину их расслоения, а также разработка технологических рекомендаций по прошивке листовых стеклотекстолитов методом ГАР является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы: обеспечить отсутствие расслоений на поверхности готовых деталей из стеклотекстолитов при гидроабразивном резании на основе научно-обоснованного выбора режимов прошивки и траектории движения сопла.

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

1. Теоретически изучить и провести анализ факторов, влияющих на величину расслоения при прошивке листовых стеклотекстолитов методом гидроабразивного резания.

2. Установить функциональные зависимости образования расслоений в листовых стеклотекстолитах при прошивке от технологических

режимов посредством моделирования его разрушения под действием гидроабразивной струи.

3. Экспериментально определить влияние режимов прошивки и основных технологических параметров на возникновение и величину расслоения листовых стеклотекстолитов.

4. Разработать критерий обрабатываемости листовых стеклотекстолитов методом гидроабразивного резания по значению величины расслоения материала при прошивке.

5. Разработать и промышленно апробировать технологические рекомендации по резке листовых стеклотекстолитов методом ГАР, обеспечивающие отсутствие расслоений на поверхности готовой детали.

Научная новизна.

1. На основе предложенной физической картины расслоения стеклотекстолита под действием гидроабразивной струи и моделирования напряженно-деформированного состояния выявлена преобладающая роль касательных напряжений в образовании межслойных трещин и получены их математические модели, позволяющие определить условия зарождения трещин при прошивке по предельному значению касательных напряжений.

2. Выявлены экспериментальные закономерности величины расслоения стеклотекстолита при прошивке гидроабразивной струей от давления истечения, диаметра фокусирующей трубки, зернистости абразива, траектории движения и угла наклона фокусирующей трубки.

3.Предложен относительный критерий обрабатываемости стеклотекстолита по расслоению, характеризующий физико-механическое состояние материала на момент обработки. Введение этого критерия позволило классифицировать материалы по коэффициенту относительной обрабатываемости для определения необходимости и последовательности действий при коррекции режимов прошивки и траектории движения сопла.

Практическая ценность.

1. Получены зависимости влияния основных технологических

факторов на величину расслоения листовых стеклотекстолитов, позволяющие технологу назначить режимы их прошивки, обеспечивающие отсутствие или минимальную величину расслоения.

2. Предложен критерий обрабатываемости листовых стеклотекстолитов гидроабразивной струей по расслоению при прошивке (K_H – коэффициент относительной обрабатываемости по критерию величины расслоения), позволяющий определить:

- необходимость корректировки технологических режимов прошивки обрабатываемого материала;
- целесообразность увеличения межлекального расстояния при раскладке деталей на листе при его раскрое;
- необходимость удаления точки прошивки от обрабатываемого контура;
- необходимость применения специальных технологических приемов («отсекающие резы» и т.п.) при вырезке деталей;
- возможность обработки внутренних поверхностей (пазов, отверстий, окон и т.д.).

3. Разработаны и промышленно апробированы технологические рекомендации по обработке листовых стеклотекстолитов высокопроизводительным методом гидроабразивного резания, позволяющие исключить возникновение расслоений на поверхности готовой детали.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Физическая модель разрушения листового стеклотекстолита под действием гидроабразивной струи.

2. Модель напряженно-деформированного состояния стеклотекстолита при действии на него гидроабразивной струи.

3. Зависимости величины расслоения стеклотекстолитов от технологических режимов прошивки.

4. Методика диагностирования материала и определения коэффициента относительной обрабатываемости по расслоению листовых

стеклотекстолитов.

5. Комплекс мероприятий и специальных технологических приемов, позволяющих предотвратить распространение расслоений материала, образующихся при прошивке, на поверхность детали.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе» (г. Москва, 2010г., 2012г.), заседании научно-технического Совета ассоциации разработчиков и производителей корабельных информационных и управляющих систем «Моринформсистема» (г. Калуга, 2010 г.), Международной научно-практической интернет-конференции "Энерго- и ресурсосбережение - XXI век" (г. Орел, 2013г. и 2014г.), I и II региональных заочных научно-практических конференциях «Конструкторско-технологическое обеспечение качества изделий машиностроения» (2013г., 2014г.), региональной научно-практической конференции им. А.Г.Шипунова (г. Ливны, 2014г.), заседании регионального конкурса молодежных инновационных проектов по программе « У.М.Н.И.К.» (2011г.). Исследования в области гидроабразивного резания стеклотекстолитов были отмечены присуждением премии Городской Управы г. Калуги. В настоящее время проходит экспертиза по существу для получения Патента РФ на изобретение «Способ гидроабразивного резания листовых слоистых полимерных материалов».

Результаты исследований нашли применение на ОАО «Калужский электромеханический завод», АО «Тайфун», ОАО «Калужский завод автоэлектрооборудования».

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности.

Областью диссертационного исследования является обеспечение качества поверхности деталей из стеклотекстолитов по критерию отсутствия

расслоений, образующихся в начале гидроабразивного резания (при прошивке) путем управления технологическими параметрами прошивки и коррекции траектории рабочих ходов. Область исследования соответствует паспорту специальности 05.02.08-Технология машиностроения (технические науки):

п.2 - технологические процессы, операции, установы, позиции, технологические переходы и рабочие хода, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости;

п.3 - математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения;

п.7 - технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 20 печатных работ, 5 из них в научно-технических изданиях из перечня ВАК («Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» г. Орел, «Радиопромышленность» г. Москва), одна - коллективная монография, одна - статья в зарубежном издании (Science in the modern information society VII: Proceedings of the Conference).

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет».

Глава 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЗАНИЯ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Актуальность производства деталей из стеклотекстолитов

Стеклотекстолиты являются одной из наиболее многочисленных и перспективных групп стеклопластиков конструкционного и электро-радиотехнического назначения. Эти материалы отличаются высокой прочностью, упругостью, теплостойкостью и диэлектрическими свойствами. Они сохраняют свои механические свойства при температуре до 350 °С.

Стеклотекстолиты - композиционные материалы, состоящие из стеклоткани и синтетического полимерного связующего.

Тонкие высокопрочные волокна стеклоткани обеспечивают прочность и жесткость материала. Связующее обеспечивает связь отдельных волокон в общую систему, способствует равномерному распределению нагрузки, позволяет эффективно использовать механические свойства стеклянного волокна, а также защищает волокно от воздействия внешних факторов. От характеристик наполнителя и прочности его связи со связующим зависят механические свойства стеклопластика, а свойствами связующего определяется температура его эксплуатации.

Благодаря армированию полимерной матрицы стекловолокном, стеклопластик приобретает свойства, недоступные обычным пластмассам. Стеклопластики на порядок выше пластмасс по прочности, истираемости, линейному расширению, ударным и вибрационным нагрузкам. Из-за высоких прочностных характеристик, стеклопластики называют «легкими металлами».

Наряду с хорошими диэлектрическими показателями, сравнительно низкой плотностью и теплопроводностью, стеклотекстолиты обладают высокими механическими свойствами, а также высокой атмосферо-, водо- и

химостойкостью.

В России основной объем потребления стеклотекстолитов приходится на электротехническую отрасль, машиностроение и оборонную промышленность (рисунок 1.1).

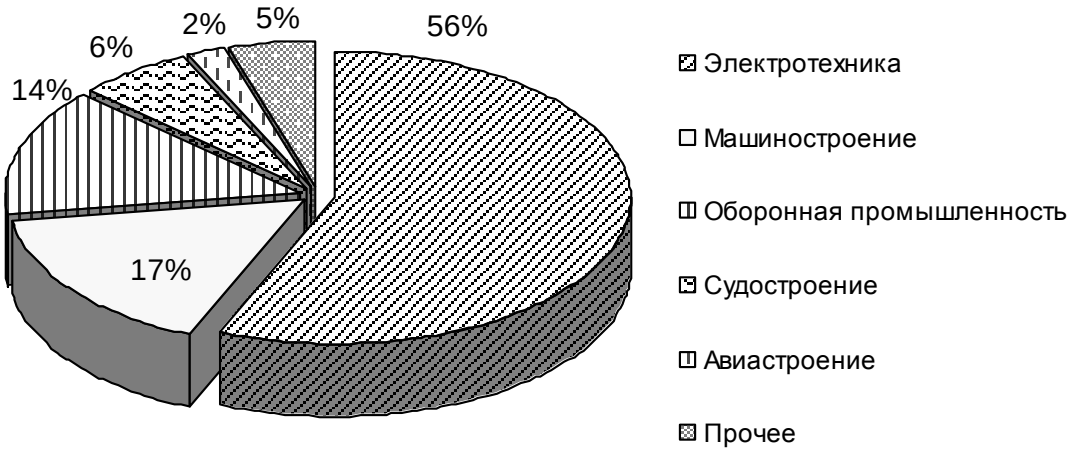


Рисунок 1.1- Структура потребления стеклотекстолитов в России по отраслям промышленности

В отечественной промышленности одними из наиболее распространенных материалов электротехнического назначения являются слоистые пластики. Их доля составляет около 35% от всех изготавливаемых материалов электротехнического назначения, при этом примерно 30% из них - стеклотекстолиты. В электротехнике стеклотекстолиты используют в качестве электроизоляционных и конструкционных материалов при изготовлении клиньев для пазовой изоляции статорных обмоток машин переменного тока, роторных обмоток генераторов и асинхронных двигателей, якорных обмоток машин постоянного тока, панелей, шайб, планок с контактами, прокладок, изоляторов и колец в электрощитовом оборудовании, корпусов приборов, высоковольтных выключателей, траверс и т.д. (рисунок 1.2).

В машиностроении из стеклотекстолитов изготавливают шестерни, втулки, ролики, кольца и другие изделия конструктивного назначения.

Стеклотекстолиты широко применяются в качестве антифрикционного

материала для подшипников скольжения прокатных станов, а также в гидротехнических сооружениях [47].

В оборонной промышленности стеклотекстолиты востребованы в производстве различных панелей, прокладок, корпусов приборов, траверс, кольца, втулок, дисков.

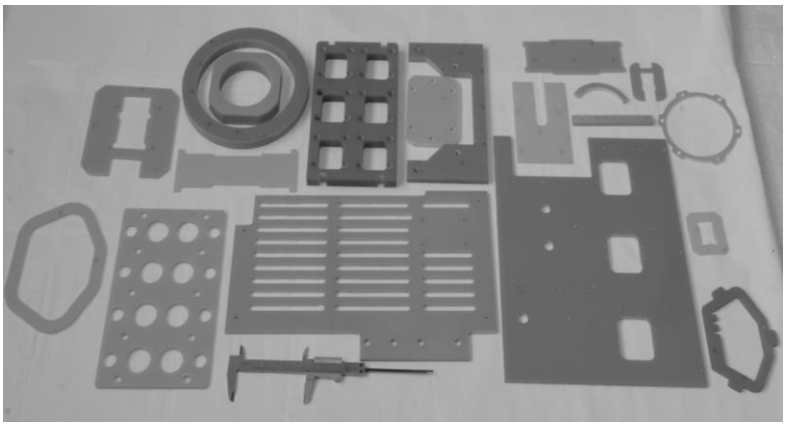


Рисунок 1.2 - Детали из стеклотекстолитов

По данным Всероссийского института авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) [112] доля полимерных композиционных материалов (стеклопластиков и углепластиков) при изготовлении современных пассажирских самолетов составляет от 22-39% (А-380, А-350) до 50% («Боинг-787»). Стеклотекстолиты широко используются для производства обшивок различных слабонагруженных конструкций (монолитных и сотовых) пассажирских авиалайнеров.

Изделия из конструкционных стеклотекстолитов могут длительно работать при температурах до 350ºС. Конструкционные стеклотекстолиты применяются для изготовления электродных плит электродиализных аппаратов, в качестве облицовки вибропечей, а также машин по производству химических волокон.

1.2 Классификация стеклопластиков

В связи с тем, что на обрабатываемость стеклопластиков влияет множество

различных факторов (метод изготовления, тип и ориентация стекловолокна, тип связующего и др.), то дать их единую классификацию стеклопластиков затруднительно. Рассмотрим наиболее распространенные виды классификаций (рисунок 1.3). [48-51]

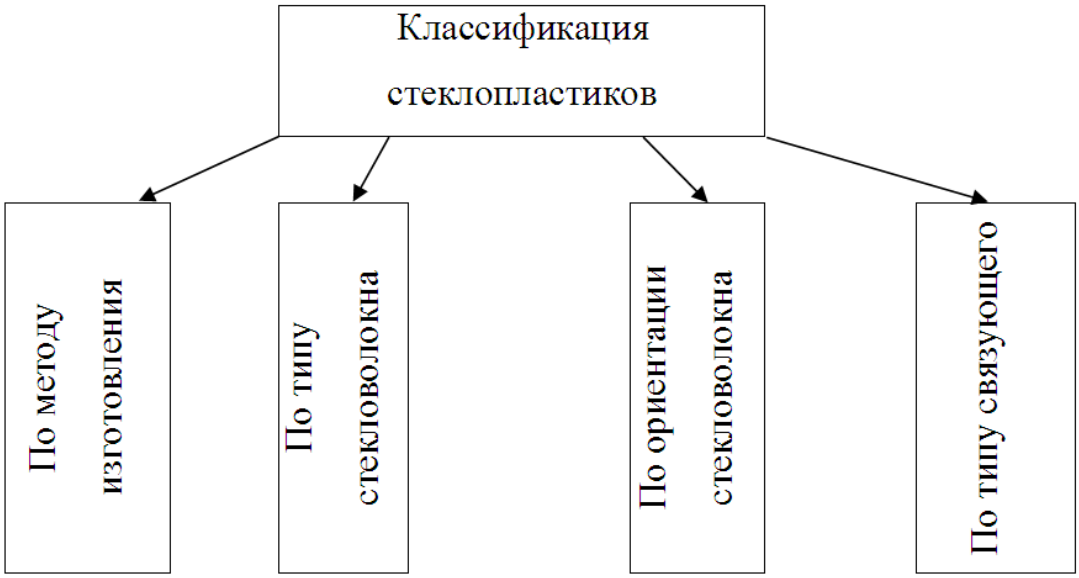


Рисунок 1.3- Основные виды классификации стеклопластиков

1.2.1 Классификация стеклопластиков по методу изготовления

Стеклопластики относятся к классу реактопластов или термореактивных композиционных материалов и в отличие от термопластов их производство сопровождается химическими реакциями образования трехмерных структур, при котором обратный переход в вязкотекучее состояние невозможен.

К основным промышленным методам изготовления стеклопластиков относятся: прессование при низких и высоких давлениях, контактный метод и метод намотки (рисунок 1.4).

Исходя из представленных методов изготовления, стеклопластики делятся на группы [51]:

1. Стеклопластики, полученные контактным методом и прессованием при низких давлениях.

При изготовлении стеклопластиков прессованием при низких

давлениях сначала оформляют заготовку, т.е. наполнитель заранее укладывают по форме детали и пропитывают связующим. Затем производят окончательное формование изделия прессованием. Прессование выложенных слоев стеклоткани, пропитанных связующим для их соединения и некоторого уплотнения, производят путем приложения равномерного давления, нормального к поверхности формуемого изделия в каждой его точке. Так как в процессе отверждения выделяется незначительное количество летучих, то не требуется высоких значений давления прессования.

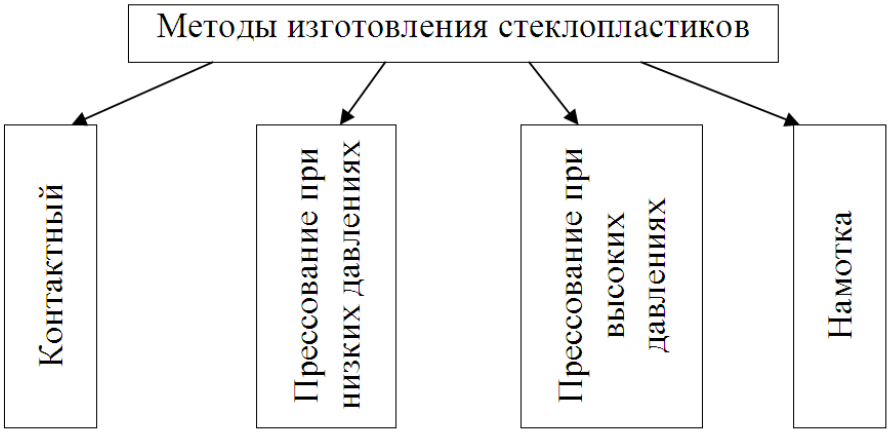


Рисунок 1.4 - Методы изготовления стеклопластиков

При контактном методе вначале осуществляется пропитка стекломата смолой. Пропитанный стеклоармирующий материал укладывается в форму, и прикатывается специальными прикаточными валиками по поверхности формы для удаления воздушных пузырьков и равномерного распределения связующего по всей поверхности. Отверждение происходит при комнатной температуре. Данный метод применяется для изготовления крупногабаритных деталей сложного профиля в единичном производстве.

2. Стеклопластики, полученные прессованием с высокими давлениями.

Листовые стеклопластики изготовляются в этажных гидравлических прессах. Листы пропитанного наполнителя укладываются слоями между металлическими прокладочными листами этажного пресса.

Процесс прессования заключается в одновременном воздействии на материал высокого давления и температуры, под влиянием которых

связующее расплавляется и более полно обволакивает волокно, склеивая листы наполнителя друг с другом. В крайних слоях пакета смола, равномерно растекаясь по поверхности, образует ровную прозрачную пленку. Далее под воздействием высокой температуры и давления, после соответствующей выдержки, связующее окончательно отвердевает, образуя плотный и монолитный лист стеклопластика.

3. Стеклопластики, полученные методом намотки.

Армирующие волокна пропускаются через ванну с активированной смолой. После смоляной пропитки они наматываются на вращающийся сердечник до получения нужной толщины. При этом можно координировать угол намотки путем изменения движения подающей волокна тележки. Данным методом изготовляются трубы и трубки различного диаметра.

1.2.2 Классификация стеклопластиков по типу и ориентации стекловолокна

Рассмотрим основные типы стекловолокна, применяемого в стеклопластиках и влияние его состава и ориентации на механические свойства.

В производстве стеклопластиков применяют следующие типы стекол, отличающиеся по своему химическому составу: алюмомагнезиальное (щелочное), алюмоборосиликатное (бесщелочное), кремнеземное. [51]

Стекловолокно на основе алюмомагнезиального стекла обладает повышенными гигроскопическими свойствами. Под воздействием влаги на поверхности стекловолокна происходит образование свободной щелочи, проникающей в поверхностные трещины и усиливающей разрушение волокон. Это приводит к снижению прочности стекловолокна, а, следовательно, и стеклопластика, изготовленного на его основе. В связи с указанными недостатками при производстве стеклопластиков щелочное стекло применяется крайне редко.

Длительное воздействие влаги на незащищенное стекловолокно из алюмоборосиликатного стекла также приводит к потере его прочности (до 40%), но прочность стекловолокна восстанавливается после его высыхания [52].

Кремнеземное волокно получают обработкой смесью серной и соляной кислот бесщелочного или щелочного стекла. Данное волокно используют для изготовления стеклопластиков с высокими теплофизическими свойствами.

На основании вышесказанного по типу стекловолокна можно стеклопластики делят на следующие группы (рисунок 1.5) [51]:

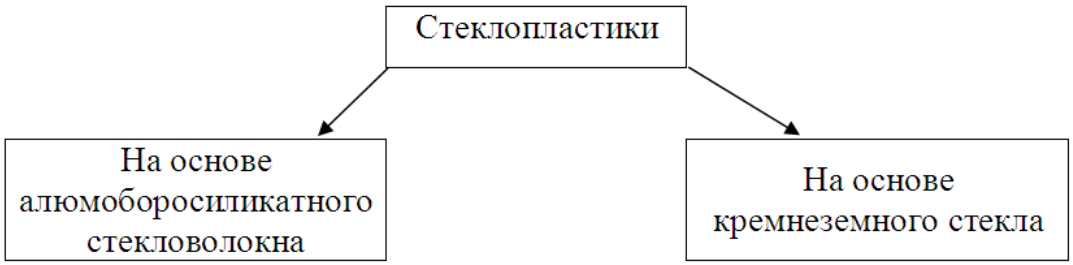


Рисунок 1.5 - Классификация стеклопластиков по типу стекловолокна

1) на основе алюмоборосиликатного стекловолокна (около 54% SiO_2). СТЭФ, ЭФБ-П, АГ-4С, ВФТ и др.;

2) на основе кремнеземного стекла (около 98% SiO_2) РТП, П-5-2, ТЗ-9Ф.

Для производства стеклопластиков в основном используется стекловолокно, прошедшее текстильную переработку в ровницы, жгуты или ткани.

Ровница - пучок непрерывных прядей, состоящих из некрученых волокон. Стеклопластики на основе ровниц, обладают ярко выраженной анизотропией свойств. [58]

Жгуты - рубленые пряди из некрученых волокон [58]. Жгуты используются для производства неориентированных стеклопластиков.

Стеклоткани применяются в производстве стеклотекстолитов. Основными характеристиками тканей являются толщина пряжи, вид

переплетения и плотность. Толщина пряжи характеризуется массой, приходящейся на единицу длины.

Переплетением называют определенный порядок чередования перекрытий нитей одной системы с нитями другой, причем нити, расположенные вдоль ткани, называют основой, а поперек – утком. Наиболее распространенные виды переплетений – полотняное, саржевое и сатиновое (рисунок 1.6). [54]

При полотняном переплетении основные и уточные нити перекрывают одна другую поочередно (рисунок 1.6 *а*). У ткани с полотняным переплетением лицевая и изнаночная стороны одинаковы. Ткани с полотняным переплетением отличаются простотой выработки и высокой прочностью.

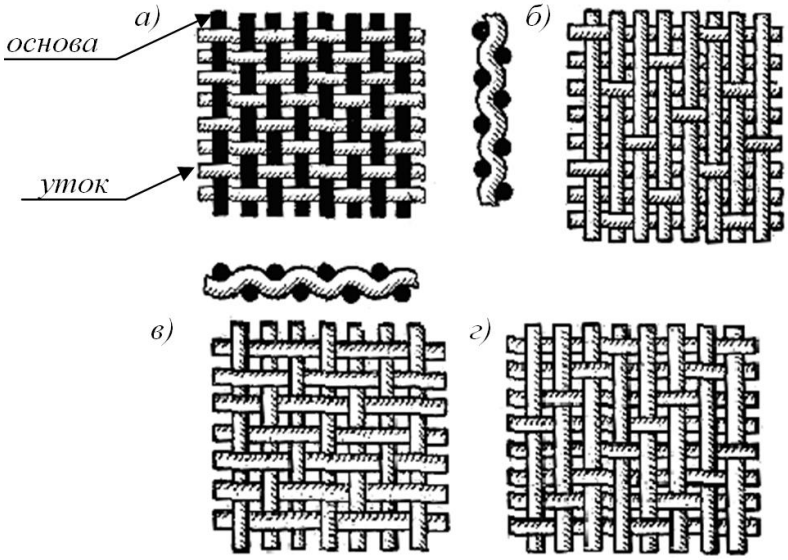


Рисунок 1.6 - Различные виды переплетения тканей: а) полотняное; б) сатиновое; в), г) саржевое различных типов

При сатиновом переплетении сдвиг перекрытий при каждой следующей перекидке утка должен быть не менее, чем на две нити; в результате участки перекрещивания основных и уточных нитей разбросаны и незаметны (рисунок 1.6 *б*).

Саржевое переплетение дает на поверхности тканей характерные узкие

полосы – диагонали под углом 45 º к кромке ткани (рисунок 1.6 *в* и *г*). При одинаковой плотности ткани саржевого переплетения имеют меньшую прочность, чем ткани полотняного переплетения.

В отечественной промышленности наибольшее распространение получили стеклопластики на основе стеклоткани полотняного переплетения. [55]

Механические свойства стеклопластиков в основном зависят от вида наполнителя. Известно, например, что трение и изгибы нитей в стеклоткани снижают их механическую прочность. Поэтому прочность однонаправленной нити выше, чем крученой, прошедшей текстильную переработку.

В зависимости от вида ориентации стекловолокна различают следующие группы стеклопластиков [51] (рисунок 1.7):

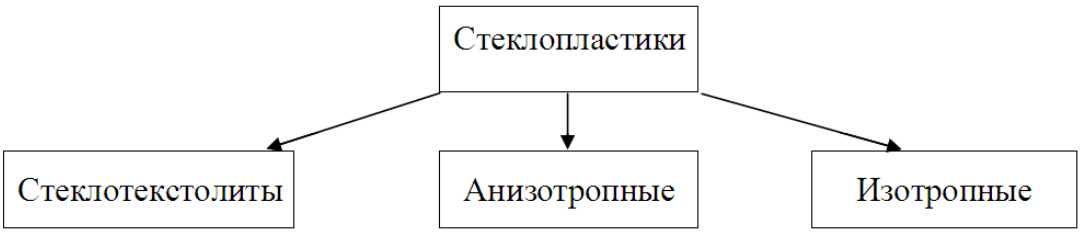


Рисунок 1.7 - Классификация стеклопластиков по виду ориентации стекловолокна

1) стеклотекстолиты – пластики на основе различных типов стеклянных тканей (КАСТ, ВФТ, СТЭФ и др.). В соответствии с химической природой связующего это могут быть либо материалы контактного формирования (например, в случае полиэфирных смол), либо листовые и плиточные материалы и изделия, получаемые горячим прессованием (фенолоальдегидные смолы).

2) анизотропные стеклопластики – материалы на основе однонаправленных нитей без применения процесса ткачества. К этому типу пластмасс относятся изделия, получаемые методами намотки, АГ-4С и стекловолокнистый анизотропный материал (СВАМ);

3) изотропные стеклопластики – материалы с неориентированным

расположением волокон (на основе жгутов) (АГ-4-В, П-5-2 и др.).

Существенным недостатком стеклотекстолитов по сравнению с другими стеклопластиками является наличие переплетения волокон, которое обязательно имеет место во всех типах стеклотканей, из которых изготавливаются стеклотекстолиты [56]. В работах [56, 57] отмечено, что при растяжении и изгибе стеклотекстолитов в них возникают дополнительные напряжения, обусловленные изгибом, а также контактные напряжения.

Отмечалось [56], что прочность стеклоткани при разрыве зависит не только от прочности нитей, из которых она изготовлена, и от их количества, но и от структуры стеклоткани. Нити, составляющие полоску стеклоткани, находятся в изогнутом положении, поэтому при разрыве они имеют меньшую прочность по сравнению с распрямленными нитями.

Рассмотрим работу нитей в ткани полотняного переплетения при ее растяжении в направлении основы (рисунок 1.8 *а*). Продольные (основные) нити растягиваются и стремятся распрямиться. Чтобы произошло их распрямление, они должны продвинуться, а поперечные (уточные) нити — изогнуться (рисунок 1.8 *б*). При этом происходит увеличение толщины слоя ткани (от $2d$ до $3d$, где d — диаметр нити). Это служит одной из причин расслаивания стеклотекстолитов при растяжении. За счет дополнительного изгиба уточных нитей ячейки смолы, заключенные между двумя продольными и двумя поперечными нитями, испытывают воздействие крутящего момента [57].

Кроме напряжений изгиба при растяжении стеклоткани происходит сжатие участков нитей в местах переплетений (рисунок 1.9), и это явление усиливается по мере возрастания нагрузки.

Вследствие данных явлений снижается прочность, особенно на растяжение, стеклотекстолитов по сравнению с материалами из прямолинейных и непереплетенных волокон или нитей. Так, в стеклотекстолитах отношение предела прочности при сжатии к пределу прочности при растяжении обычно не превышает 0,25-0,30, а отношение этих

характеристик для анизотропных стеклопластиков составляет примерно 0,85-0,90 [56].

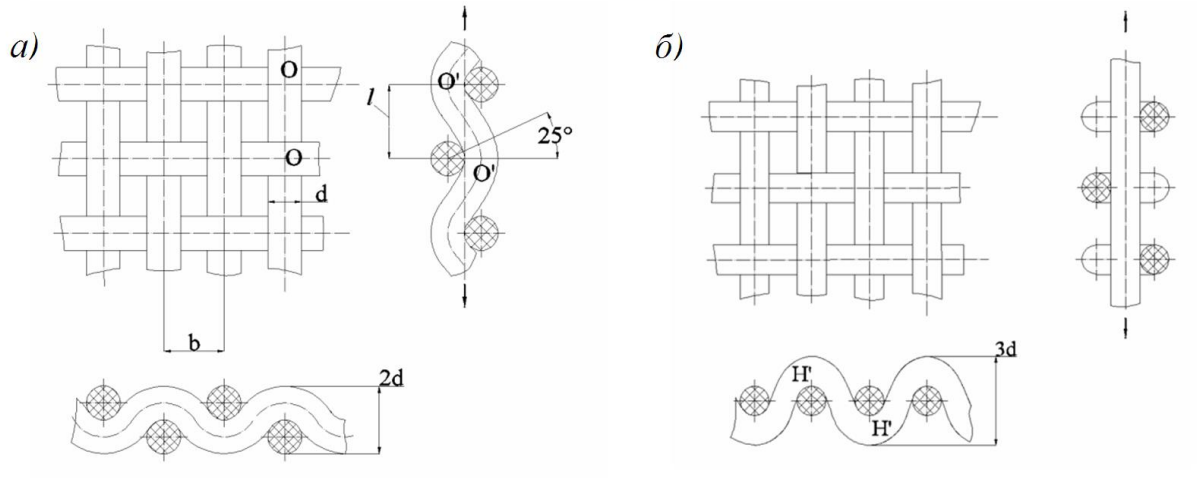


Рисунок 1.8 - Схема расположения нитей в стеклоткани полотняного плетения: а) до нагружения; б) после нагружения.

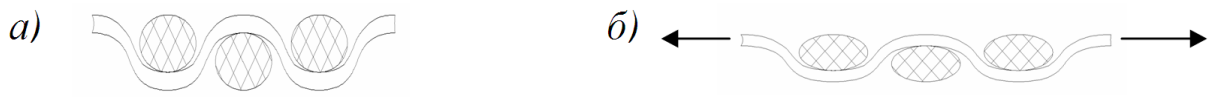


Рисунок 1.9 - Схема расположения нитей в стеклоткани: а) до нагружения; б) после нагружения (при растяжении)

1.2.3 Классификация стеклопластиков по типу связующего

Как правило, в состав связующего входят синтетические смолы с различными добавками (инициаторы, ускорители, катализаторы и др.). Основными требованиями к связующему являются хорошая адгезия к стекловолокну и высокая смачивающая способность, позволяющие обеспечить склеивание отдельных нитей и слоев и способствующие равномерному распределению нагрузки в материале. Эти требования важны, поскольку связующее в стеклопластиках только обволакивает поверхность стекловолокна, не проникая в его структуру, как это происходит при изготовлении пластмасс на основе органических наполнителей (гетинакса, текстолита, древеснослоистых пластиков).

Для производства стеклопластиков наиболее широко применяются полиэфирные, эпоксидные, фенольно-формальдегидные, и их модификации. [51]

Классификация стеклопластиков по типу связующего достаточно условна, поскольку в некоторых стеклопластиках связующее представляет собой композицию смол, относящихся к различным группам [51, 58] (рисунок 1.10):

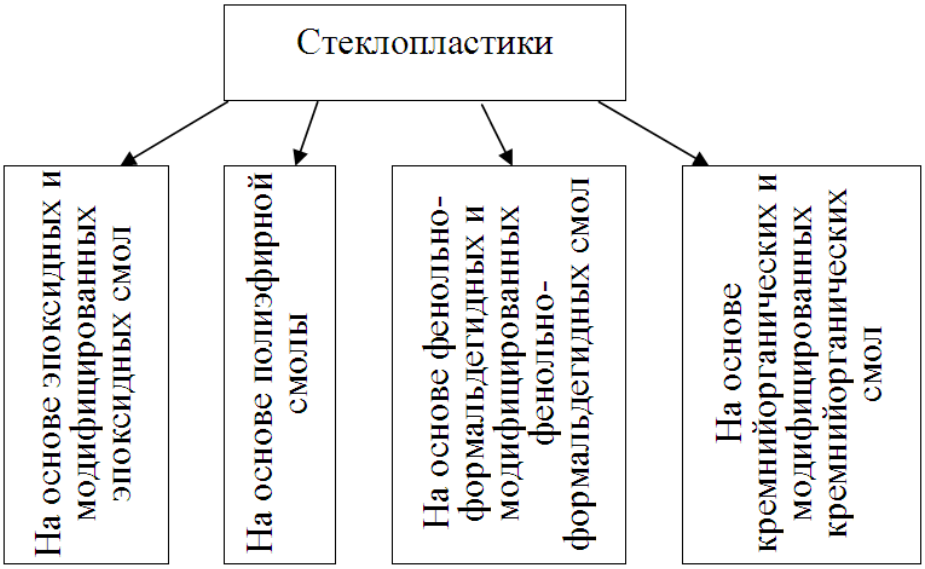


Рисунок 1.10 - Классификация стеклопластиков по типу связующего

- стеклопластики на основе эпоксидных и модифицированных эпоксидных смол: ЭФ-32-301, ЭДП-10П, 27-63С, 33-18 С, ЭФБ-П, ЭФБ-Н;
- стеклопластики на основе полиэфирной смолы - ПН-1;
- стеклопластики на основе фенольно-формальдегидных и модифицированных фенольно-формальдегидных смол: П-5-2, ВОТ, ФН, АГ-4 С, АГ-4 В;
- стеклопластики на основе кремнийорганических и модифицированных кремнийорганических смол: РТП, ТЗ-9Ф, СК-9Ф.

Тип связующего определяет термостойкость материала. Большинство стеклопластиков способно длительно работать при температурах 130-150°С и кратковременно - до 250°С. Стеклопластики на основе эпоксидных смол работают при температурах до 200 °С, а на основе кремнийорганических

связующих - до 370 °С [59].

Данная работа посвящена вопросам обеспечения требуемого качества обработки листовых стеклотекстолитов методом гидроабразивного резания. В качестве объекта исследования был использован электротехнический листовой стеклотекстолит СТЭФ-1 (ГОСТ 12652-74), как одного из широко применяемых в промышленности.

В качестве стеклонаполнителя в СТЭФ-1 используется стеклоткань полотняного переплетения марки ЭЗ-100, состоящая из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла. Связующее представляет собой композицию эпоксидной смолы марки ЭД-16 и фенолформальдегидной смолы в соотношении 70:30.

Технология изготовления листовых стеклотекстолитов состоит из двух основных операций, включающих в себя пропитку наполнителя связующим и его прессование на многоэтажных гидравлических прессах. Вспомогательными операциями технологии являются: подготовка наполнителя, сушка пропитанного наполнителя, нарезка просушенного наполнителя по размеру плит пресса, сборка пакетов из нарезанных листов наполнителей, обрезка краев стеклотекстолита, термообработка готового материала. [55]

1.3 Основные методы обработки листовых стеклотекстолитов

Для получения заданных размеров деталей листовые материалы подвергают обработке. К основным методам обработки листовых стеклотекстолитов относят обработку резанием и разделительную штамповку. В последнее время для обработки листовых стеклотекстолитов все более широко применяются такие высокопроизводительные методы, как лазерная резка и ГАР (рисунок 1.11).

Разделительной штамповкой на просечных штампах получают изделия из тонколистовых стеклотекстолитов (толщиной от 0,5 до 3мм). К операциям

разделительной штамповки относят: вырубку, пробивку, отрезку, подрезку, разрезку, обрезку, зачистку и др. [1].

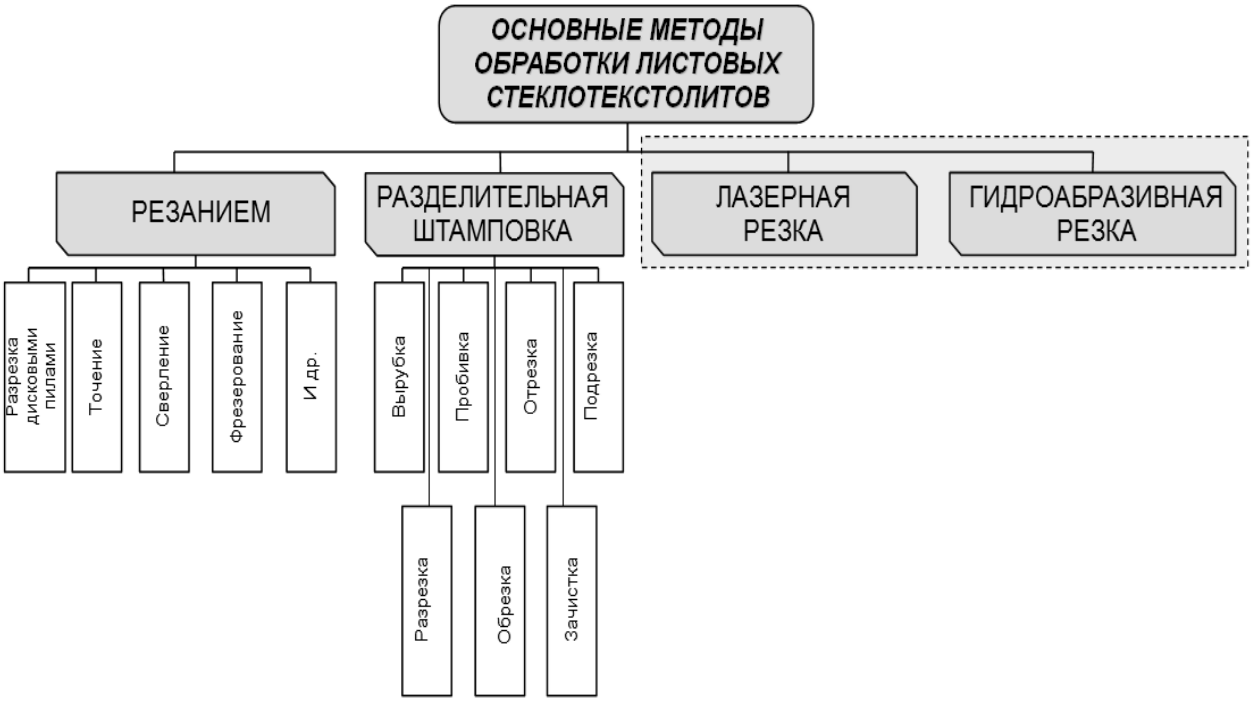


Рисунок 1.11 - Основные методы обработки листовых стеклотекстолитов

Отрезка – полное отделение одной части материала от другой [1].

Вырубка представляет собой полное отделение материала по замкнутому (наружному) контуру, когда отделяемая часть является изделием. Вырубка наиболее широко распространена в качестве операции листовой штамповки. [1]

Пробивка используется для полного отделения одной части материала от другой по замкнутому (внутреннему) контуру, для образования отверстий или пазов. При этом отделяемая часть является отходом. [1]

Подрезка - операция, в процессе выполнения которой производится частичное отделение одной части материала от другой для образования выступов или упоров. [1]

Для разделения заготовок или деталей на большее число используют разрезку. В основном разрезка листового материала применяется как

заготовительная операция для получения заготовок с припуском под дальнейшую обработку.

Обрезка производится для полного отделения неровных краев или припусков.

Зачистка – полное отделение в штампах небольших припусков или излишков материала после вырубки или пробивки для получения более точных размеров, улучшения чистоты поверхности среза по контуру или стенкам отверстий. [1]

Достоинством штамповки по сравнению с другими методами обработки тонколистовых стеклотекстолитов являются высокая производительность и относительно низкая энергоемкость на единицу обрабатываемого материала. По этой причине штамповка тонколистовых стеклотекстолитов широко распространена в серийном и массовом производстве.

К недостаткам данного метода относятся:

- возникновение расслоений, растрескивание заготовок, разлохмачивание материала;
- искажение размеров изделия вследствие пружинения материала в процессе его обработки;
- низкая стойкость штампов;
- высокая стоимость изготовления оснастки;
- ограничения по габаритным размерам получаемых деталей.

В единичном производстве обработку деталей из листовых стеклотекстолитов в основном производят различными методами резания: точением, фрезерованием, сверлением и др. Особенности данных методов рассмотрены в разделе 1.5.

Лазерная резка - высокопроизводительный метод обработки различных материалов. Суть процесса лазерной резки полимерных материалов состоит в следующем: мощный луч инфракрасного излучения, генерируемый в резонаторе, передается и фокусируется на разрезаемый материал

специальной линзой. Луч разогревает до высокой температуры небольшой участок материала (пятно фокуса, обычно не более 0,5 мм) на всю глубину листа. Выпаренный материал далее выдувается из реза сопутствующим (режущим) газом высокого давления (при резке неметаллов используется углекислый газ). Режущая головка перемещается, а луч с помощью подвижной системы зеркал доставляется до нее. Таким образом, производится раскрой материала. [60]

К преимуществам лазерного раскроя стеклотекстолитов относятся:

- высокая скорость резки;
- малая ширина реза (от 0,1 до 1 мм);
- процесс полностью контролируется числовым программным управлением.

К существенным недостаткам лазерного раскроя стеклотекстолитов относятся:

- образование на поверхности реза сажи, уменьшающей удельное сопротивление материала, вследствие чего поверхность становится токопроводящей;
- выгорание связующего и образование дефектного слоя, у которого частично или полностью разрушены полимерные связи;
- образование расслоений материала по периметру реза;
- для обработки листового материала больших толщин (до 30 мм) требуется высокая мощность лазера (до 15 КВт);
- ограничения по толщине листового материала (до 30 мм);
- при нагревании в атмосферу выделяются летучие вещества, негативно влияющие на здоровье станочника [61].

Основным преимуществом технологии ГАР по сравнению с лазерной технологией является отсутствие нагрева обрабатываемых поверхностей. Отсутствует термическое воздействие на материал. Это исключает возникновение структурных изменений в материале, а также выделение продуктов сгорания в атмосферу. Технология ГАР позволяет обрабатывать

стеклотекстолиты толщиной до 230 мм с достаточно высокой скоростью (до 35 мм/мин). Анализ гидроабразивного резания стеклотекстолитов проведен в разделе 1.6.

1.4 Влияние состава, структуры и физико-механических свойств стеклопластиков на их обрабатываемость резанием

Обрабатываемость материалов резанием можно оценить одним из следующих показателей: стойкость режущего инструмента, качество обработанной поверхности, силы, возникающие при резании, скорость резания, тип стружки.

В качестве количественной оценки обрабатываемости лезвийным инструментом существует ряд критериев [62], из которых практическое применение получил критерий оценки обрабатываемости по скорости резания. Он называется критерием относительной обрабатываемости - K_v и представляет собой отношение скорости v резания обрабатываемого материала к скорости резания материала $v_{эт}$, принятого за эталон, при одинаковых периодах стойкости и других равных условиях:

$$K_v = \frac{v}{v_{эт}} \quad , \tag{1.1}$$

где v – скорость резания обрабатываемого материала, мм/мин;

$v_{эт}$– скорость резания материала, принятого за эталон, мм/мин.

За эталонный принимают такой материал, который хорошо исследован и является наиболее близким по свойствам к рассматриваемой марке материала.

Для установления зависимостей влияния структуры с состава материала на обрабатываемость стеклопластиков лезвийным инструментом сопоставляются их коэффициенты обрабатываемости. В исследованиях [51] были сделаны следующие выводы:

1. Наибольшее влияние на обрабатываемость стеклопластиков

лезвийным инструментом оказывает тип стекловолокна. Так, например, коэффициент обрабатываемости стеклопластиков на основе алюмоборсиликатного стекловолокна (ФН, ВФТ) в 5-8 раз выше коэффициента обрабатываемости стеклопластиков на основе кремнеземного стекловолокна (РТП, Т3-9Ф).

2. Тип связующего существенно не влияет на обрабатываемость стеклопластиков резанием.

3. Коэффициент обрабатываемости стеклопластиков с неориентированным и ориентированным взаимноперпендикулярным расположением волокон практически лежит в одном интервале значений. Стеклопластики с однонаправленным расположением волокон обрабатываются лучше, так как при их обработке режущая кромка инструмента не перерезает волокна, а скользит вдоль них, что способствует меньшему износу инструмента в процессе резания.

4. Обрабатываемость стеклопластиков, полученных прессованием при высоких давлениях, ниже, чем обрабатываемость стеклопластиков, полученных прессованием при низких давлениях, намоткой и контактным методом. Это объясняется различной степенью плотности волокон и пористостью в стеклопластике, а также различной адгезией связующего к стекловолокну.

Помимо состава, структуры и метода изготовления стеклопластиков на обрабатываемость резанием влияют их физико-механические свойства.

В работе [51] выявлено, что на процесс резания основное влияние оказывают коэффициент трения и истирающая способность обрабатываемого стеклопластика и установлены функциональные зависимости влияния данных свойств на коэффициент обрабатываемости стеклопластиков:

$$K = 0{,}35 - 74{,}2m; \quad (1.2)$$

$$K = 0{,}789 - 3{,}21 f_{\text{тр}}; \quad (1.3)$$

где: K - коэффициент обрабатываемости стеклопластика;

m - истирающая способность;

$f_{\text{тр}}$ - коэффициент трения.

Получены [51] уравнения связи между механическими свойствами и истирающей способностью стеклопластиков:

$$m = 0,0122 \div 0,0125 \times 10^{-5} \sigma_B, \quad (1.4)$$

$$m = 0,0148 \div 0,0031 \times 10^{-5} E, \quad (1.5)$$

$$m = 0,012 \div 0,132 \times 10^{-5} \sigma_И, \quad (1.6)$$

$$m = 0,0127 \div 1,8 \times 10^{-5} a_H, \quad (1.7)$$

где: σ_B - предел прочности на растяжение;

$\sigma_И$ - предел прочности на статический изгиб;

a_H - удельная ударная вязкость;

E - модуль упругости.

Как и в случае металлов, обрабатываемость стеклопластиков ухудшается с увеличением истирающей способности и коэффициента трения (зависимости (1.2), (1.3)). Это объясняется повышением износа инструмента с ростом истирающей способности обрабатываемого материала.

Из зависимостей (1.4)-(1.7) видно, что с увеличением прочностных свойств ($\sigma_B, \sigma_И, a_H, E$) истирающая способность уменьшается, и следовательно, в отличие от металлов, коэффициент обрабатываемости увеличивается, т.е. обрабатываемость улучшается.

J. Zeng [21] определяет обрабатываемость различных материалов гидроабразивным резанием, через число N_m, зависящее от времени, затрачиваемого на прошивку материала:

$$N_m = \frac{C_{tc} h^{1,786}}{TP^{1,757} d_0^{2,072}}, \quad (1.8)$$

где: N_m – обрабатываемость материала;

h – толщина обрабатываемого материала, дюйм;

d_0 - диаметр сопла, дюйм;

P - давление воды, МПа;

Т- время, необходимое для прошивки материала, с.

C_{tc} – константа (для дюймовой системы измерений C_{tc}=54,7).

На рисунке 1.12 представлены значения N_m при обработке некоторых материалов гидроабразивной струей [22].

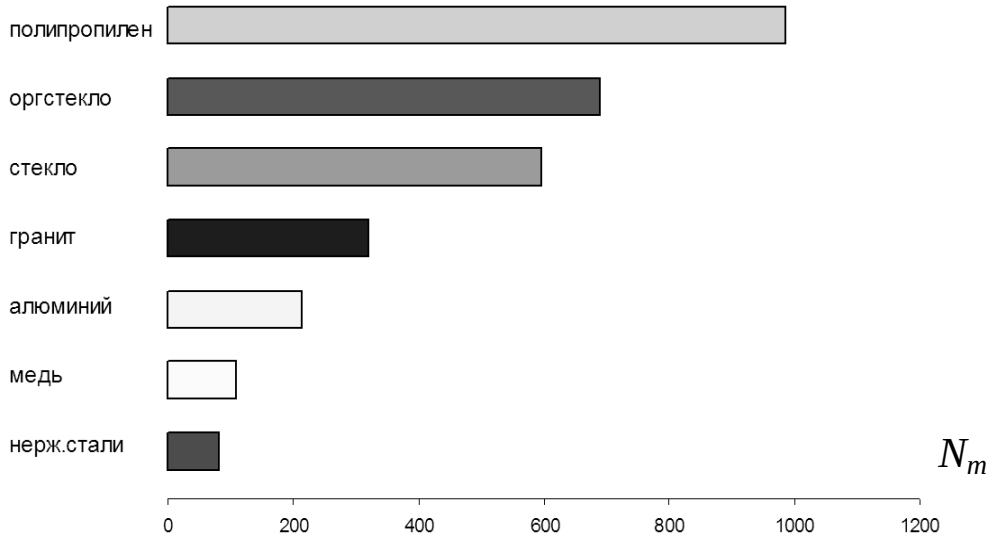


Рисунок 1.12 - Значения N_m для некоторых материалов

1.5 Анализ методов резания стеклотекстолитов: достоинства и недостатки

Основными особенностями механической обработки стеклопластиков являются [62]:

1. Анизотропия свойств материала. От схемы армирования зависит качество обработанной поверхности, поэтому при выполнении механической обработки стеклопластика резанием следует уделять особое внимание направлению подачи режущего инструмента относительно направления армирования.

Вследствие слоистой структуры и наличия участков материала с низкой адгезионной связью наполнителя со связующим относительно сложно получить высокое качество по всей обрабатываемой поверхности.

При обработке деталей из стеклотекстолитов основными видами брака

являются: расслаивание и растрескивание материала заготовки, разлохмачивание и образование прижогов на поверхностях детали [55] (рисунок 1.13).

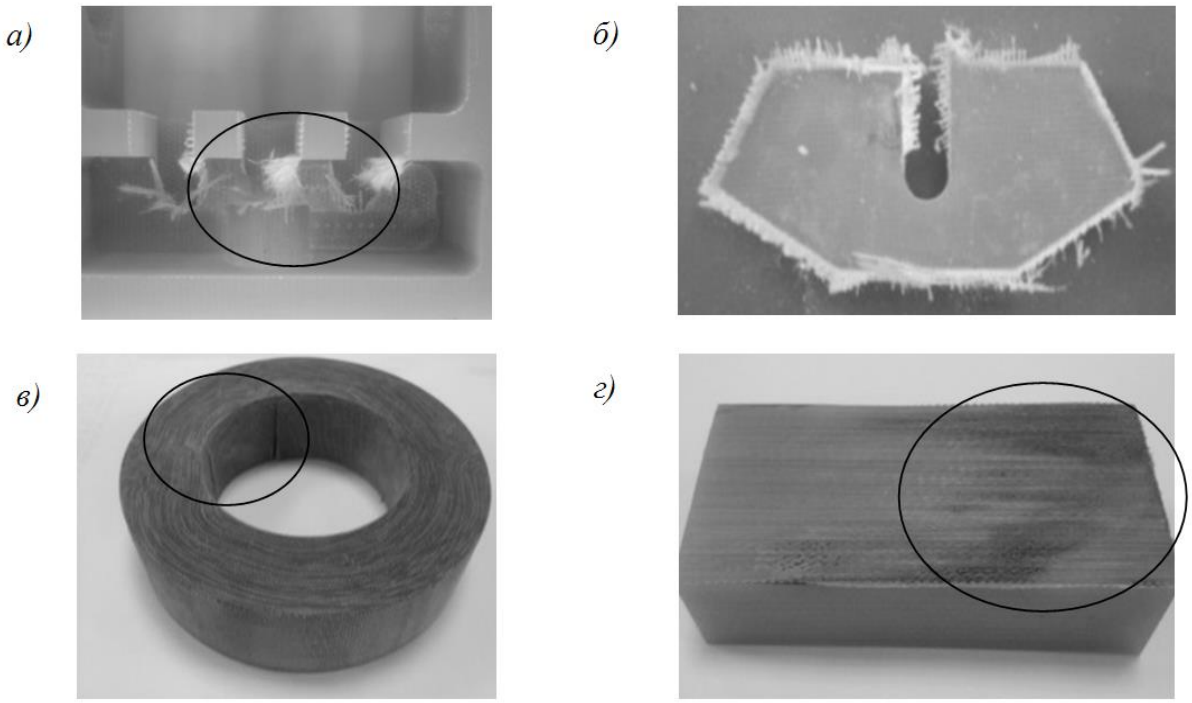


Рисунок 1.13 - Виды брака при механической обработке стеклотекстолитов: а) отслаивание; б) разлохмачивание; в) растрескивание; г) прижоги

Указанные дефекты обработки особенно ярко проявляются при обработке инструментом с высокой степенью износа. В связи со слоистой структурой материала резание изношенным инструментом приводит к расслаиванию материала и разлохмачиванию волокон, а местная низкая адгезия связующего с армирующим волокном вызывает образование трещин в связующем и его последующее выкрашивание.

2. Вследствие низкой теплопроводности материала основная доля тепловой энергии, образующейся в зоне резания, поглощается режущим инструментом, вызывая его перегрев и приводя к повышенному износу. Особенно это ярко выражено при сверлении отверстий, когда инструмент работает в замкнутом пространстве и отвод тепла в окружающую среду затруднен.

3. Интенсивный износ режущего инструмента, вызванный высокими абразивными свойствами наполнителя. В качестве наполнителя для стеклотекстолитов используются стеклоткани, которые обладают высокой твердостью и абразивными свойствами.

4. Под воздействием больших локальных напряжений, создаваемых силами резания и образующейся в зоне резания тепловой энергии, превышающей теплостойкость связующего, в материале происходит деструкция полимерного связующего. В результате этого возникает механохимический адсорбционный износ инструмента как одна из составляющих его суммарного износа [63]. Такой вид износа характерен только для обработки всех полимерных материалов.

5. Высокие упругие характеристики стеклотекстолитов вызывают упругое восстановление слоя обработанного материала, что является причиной снижения точности обработки. В процессе резания часть срезаемого слоя, подминаясь под заднюю поверхность режущего инструмента, упруго деформируется и после восстанавливается на величину $H_{упр}$ (рисунок 1.14).

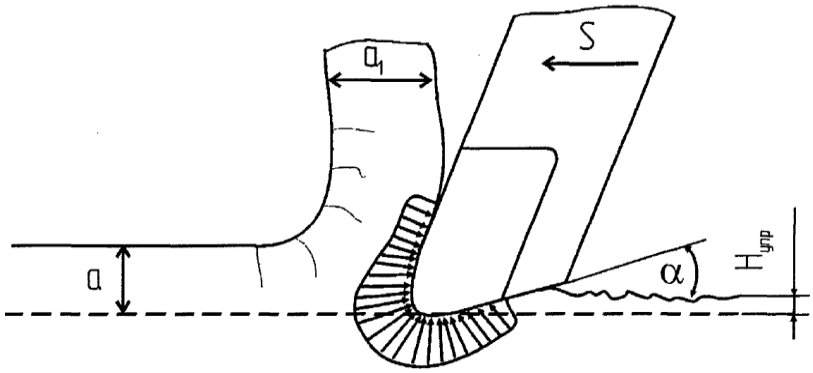


Рисунок 1.14 - Упругое восстановление слоя обрабатываемого материала

Кроме этого поверхностный слой обработанного материала, испытывая напряжения сжатия перед режущей кромкой и растяжение за ней, подвержен образованию микротрещин.

6. Основными условиями определения допустимого износа режущего инструмента при обработке стеклопластиков являются - отсутствие дефектов на поверхности резания и заданная степень шероховатости обработанной поверхности, т.е. износ инструмента оценивается по технологическим факторам.

7. Температура в зоне резания должна быть ниже значения теплостойкости обрабатываемого стеклопластика. Например, для стеклотекстолита СТЭФ-I значение теплостойкости составляет 155°С. При превышении указанного значения на поверхности материала происходит выгорание связующего и образование прижогов.

8. Процесс разрушения стеклотекстолитов носит хрупкий характер. Поэтому при его обработке лезвийным инструментом, наряду с мелкодисперсной стружкой происходит образований пылевидных фракций (рисунок 1.15). Эти мелкодисперсные абразивные частицы, негативно влияют на здоровье рабочих. Пыль раздражающе действует на слизистую оболочку дыхательных путей и кожные покровы работающих, вызывает зуд кожи, может привести к заболеванию дыхательных путей.

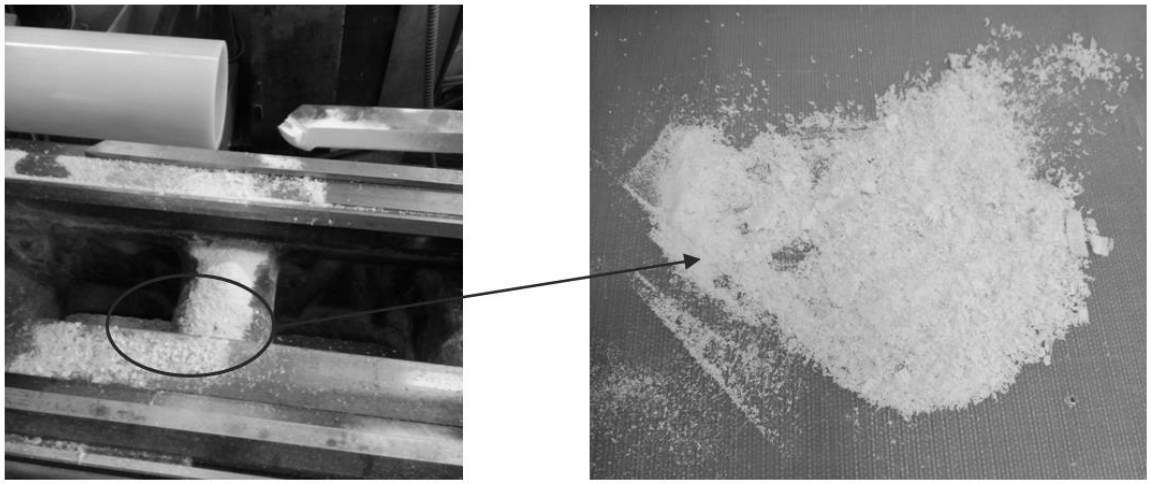


Рисунок 1.15 - Стружка, образующаяся в результате механической обработки стеклотекстолитов

Проникая в движущиеся части оборудования, пыль способствует их износу и снижению технологической точности. Поэтому для поддерживания общей чистоты и снижения негативного влияния пыли на здоровье оператора

необходимо применять специальные средства удаления пыли, например, пневматическую отсасывающую систему, в которой направленная на режущий инструмент воздушная струя служит для направления стружки в заборную насадку.

Исследованиям процесса резания полимерных материалов, в частности стеклопластиков, посвящены труды таких авторов как: С. В. Егоров [66,67], А. И. Исаев [68-70], Р.А.Тихомиров [1, 10-16], В. И. Дрожжин [48,63,71], А. А. Королев, А.В. Руднев [50, 51], А. Кобаяши [72], Б.П. Штучный [49,62,73] и других [43, 58,74-82].

Основными операциями механической обработки листовых стеклотекстолитов являются: разрезка, точение, сверление и фрезерование.

1.5.1 Разрезка стеклотекстолитов

Разрезку листов стеклотекстолитов на заготовки, а также обрезку листов по контуру выполняют как первые механические операции при изготовлении деталей. Как правило, это получение заготовки с припуском под дальнейшую механическую обработку с предварительной разметкой.

Листовые материалы выпускают толщиной 0,5 ... 70 мм с габаритными размерами до 1500 мм. Их разрезают различными методами:

- листы толщиной до 3 мм разрезают на рычажных и гильотинных ножницах;
- для разрезания более толстых листов используют металлообрабатывающие станки: циркулярные, круглопильные, ленточные, фрезерные и абразивно-отрезные.

Основные требования, предъявляемые к заготовкам после разрезания, следующие:

- обеспечение заданных размеров и шероховатости обработанной поверхности;
- отсутствие на ней сколов, трещин, прижогов, разлохмачивания;

- отсутствие внутренних остаточных напряжений в материале.

Разрезание листов из стеклотекстолитов на металлорежущих станках требует их предварительного специального оснащения:

- обеспечение жесткого крепления листов, дополнительных опорных устройств к столам или приспособлений для жесткой фиксации листов, так как эти станки оснащены узкими столами;
- подвод индивидуальной вытяжной вентиляции к зоне резания.

Необходимо отметить некоторые особенности работы режущего инструмента [62]:

1. Под действием сжимающих сил, приложенных со стороны режущих кромок инструмента, обрабатываемый материал в зоне резания упруго деформируется. Упругая деформация сжатия распространяется на значительную часть объема материала вокруг зоны резания. После прохождения режущей кромки инструмента силы, вызвавшие эту деформацию, исчезают, сжатый материал благодаря упругости стремится вернуться в исходное состояние. При этом ширина реза уменьшается, и зубья инструмента как бы заклиниваются. В результате происходит их интенсивное трение об обработанные поверхности заготовки, что вызывает появление дополнительных (паразитных) сил трения, выделение большого количества теплоты и интенсивный нагрев и износ инструмента.

2. Низкая теплопроводность стеклотекстолитов способствует также интенсивному нагреву инструмента, вследствие чего основная часть теплоты, выделившейся при резании, переходит в инструмент. Поэтому на боковых поверхностях инструмента и обработанных поверхностях материала при использовании металлорежущего инструмента после 1 ... 2 мин его работы появляются прижоги, трещины.

3. Конструкция зубьев и их геометрические параметры должны быть такими, при которых силы трения на боковых поверхностях инструментов сведены к минимуму. При заточке зубьев нельзя допускать наличия фасок на их задних и боковых поверхностях. Поверхности зубьев

следует доводить алмазным кругом, нельзя допускать сколов на режущих кромках, а также прижогов и трещин. Биение инструмента на шпинделе станка не должно превышать 0,1 ... 0,15 мм.

Для охлаждения зоны резания и режущих инструментов следует по возможности применять смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), которые выбирают с учетом свойств обрабатываемой марки материала и технологических требований к детали.

1.5.2 Точение стеклотекстолитов

Токарная обработка стеклотекстолитов производится как на универсальном металлорежущем оборудовании, так и на станках оснащенных системой ЧПУ.

Материал резцов для точения стеклотекстолитов должен обладать высокой теплопроводностью и износостойкостью.

Допустимая температура резания для стеклотекстолитов 150-250°С. Выше этих температур обрабатываемый материал размягчается и частично оплавляется в зоне резания. Размягченный материал частично налипает на переднюю и, особенно, на заднюю поверхности, пригорает, что увеличивает силы резания и ухудшает условия резания.

Высокая износостойкость инструментального материала крайне важна при обработке стеклотекстолитов, т.к. даже небольшое притупление режущей кромки инструмента вызывает интенсивный рост сил и температуры, а также снижает качество поверхности.

На шероховатость обработанной поверхности деталей оказывают следующие факторы: марка обрабатываемого и инструментального материала, геометрические параметры резца, режимы резания, износ инструмента, применение СОЖ и др.

Влияние свойств обрабатываемого материала проявляется в процессе стружкообразования и во многом зависит от его состава и структуры. При точении термореактивных пластмасс при самых оптимальных условиях

можно получить параметр шероховатости не более 5 мкм [62].

Из элементов режима резания на шероховатость поверхности наибольшее влияние оказывает подача. При увеличении подачи более *0,2…0,25* мм/об, наблюдается резкое увеличение высоты микронеровностей, сколы кромок поверхностей [62].

Глубина и скорость резания на шероховатость поверхности существенного влияния не оказывают.

Исходя из сказанного, основным направлением повышения эффективности токарной обработки стеклотекстолитов является применение более износостойкого инструмента, обладающего хорошей теплопроводностью.

1.5.3 Сверление стеклотекстолитов

В связи с низкой теплопроводностью стеклотекстолитов сверление отверстий в данных материалах сопряжено с рядом трудностей. Особенно это относится к сверлению глубоких отверстий - более 3*D* (*D* -диаметр сверла), где должно быть обеспечено непрерывное удаление стружки. Малейшая задержка стружки, скопление ее в обрабатываемом отверстии вызывает увеличение трения, а, следовательно, и повышение температуры детали и сверла, что вызывает дефекты в изделии и снижает стойкость инструмента.

Высокая упругость и низкая теплопроводность стеклотекстолитов отрицательно влияют на условия работы сверла.

Высокая упругость материала приводит к увеличению площади контакта и сил трения между сверлом и обработанной поверхностью заготовки, которые увеличиваются по мере увеличения глубины сверления. В результате происходит выделение большого количества теплоты, что из-за низкой теплопроводности материала ведет к увеличению доли поглощения выделяемого тепла сверлом. Вследствие повышенного трения сверла в отверстиях заклиниваются и ломаются, особенно при обработке отверстий

малых диаметров. Стружка интенсивно налипает на рабочие поверхности сверла, пакетируется в канавках и затрудняет процесс резания. Перегрев сверла ведет к появлению прижогов, разупрочнению его режущей части и интенсивному изнашиванию [62].

Результатом высокой упругости стеклотекстолитов является усадка - уменьшение диаметра отверстия по сравнению с диаметром сверла.

При сверлении изделий из стеклотекстолитов возникают такие явления, как выкрашивание материала, образование кроны, расслоение, растрескивание, разлохмачивание наполнителя.

Процесс обработки отверстий в заготовках из стеклопластиков рассматривался в работах отечественных ученых: Штучного Б.П., Терентьева И.С., Тихомирова Р.А., Петровой Н.А., Харламова Г.А., Куфаева Г.Л. и ряда других авторов.

1.5.4 Фрезерование стеклотекстолитов

К операциям, выполняемым на фрезерном оборудовании, относятся: фрезерование плоскостей, уступов, пазов, скосов, а также фасонных поверхностей. При фрезеровании стеклотекстолитов экономическая точность обработки находится в пределах *IT 10-12*, с получением шероховатости обработанной поверхности $R_a=2,5...6,3$ мкм.

По сравнению с точением и сверлением, процесс фрезерования носит прерывистый характер. Вследствие этого вероятность скалывания материала на кромках возрастает. Поэтому при выполнении фрезерных операции по обработке стеклотекстолитов необходимо соблюдать следующие рекомендации [62]:

1) при закреплении заготовки необходимо обеспечивать ее плотное прижатие к установочным элементам приспособления или стола станка;

2) вследствие слоистой структуры с целью избегания

расслаивания необходимо использовать попутную схему фрезерования;

3) обрабатываемый участок детали должен полностью прилегать к базовой (опорной) поверхности приспособления.

При фрезеровании стеклотекстолитов инструмент из быстрорежущей стали не используется, в связи с его низкой стойкостью. Применяются фрезы, режущая часть которых выполнена из твердых сплавов вольфрамо-кобальтовой группы или синтетических алмазов.

1.6 Технологические особенности гидроабразивного резания стеклотекстолитов: преимущества, проблемы, недостатки

Как упоминалось ранее, при исследованиях процесса механической обработки стеклотекстолитов основное внимание уделяется вопросу стойкости режущего инструмента.

Внедрение новых материалов режущей части инструмента, изменение конструкции инструмента и геометрии его заточки, подбор оптимальных режимов резания, нанесение покрытий на режущие кромки, и т.д. повышают стойкость инструмента, однако в целом вопрос стойкости остается нерешенным.

Поэтому остро стоит вопрос разработки и промышленного освоения высокопроизводительных и экономически обоснованных методов обработки стеклотекстолитов, обеспечивающих необходимую точность и качество обработанных поверхностей. К таким методам относится гидроабразивное резание, суть которого состоит в эрозии материала от воздействия на него сверхзвуковой абразивно-жидкостной струи [1-8].

Если обычную воду сжать под давлением от тысячи до шести тысяч атмосфер и пропустить через отверстие диаметром *0,07-0,5* мм, ее скорость достигнет *400-1000* м/с. Сила воздействия такой струи на материал вызывает его механическое разрушение с отрывом микрочастиц. При этом кинетическая энергия струи превращается в механическую работу резания, а

сама струя является бесконечным режущим инструментом с большим количеством режущих кромок. Для увеличения разрушительной силы водяной струи к ней добавляют абразив. Таким образом, использование этого метода позволяет перенести проблемы связанные со стойкостью режущего инструмента, при механической обработке, на второй план.

Технология гидроабразивного резания идеальна для вырезки материалов, которые являются чувствительными к температуре. После резания не наблюдается упрочнения поверхности реза и прижогов. Применение гидроабразивного резания на предприятиях, связанных с резкой опасных материалов типа асбеста и стекловолоконных материалов позволяет существенно устранить или полностью исключить выделение вредных паров и пыли. После резания струей, как правило, не требуется дополнительная механическая обработка. Автоматизация процесса раскроя позволяет экономить материал за счет оптимальной раскладки лекал. [32]

По своим техническим возможностям струя жидкости сравнима с идеальным, неизнашивающимся иглообразным инструментом, позволяющим производить обработку сложных контуров с минимальными радиусами закругления (*0,3-0,4 мм* для внутренних контуров). В связи с малой шириной реза (до *2 мм*), отход материала в стружку уменьшается по сравнению с традиционными методами обработки. Струя не изменяет физико-механические свойства обрабатываемого материала. При гидроабразивном резании струя пропускается через твердосплавную фокусирующую трубку малого диаметра (*от 0,6 мм*), причем благодаря инжекции на входе в нее подсасывается абразивный порошок. Кинетическая энергия водяной струи передается частицам абразива, которые снимают микростружку. При этом практически полностью отсутствует тепловое и силовое воздействие на заготовку, получается недеформированная поверхность реза без заусенцев и искажений структуры материала [32]. Установки гидроабразивной резки выпускают около 20-ти стран мира (Швеция («Water Jet Sweden AB», «ESAB Welding & Cutting Productions»),

США(«OMAX», «Flow International Corporation»), Германия («Trumpf», «Schneidsysteme», «Trenntec»), Чехия («PTV»), Швейцария («Bystronic Laser AG»), Китай («Shenyang Head Science & Technology corporation», «HEAD»), Австрия («STM»), Россия (ОАО "Вектор", ЗАО "Лазерные комплексы", ОАО "Туламашзавод", ОАО ЭНИМС), Италия («Waterjet Corporation»), Франция («Digital Control») и др. Комплексы ГАР имеют различные компоновочные решения, программное обеспечение и технологические возможности, которые определяются конструктивными особенностями основных узлов и агрегатов установки.

К основным узлам установок гидроабразивной резки относятся: насос и трубопроводы высокого давления, клапан высокого давления и режущая головка, ванна и стол обработки с опорным настилом, устройства дозирования и подачи абразивного материала, терминал управления (ЧПУ), приводы перемещения режущей головки.

Насос высокого давления (НВД), сжимая воду, наделяет ее функциями режущего инструмента. В настоящее время большинство установок ГАР оснащено НВД, обеспечивающим рабочее давление 320-420 МПа. Однако, существуют производители («Bystronic Laser AG»), выпускающие установки с диапазоном рабочего давления до 600 МПа.

После НВД сжатая вода по трубопроводу поступает в режущую головку, где, проходя через водное сопло (сапфир) с диаметром 0,07-0,5 мм приобретает сверхзвуковую скорость. Для усиления режущей способности струи к ней подмешивается абразив.

Гашение струи после резки обрабатываемого материала осуществляется в ванне, наполненной водой. В процессе обработки материал располагается на опорном настиле, представляющим собой, как правило, систему решеток.

Для расширения технологических возможностей гидрорежущего оборудования ведущие производители предлагают дополнительные опции: оснащение режущими головками, позволяющими производить трехмерную

обработку, оснащение приспособлениями для обеспечения возможности резки труб и прутков, оснащение дополнительными режущими головками, позволяющими производить параллельную обработку нескольких деталей, оснащение сверлильной головкой, позволяющей производить предварительное сверление отверстий под заход струи и др.

Усложняя конструкцию оборудования, данные опции снижают его надежность и значительно увеличивают не только стоимость оборудования (до 50-60%), но и затраты на его эксплуатацию. Поэтому при выборе типа установки и дополнительного оснащения необходимо исходить из конкретных условий и задач производства.

Существенное преимущество метода гидроабразивного резания состоит в том, что на первой заготовительной операции имеется возможность получения практически готовой детали, значительно сократив маршрут обработки детали (в среднем в 4…5 раз) (рисунок 1.16).

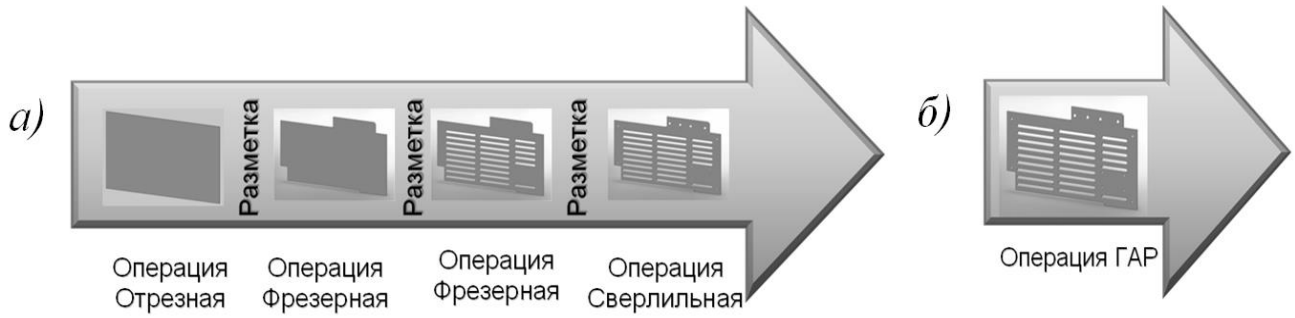


Рисунок 1.16 - Маршрут изготовления детали «Панель»: а) методами механической обработки; б) методом ГАР

Таким образом, промышленное применение метода гидроабразивной резки для обработки листовых стеклотекстолитов дает возможность [113]:

- устранить недостатки обработки механическими методами;
- изготавливать детали с точностью *IT12…14* и степенью шероховатости R_a*3,2…6,3* мкм;
- легко производить обработку заготовок фигурного профиля;

- значительно снизить отход материала вследствие рационального раскроя;
- производить обработку на рабочем месте с лучшей экологией;
- достигнуть существенного, в среднем в 4…5 раз, снижения трудоемкости изготовления деталей.

Как правило, траектория движения режущей головки при обработке любого контура методом ГАР состоит из трех стадий (рисунок 1.17):

1. Сквозная прошивка материала («пирсинг») - необходима для обеспечения сквозного резания обрабатываемого материала. Прошивка осуществляется путем выдержки гидроабразивной головки в неподвижном состоянии в течение некоторого времени. Время прошивки выбирается в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала (твердости, прочности) и его толщины, а также технологических параметров процесса обработки (давление при прошивке, диаметр фокусирующей трубки и др.).

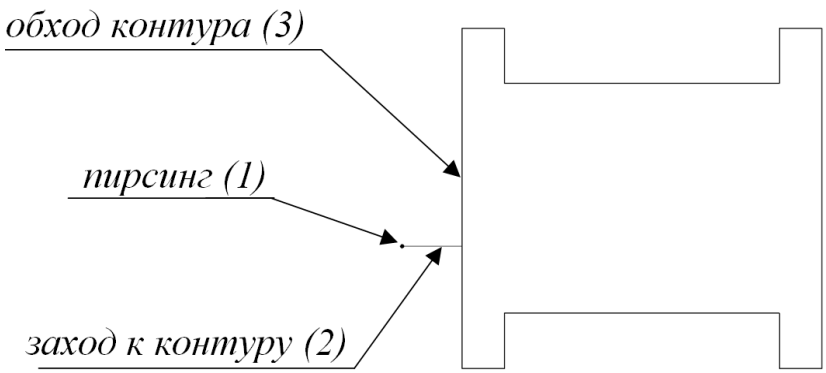


Рисунок 1.17 - Траектория движения режущей головки при обработке детали методом ГАР

2. Заход струи к обрабатываемому контуру – необходим для предотвращения возникновения зарезов на контуре от пирсинга.

3. Непосредственно обход (резание) контура. Направление обхода контура (по часовой стрелке или против часовой стрелки) выбирается технологом в зависимости от расположения устройств для закрепления

листовой заготовки на столе установки ГАР и должно обеспечивать жесткость положения листовой заготовки в процессе обработки.

Эксперименты по резке деталей из стеклотекстолитов выявили проблему образования в материале расслоений величиной до 70…80 мм (рисунок 1.18) во время пирсинга.

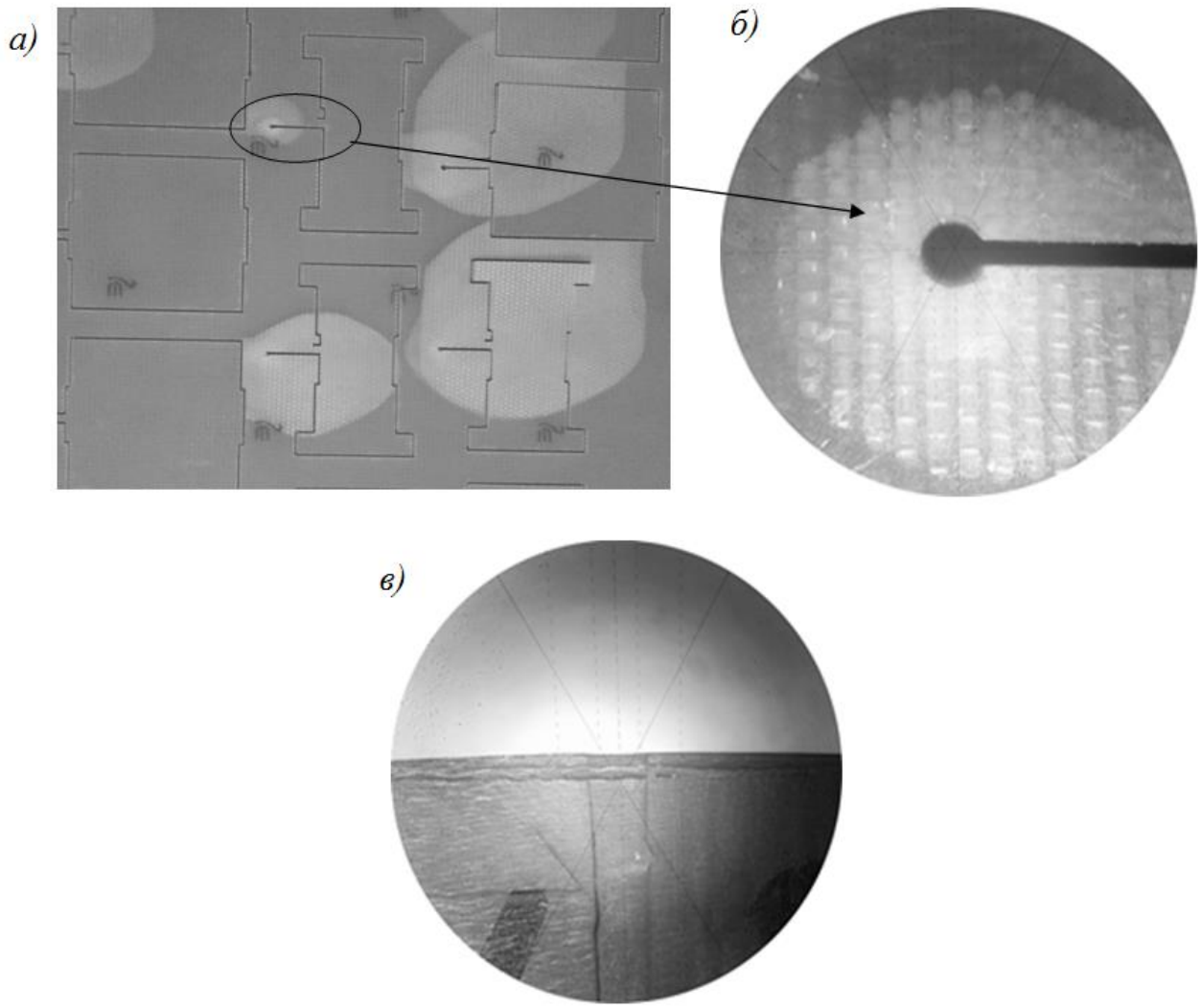


Рисунок 1.18 - Расслоения, образующиеся во время прошивки стеклотекстолита СТЭФ: а) общий вид в раскрое деталей; б) расслоение вид сверху (увеличено); в) торец в разрезе (увеличено)

Струя, внедряясь на некоторую глубину, и отражаясь от плоскости воздействия, не имея свободного выхода, оказывает значительное гидродинамическое давление на боковые стенки реза, частично разрушает их

и под действием гидроклина проникает по микротрещинам и микродефектам между слоями наполнителя, расслаивая материал и образуя вздутия.

После прошивки при дальнейшем резании струя имеет свободный выход. Она отрывает мельчайшие частицы с боковых поверхностей материала за счет сверхзвуковой скорости и кинетической энергии периферийной части своего полупериметра, обращенного в сторону материала. При этом струя не изменяет своего первоначального направления движения и не создает мощных гидравлических давлений, направленных перпендикулярно к обрабатываемой поверхности реза [9], и в материале не образуются расслоения.

Наблюдалось, что изменение технологических параметров прошивки (например: давление, диаметр фокусирующей трубки, размер абразивного зерна и др.) влияют на величину расслоения материала.

Также обнаружено, что при обработке материала одинаковых марок из разных партий поставки, расслоения различной величины образовывались на одних листовых заготовках и отсутствовали на других при одинаковых режимах прошивки. Обработка деталей из стеклотекстолитов становилась малоэффективной, вследствие получения большого процента бракованных деталей по причине их расслоения (до 50%).

Отмеченную нестабильность качества обработки вырезаемых деталей из листовых стеклотекстолитов методом гидроабразивного резания можно объяснить неоднородностью свойств этих материалов: наличием в нем микротрещин и микродефектов, полученных в процессе изготовления, транспортировки и хранения. Образование микродефектов в стеклопластиках при их изготовлении связано с неполной обволакиваемостью смолой отдельных участков стеклонаполнителя, а также с усадкой смолы при отверждении. В работе [83] также отмечалось, что при формовании полимерных композиционных материалов на границе распределения фаз («наполнитель» - «связующее») образуются остаточные напряжения в пограничных слоях, которые имеют существенное влияние на фактическую

прочность и физико-механические свойства композита.

В работах [55,84] упоминалось, что механические показатели стеклопластиков могут значительно изменяться под воздействием внешних факторов (температура, условия хранения).

Исходя из сказанного, одним из важных аспектов использования метода гидроабразивного резания для обработки стеклотекстолитов является определение состояния качества материала на момент его обработки. Этого можно достигнуть диагностированием материала непосредственно перед его обработкой.

Таким образом, совокупность свойств материала, определяющих его физико-механические свойства на момент его обработки, наряду с технологическими параметрами гидроабразивного резания при прошивке, оказывают непосредственное влияние на появление и величину расслоения материала.

Для принятия решения о возможности обработки деталей, имеющих внутренние элементы (отверстия, пазы и окна), необходимо знать размер возможного расслоения материала, так как, если при обработке наружного контура можно избежать проникновения расслоения на деталь путем увеличения расстояния между точкой прошивки и обрабатываемым контуром детали, то при обработке внутреннего контура мы ограничены его размерами (рисунок 1.19).

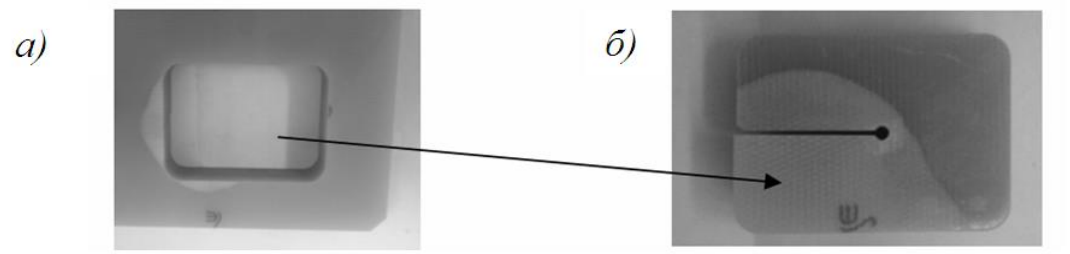


Рисунок 1.19 - Распространение расслоения в тело детали при обработке внутреннего контура: а) элемент детали; б) отход

Исходя из вышесказанного, можно отметить, что на качество обработки деталей из стеклотекстолитов методом гидроабразивного резания

влияет множество факторов, которые необходимо выявить и определить степень их влияния на образование расслоений и их величину. Так как основной проблемой использования данного высокоэффективного метода при обработке стеклотекстолитов является возникновение расслоений в листовом материале во время его прошивки абразивно-жидкостной струей, то за основной критерий качества обработки принимается отсутствие расслоений на поверхности готовой детали.

Для промышленного освоения метода гидроабразивного резания листовых стеклотекстолитов необходимо разработать методику, позволяющую специалисту-технологу не только назначить параметры прошивки материала, но и прогнозировать максимальную величину возможного расслоения обрабатываемой партии материала. Прогнозирование максимальной величины расслоения необходимо для составления оптимального раскроя листового материала, а также оценки возможности обработки внутренних поверхностей детали (рисунок 1.20).

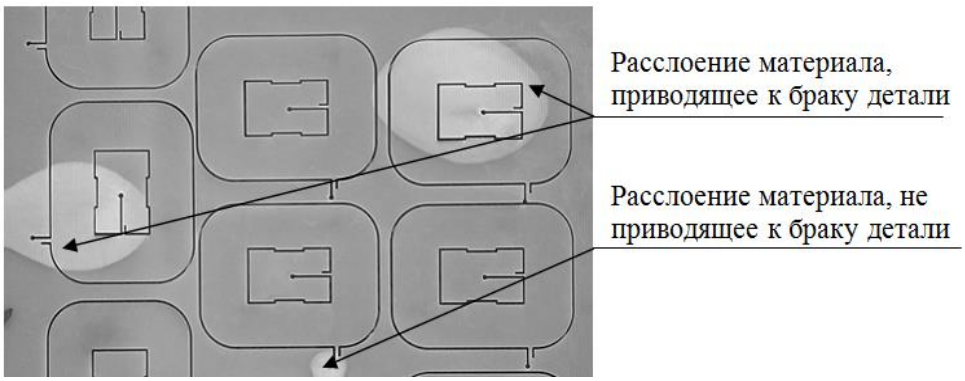


Рисунок 1.20 - Расслоения в образце стеклотекстолита СТЭФ-I 1с при прошивке с давлением струи 80 МПа

1.7 Обзор исследований разрушения твердых материалов жидкостными струями высокого давления

Разрушение различных твердых материалов струями жидкости высокого давления является сложным гидродинамическим процессом, который в настоящее время изучен недостаточно глубоко. Нет общей модели

разрушения, мало изучена природа разрушения изотропных, а, тем более, анизотропных материалов, к которым относятся стеклотекстолиты.

Анализ состояния проблемы гидроразрушения материалов указывает на существование различных теорий их разрушения струями жидкости.

Одной из первых попыток установления возможности использовать сверхзвуковую струю жидкости для резания полимерных материалов была работа Р.А. Тихомирова [1], в которой проведены исследования технологии гидрорезания с научным обоснованием данного процесса. Была проведена серия опытов по выявлению разрушающей способности гидравлических струй при воздействии на различные по свойствам и строению листовые полимеры, такие как винипласт ВН, гетинакс В, стеклотекстолит СВАМ-ЭФ и др. Р.А. Тихомировым были получены эмпирические зависимости для определения величин максимальных значений силы воздействия струи $P_{\max}$ от параметров ее истечения:

$$P_{\max} = 12,6 p^{1,15} d_c^{1,75} , \qquad (1.9)$$

где p – давление истечения струи, МПа;

d_c - диаметр сопла, мм.

Н. Ф. Цяпко [90] предположил, что при обработке сверхзвуковой струей в некоторый промежуток времени воздействие капли воды на обрабатываемый материал можно рассматривать как воздействие одного твердого тела на другое. Цяпко заключил, что для обеспечения резания материала сверхзвуковой струей в нем нужно создать такой уровень напряжений, который превышает уровень критических напряжений растяжения или сдвига для обрабатываемого материала.

Поскольку частицы абразива в сверхзвуковой струе, упруго-пластично сталкиваясь, хаотично влияют на траекторию своего взаимного движения, смоделировать процесс течения струи достаточно сложно. В работах [91-92] P. Roth и J. Wang разработали модели поведения струи, в основе которых лежит теория жидкостной механики.

N.S. Guo [93], проанализировав поверхности, обработанные струями высокого давления стальных, керамических, алюминиевый, а также титановых образцов выяснил, что при воздействии струи обрабатываемый материал разрушается не только в направлении подачи струи, но и перпендикулярно данному направлению.

В трудах [94,95] В. И. Геронтьева и А. М. Журавского представлена модель напрядено-деформированного состояния материала от действия на него сверхзвуковой струи. Описано строение сверхзвуковой струи и распределение скоростей движения частиц в каждой из ее частей при движении.

В работе [94] В. И. Геронтьева была выдвинута теория о возникновении трещин, образующихся в материале от воздействия растягивающих напряжений. Эти напряжения вызваны сжатием материала при первоначальном воздействии струи на обрабатываемый материал. В дальнейшем происходит разрушение материала.

А.М. Журавский [95] предположил, что для обеспечения возможности разрушения материала в конкретной точке нужно создать скалывающее напряжение, величина которого должна быть выше величины предела упругости обрабатываемого материала:

$$p_0\left[0{,}5-\nu+0{,}315(1+\nu)^{\frac{3}{2}}\right]\rangle 2\tau_c, \qquad (1.10)$$

где p_0 – давление на контактной площади, МПа;

ν - коэффициент Пуассона;

τ_c - предел упругости материала на скалывание, МПа.

Процесс разрушения материала сверхзвуковой струей А.М. Журавский делит на две стадии: первоначальную - ударную (начальный момент воздействия струи на материал) и последующую - статическую. В каждой из стадии определены условия разрушения материала.

В. Г. Лабазин в научной работе [96], используя решение контактной задачи о воздействии твердого тела на упругую среду, показал, что

распределение возникающих в материале касательных напряжений приближено к параболоиду вращения (рисунок 1.21). При этом анизотропия свойств материала не имеет значительного влияния на их величину.

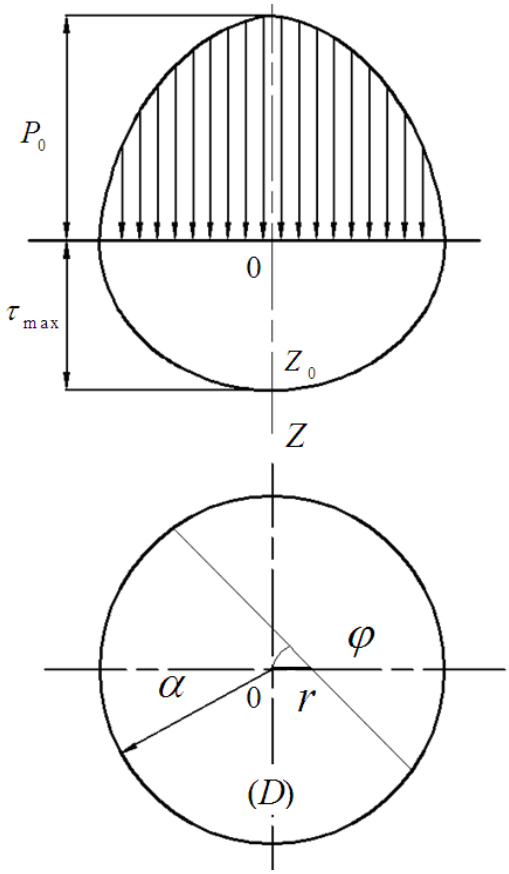


Рисунок 1.21 - Распределение касательных напряжений в материале от воздействия сверхзвуковой струи

Г.Д. Гарбуз [97] при рассмотрении действия струи на твердое тело применил решение задачи напряженно-деформированного состояния полупространства от действии сосредоточенной силы (решение Буссинеска). Автором были получены выражения для расчета напряжений, возникающих в материале от воздействия на него струи с силой P:

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi}\left\{(1-2\nu)\left[\frac{1}{r}-\frac{z}{r^2}\left(r^2+z^2\right)^{-\frac{1}{2}}\right]-3r^2z\left(r^2+z^2\right)^{-\frac{1}{2}}\right\}, \qquad (1.11)$$

$$\sigma_z = -\frac{3P}{2\pi}z^2\left(r^2+z^2\right)^{-\frac{5}{2}}, \qquad (1.12)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi}(1-2\nu)\left[-\frac{1}{r^2}+\frac{z}{r^2}\left(r^2+z^2\right)^{-\frac{1}{2}}+z\left(r^2+z^2\right)^{-\frac{3}{2}}\right], \quad (1.13)$$

$$\tau_{r_2} = -\frac{3P}{2\pi} r z^2 \left(r^2+z^2\right)^{-\frac{5}{2}} \quad , \quad (1.14)$$

где r, z, θ-цилиндрические координаты рассматриваемой точки полупространства;

σ_r, σ_z, σ_r ,τ_{r_2} - компоненты напряжений в цилиндрических координатах.

В работе [98] авторы выдвинули теорию, согласно которой при ударном воздействии сверхзвуковой струи в области резания постоянно образуются напряжения, вызывающие в материале образование клиновидных трещин в различных направлениях. Проникая в эти трещины, жидкость создает высокие мгновенные давления, способствуя тем самым интенсивному разрушению материала.

В работе Д.В. Кравченко [18] рассмотрены основные механизмы разрушения материала в зоне обработки, а также вопросы получения отверстий в различных материалах сверхзвуковой струей.

В работе [44] D. Arola и M. Ramulu выяснили, что, в связи с потерями энергии струи на резание верхних слоев материала, при увеличении глубины резания интенсивность и скорость разрушения материала снижаются. Поэтому при обработке хрупких материалов сверхскоростной струей трещинообразование в глубинных слоях материала снижается по сравнению с верхними его слоями.

Резанию слоистых композиционных материалов сверхзвуковыми струями жидкости посвящены работы зарубежных ученых W. Koening, Ch. Wulf , P.Grass, H. Willersheild [86], M. Hashish [87,88], H. Ho-Cheng [89], P. D. Unde, M. D. Gayakwad, N. G. Patil, R. S. Pawade, D. G. Thakur, P. K. Brahmankar [19], F. Cénac [20], D.K. Shanmugam, T. Nguyen, J.Wang [23], H.-T.Liu [43] и др.

В работе [86] W. Koenig и др. экспериментально исследовали влияние технологических параметров, толщины и физико-механических свойств

обрабатываемого материала при «пирсинге» на возникновение в нем расслоений, основной причиной появления которых названо явление отрыва нижних слоев материала под действием струи.

В работе [87] M. Hashish, исследуя появление расслоений при «пирсинге» листовых слоистых композитов, определил, что основными факторами, влияющими на их возникновение являются: давление и диаметр струи. При обработке слоистого углепластика толщиной 6,3 мм наблюдалось возникновение расслоений при давлении струи 345 МПа. При давлении струи 241 МПа расслоение отсутствовало. Также для предотвращения расслоений, образующихся на выходе струи из материала предложено использование поддерживающих опор, повышающих жесткость обрабатываемого материала.

В работе [89] получена эмпирическая зависимость рекомендуемой величины давления водной струи при «пирсинге» слоистых углепластиков P:

$$P = \sqrt{\frac{8EG_{IC}}{3R^4(1-\nu^2)}} \cdot h^{\frac{3}{2}}, \qquad (1.15)$$

где E – модуль Юнга, Па;

R – радиус струи, мм;

G_{IC} - скорость деформации материала, мм/мин;

h – расстояние от нижней кромки поверхности материала до полости расслоения (величина несрезанного слоя), мм (рисунок 1.22).

В области гидроабразивного резания углепластиков следует отметить работу индийских ученых Prasad D. Unde, M. D. Gayakwad, N. G. Patil, R. S. Pawade, D. G. Thakur, P. K. Brahmankar [19]. В работе исследовано влияние давления истечения струи, подачи, расстояния от обрабатываемой поверхности до фокусирующей трубки и ориентации волокна углепластиков на объем удаления материала в единицу времени, конусность и шероховатость обработанной поверхности, а также величину расслоения материала в области, прилегающей к зоне резания.

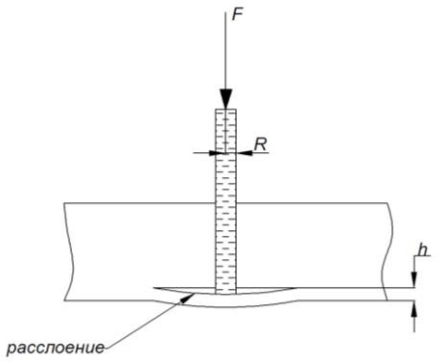


Рисунок 1.22 - Схема для расчета давления водной струи при «пирсинге» слоистых углепластиков

В работе [19] получена математическая модель, позволяющая рассчитать величину расслоений углепластиков в верхних и нижних слоях, образующихся при резании гидроабразивной струей в зависимости от подачи струи и ориентации волокна:

$$H_в = 1,41 + 0,0261S + 0,000443\alpha^2, \quad (1.16)$$

$$H_н = 0,58 + 0,0538S - 0,000814S\alpha, \quad (1.17)$$

где $H_в$ и $H_н$ – величина расслоения материала в верхней и нижней областях соответственно, мм;

S – подача гидроабразивной струи, мм/мин;

α – ориентация (угол) волокон в углепластике, °.

Определено [19], что на величину расслоения углепластиков при резании существенно влияет расстояние от фокусирующей трубки до обрабатываемой поверхности l (рисунок 1.23) (относительное расслоение – отношение величины максимального расслоения к величине ширины реза).

Выяснено [19] что величина расслоения материала неодинакова по его толщине и в верхних слоях это значение больше, чем в нижних (рисунок 1.24 *а* , *б*).

В работе [20] F. Cénac и соавторы исследовали влияние основных технологических параметров (давления, подачи, расхода абразива и диаметров отверстий водного сопла и фокусирующей трубки) на величину

расслоения композиционных материалов при гидроабразивном фрезеровании (несквозной обработке материала гидроабразивной струей).

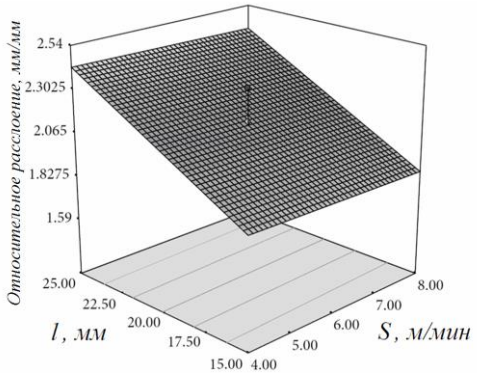


Рисунок 1.23 – Зависимость величины относительного расслоения верхней части углепластика при гидроабразивном резании от величины подачи струи *S* и расстояния от фокусирующей трубки до обрабатываемой поверхности *l*

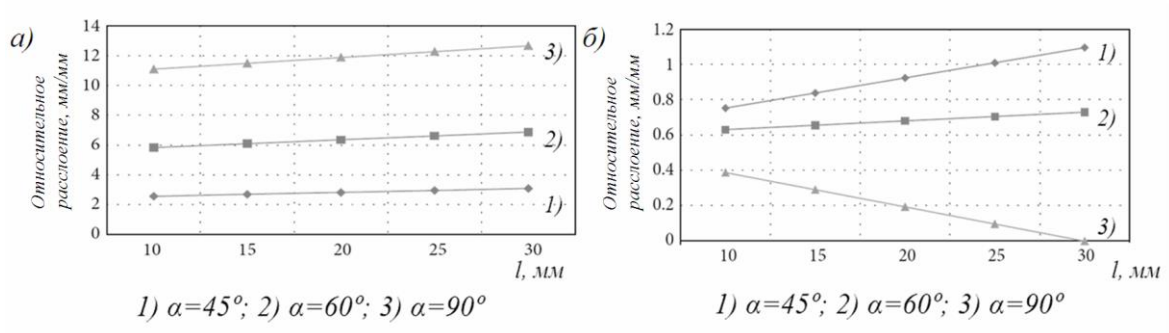


Рисунок 1.24 – Зависимость относительного расслоения при гидроабразивном резании углепластиков с различной ориентацией волокон от расстояния от фокусирующей трубки до обрабатываемой поверхности *l*: *а)* в верхних слоях материала; *б)* в нижних слоях материала

Получены зависимости [20] влияния данных факторов на вероятность расслоения композитов при фрезерной обработке струей (рисунок 1.25). Отмечено, что на величину расслоения материала при гидроабразивном фрезеровании наиболее существенно влияют давление струи, диаметр отверстия водного сопла и расход абразива. Авторы объясняют данную зависимость тем, что совокупность вышеперечисленных факторов характеризует мощность воздействия струи на обрабатываемый материал.

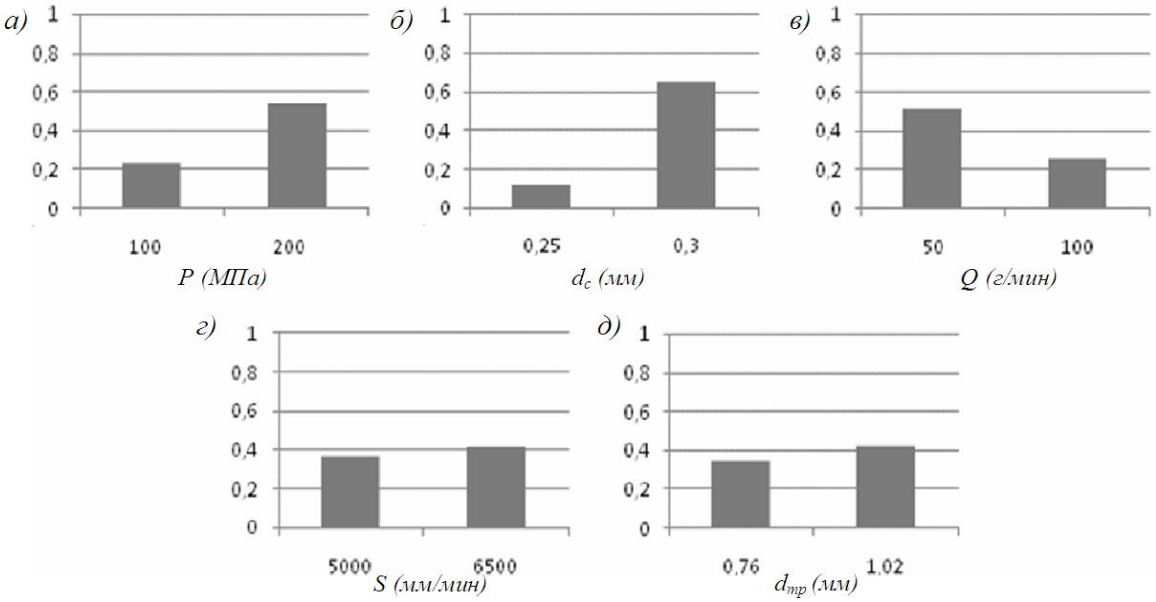


Рисунок 1.25 - Диаграммы влияния основных технологических параметров гидроабразивного фрезерования на вероятность расслоения: *а)* давления струи; *б)* диаметра отверстия водного сопла; *в)* расхода абразива; *г)* подачи; *д)* диаметра отверстия фокусирующей трубки

В работе [23] D.K. Shanmugam, T. Nguyen и J.Wang определили зависимость размера трещины, образующейся при гидроабразивной обработке углепластиков, от параметров резания и механических свойств обрабатываемого материала:

$$\frac{C}{d_j} = 3{,}8 \times 10^{-3} \left(\frac{E^* d_j^2}{V_t m_c} \right)^{-0{,}102} \left(\frac{P}{\rho_w} \frac{m_s^2}{d_j^4 E^{*2}} \right)^{-0{,}520}, \qquad (1.18)$$

где C- максимальная длина трещины, обрабатываемого углепластика, мм;

d_j - диаметр струи, мм;

E^* - модуль Юнга обрабатываемого углепластика, Па;

V_t - подача, мм/мин;

m_c - расход струи в единицу времени, г/мин;

P - давление струи, Па.

Теории механики ударного воздействия твердых частиц на твердую преграду посвящено множество работ. Выявлен характер влияния основных физико-механических свойств материала на устойчивость к ударному

разрушению. Математических моделей, позволяющих количественно оценить уровень критических напряжений, приводящих к разрушению материала, в зависимости от свойств материала недостаточно. Для их получения необходимо проведение экспериментальных исследований с использованием современного программного обеспечения, в котором используются фундаментальные модели разрушения различных материалов.

В направлении повышения эффективности обработки полимерных материалов струями жидкости необходимо отметить работы в области изменения характеристик струи.

Исследования [43] доказали эффективность использования нагретых (до ~190Cº) абразивно-жидкостных струй для обработки материалов, склонных к расслоению при пирсинге. При выходе из фокусирующей трубки часть воды осуществляет фазовый переход в газообразное состояние. Благодаря этому «смягчается» процесс проникновения струи в обрабатываемый материал.

В работе [85] Бурнашов М.А. предложил обрабатывать листовые неметаллические материалы (ЛНМ) охлажденной струей воды, насыщенной частицами льда. Применение данной технологии позволяет повысить эффективность обработки ЛНМ по сравнению с гидроструйной технологией за счет эрозионного воздействия частичек льда, и производить обработку материалов для изделий, в которых недопустимо применение метода ГАР (изделия пищевой промышленности, медицины и др.).

Тем не менее, при большом количестве работ, посвященным гидроабразивному резанию, проблемам появления расслоений при прошивке слоистых стеклопластиков, стеклотекстолитам в частности, не уделялось должного внимания. Отсутствуют практически применимые рекомендации и расчетные модели по выбору режимов прошивки данных материалов, позволяющие исключить возникновение расслоений. В связи с этим, важное значение приобретают исследования, проводимые в направлении разработки теории разрушения слоистых стеклопластиков струями жидкости.

1.8 Выводы, постановка цели и задач исследования

1. Применение метода ГАР для обработки деталей из листовых стеклотекстолитов позволяет повысить производительность их обработки, обеспечить возможность получения деталей сложной конфигурации из листовой заготовки на одной операции с высокими показателями точности и качества обрабатываемых поверхностей, увеличить коэффициент использования материала за счет рационального раскроя, а также улучшить экологию рабочего места, устранив вредные факторы, влияющие на здоровье рабочих.

2. Основной проблемой при гидроабразивной обработке листовых стеклотекстолитов является возникновение расслоений размером до 80 мм, при их прошивке абразивно-жидкостной струей. Величина расслоения материала зависит не только от режимов его прошивки струей, но и от физико-механических свойств и состояния материала (наличие и величина микропор, микротрещин и внутренних напряжений, имеющихся в материале при его изготовлении и приобретенных им в процессе транспортировки и хранения) на момент его обработки. Решить данную проблему поможет разработка методики, позволяющей специалисту-технологу назначить технологические параметры прошивки материала, а также учесть влияние микродефектов структуры материала на его расслаиваемость.

3. В направлении увеличения производительности и обеспечения качества резания материалов сверхзвуковой струей жидкости следует отметить работы Р.А. Тихомирова, Е.Н Петухова, Д.В. Кравченко, А.Л. Галиновского, Г.В. Барсукова, М.А. Бурнашова, Р.Г. Мирзоева, W. Koening, M. Hashish, H. Ho-Cheng, P. D. Unde, M. D. Gayakwad, N. G. Patil, R. S. Pawade, D. G. Thakur, P. K. Brahmankar, F. Cénac, M. Déléris, F. Collombet, R. Zitoune J. Zeng, P. Tambe, M. Shukla, D.K. Shanmugam, T. Nguyen, J. Wang. Однако, при большом количестве работ, посвященным гидроабразивному резанию, проблемам появления расслоений при прошивке стеклотекстолитов

не уделялось должного внимания. Отсутствуют практически применимые рекомендации и расчетные модели по выбору режимов прошивки данных материалов, позволяющие исключить возникновение расслоений.

Цель работы: обеспечить отсутствие расслоений на поверхности готовых деталей из стеклотекстолитов при гидроабразивном резании на основе научно-обоснованного выбора режимов прошивки и траектории движения сопла.

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

1. Теоретически изучить и провести анализ факторов, влияющих на величину расслоения при прошивке листовых стеклотекстолитов методом гидроабразивного резания.

2. Установить функциональные зависимости образования расслоений в листовых стеклотекстолитах при прошивке от технологических режимов посредством моделирования его разрушения под действием гидроабразивной струи.

3. Экспериментально определить влияние режимов прошивки и основных технологических параметров на возникновение и величину расслоения листовых стеклотекстолитов.

4. Разработать критерий обрабатываемости листовых стеклотекстолитов методом гидроабразивного резания по значению величины расслоения материала при прошивке.

5. Разработать и промышленно апробировать технологические рекомендации по резке листовых стеклотекстолитов методом ГАР, обеспечивающие отсутствие расслоений на поверхности готовой детали.

Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА РАССЛОЕНИЯ В СТЕКЛОТЕКСТОЛИТАХ ПРИ ПРОНИКАНИИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ

2.1 Физическая модель разрушения стеклотекстолитов под действием гидроабразивной струи

Процесс гидроабразивного разрушения материалов – сложный процесс, состоящий из целого ряда не достаточно изученных явлений. Причиной тому является сложность контроля и измерения основных параметров воздействия гидроабразивной струи на материал. Ученые и инженеры, занимающиеся изучением процессов разрушения материалов гидроабразивными струями, предлагают модели, описывающие различные процессы, происходящие при гидроабразивной обработке. Исследовательские работы по этому поводу посвящаются как процессу в целом, так и некоторым отдельным специфическим явлениям. Изучив работы по гидроабразивной обработке, можно сделать вывод: большинство ученых сходятся во мнении, что природой разрушения материалов является эрозия [9,18, 100].

Стеклотекстолиты относятся к хрупким или недостаточно пластичным материалам. Они состоят из многочисленных слоев стекловолокнистого наполнителя и связующего вещества. Такое строение обуславливает сложность описания механизма разрушения данных материалов, связанного с анизотропией и неоднородностью их структуры.

Эта группа материалов практически не обладает сопротивлением ударным нагрузкам, поэтому при воздействии высокоскоростной струи с абразивными частицами происходит «выкрашивание» материала, образование сколов и трещин, что характерно для явления хрупкой эрозии.

Трещины могут быть кольцевого и конического типов, радиальные, боковые и средние (рисунок 2.1) [100]. Изучение природы и механизма

разрушения хрупких материалов, а также причины возникновения тех или иных видов трещин были описаны в работах [100-105].

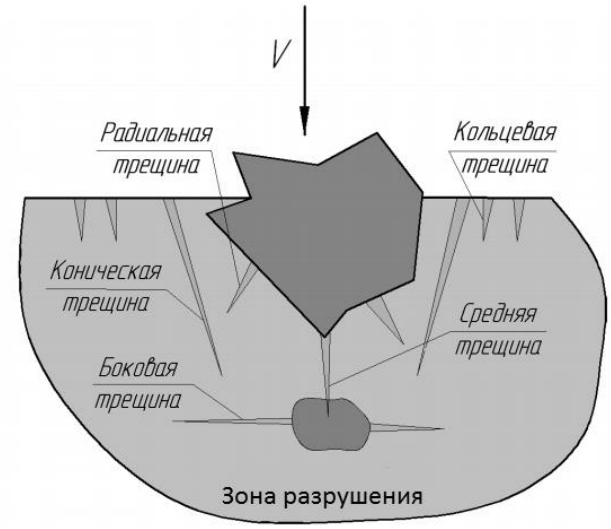


Рисунок 2.1 - Схема воздействия частицы абразива и материала при хрупкой эрозии с образование трещин различного вида

Хрупкому разрушению материала также способствуют дефекты (включения, поры или микротрещины), имеющиеся в стеклотекстолитах в исходном состоянии.

Разрушение материала будет сопровождаться не только деформациями и распространением волн напряжений, но и прониканием жидкости в межслойные зоны «наполнитель-связующее» вследствие поперечного растекания в момент касания с преградой.

Стеклотекстолит представляет собой многослойную структуру с внутренними степенями свободы между слоями, поскольку связующее вещество, термореактивные и термопластичные полимеры, дает возможность смещения слоев, как в направлении проникания гидроабразивной струи, так и в плоскости материала.

Вследствие небольшой толщины стекловолокнистого слоя (0,1… 0,4мм) деформации подвергается не только единичный слой материала, но и нижележащие слои, расположенные непосредственно под радиально расширяющимся пятном контакта от воздействия струи. Многослойная

преграда при этом испытывает в данных слоях определенные напряжения.

При контактном взаимодействии струи с многослойной преградой происходит перемещение тонких слоев материала преграды в результате сжатия. Боковые поверхности углубления подвергаются растяжению, но до момента образования трещин происходит относительное смещение слоев материала в результате изгиба.

В верхней части зоны деформации (со стороны струи жидкости) происходит сжатие слоев в продольном направлении и растяжение в поперечном. В нижней части зоны деформации происходит растяжение слоев в продольном направлении и сжатие в поперечном. Между слоями, подвергающимися сжатию и растяжению, расположен нейтральный слой. На уровне нейтрального слоя происходит относительное смещение слоев стеклотекстолита и разрушение соединения.

После этого в материале происходит образование боковых трещин, а затем унос материала. На поверхность разрушения начинает воздействовать поперечно-растекающаяся жидкость, стремящаяся проникнуть вглубь материала в поперечном направлении к разрушению.

Из-за более низкой прочности связующего вещества по сравнению со склеиваемыми материалами (стекловолокном) образование трещин и последующее расслоение материала происходит именно в связующем веществе. Расслоению стеклотекстолита также способствует наличие небольших поверхностных трещин, являющихся концентраторами напряжений и образующихся в материале при его изготовлении.

Силу воздействия струи на обрабатываемый материал в зависимости от давления и диаметра струи можно определить [115]:

$$S = 120\left(\frac{p}{100}\right)^{1,15} d^{1,75}, \qquad (2.1)$$

где S- сила воздействия струи на обрабатываемый материал, Н;

p – давление струи, МПа;

d – диаметр струи, мм.

Описанную физическую модель разрушения стеклотекстолита от действия гидроабразивной струи подтверждают проведенные экспериментальные исследования. В тех случаях, когда сила воздействия со стороны струи была невысока (давление истечения 70 МПа) изгиб слоев под зоной контакта не сопровождается поперечным смещением слоев и мы не наблюдали расслоений.

При увеличении силы воздействия струи происходит расслоение. Причем не на поверхности, а на глубине 3 - 5 мм, что подтверждает наше предположение о наличии нейтрального слоя, на уровне которого происходит разрыв соединения (рисунок 2.2).

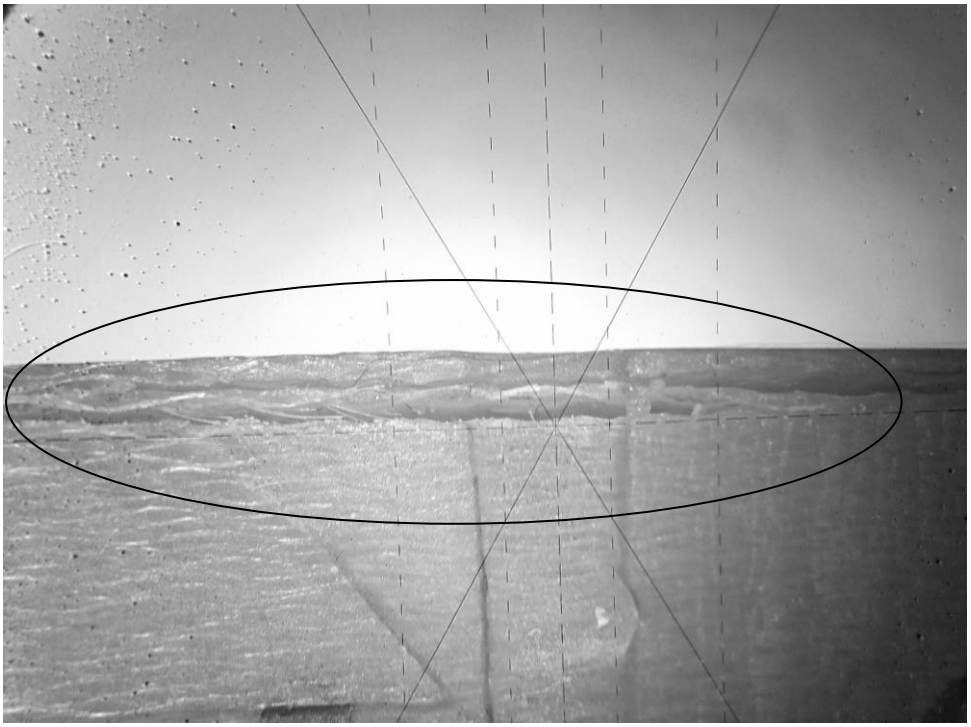


Рисунок 2.2 - Образование расслоений в верхних слоях стеклотекстолита при прошивке

Таким образом, можно выделить следующие стадии разрушения поверхности стеклотекстолита от действия гидроабразивной струи (рисунок 2.3):

1. Начальная стадия взаимодействия – в верхней части зоны деформации (со стороны струи жидкости) происходит сжатие в продольном

направлении слоев и растяжение в поперечном. В нижней части зоны деформации происходит растяжение слоев в продольном направлении и сжатие в поперечном. Между слоями, подвергающимися сжатию и растяжению, расположен нейтральный слой. Слои материала при проникании гидроабразивной струи стремятся не только оторваться друг от друга, но и сдвинуться одна относительно другой (рисунок 2.3.а).

2. Стадия проникания струи в поверхность стеклотекстолита – по границе пятна контакта происходит образование трещин, а затем унос материала (рисунок 2.3.б).

3. Стадия поперечного растекания струи – жидкость растекается в зоне разрушения, на уровне поперечного смещения слоев происходит расслоение (рисунок 2.3.в).

В соответствии с этим, при назначении режимов прошивки стеклотекстолитов с учетом возможного расслоения, на первый план выступает уровень касательных напряжений, который должен быть меньше предельных значений для применяемого материала.

Исходя из такой физической картины разрушения, можно обеспечить получение сквозного отверстия в стеклотекстолите за счет управления давлением истечения струи.

2.2 Анализ напряженно-деформированного состояния стеклотекстолита при проникании гидроабразивной струи под действием сосредоточенной силы

Решение задачи оценки напряженного состояния стеклотекстолита под действием гидроабразивной струи проведем для простейшей точечной нагрузки. Имея решение уравнений теории упругости, соответствующее приложению сосредоточенной силы от гидроабразивной струи, можно с помощью суммирования получить решение для любого распределения сил по объёму, поверхности или линии в стеклотекстолите.

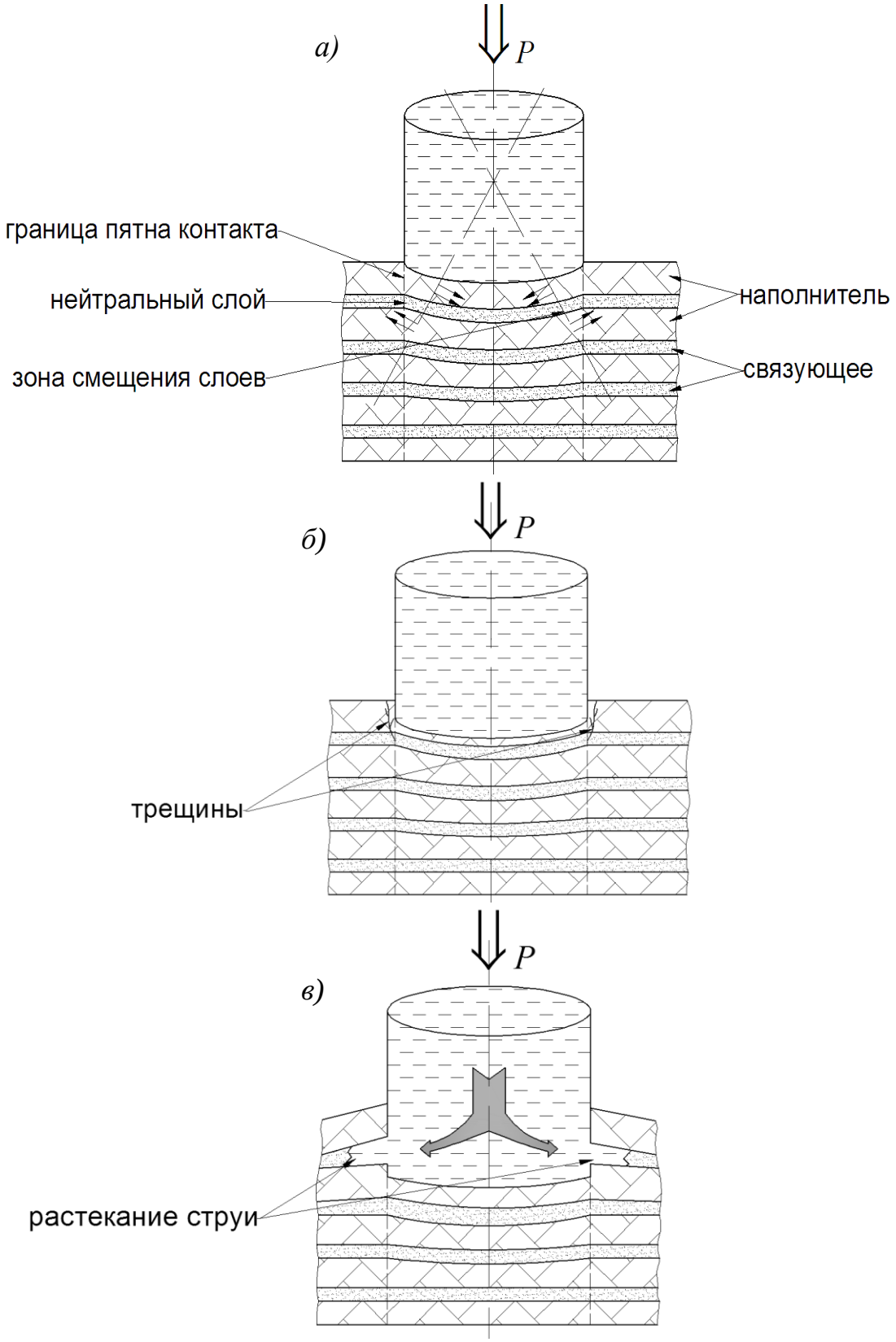


Рисунок 2.3 - Стадии разрушения поверхности стеклотекстолита от действия гидроабразивной струи: а) начальная стадия взаимодействия; б) проникание струи в поверхность материала с образованием трещин; в) стадия поперечного растекания струи

Разместим начало координат точку O в месте приложения сосредоточенной силы Q. Из начала координат проведем радиус-вектор R, задающий положение любой точки упругой среды M (рисунок 2.4):

$$\mathrm{R} = ix + jy + kz\,, \tag{2.2}$$

где x, y, z – декартовы координаты точки M;

i, j, k – орты (единичные векторы направленные по осям) декартовой системы координат.

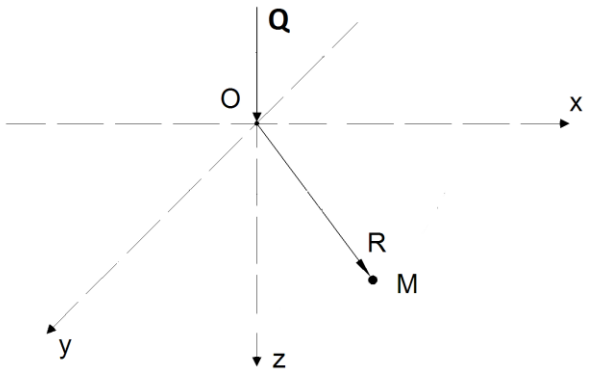


Рисунок 2.4 - Схема к оценке напряженного состояния

Представим, единичный вектор r направления R, в следующем виде:

$$r = \frac{1}{R}\mathrm{R}\,. \tag{2.3}$$

Вектор напряжений t_n некоторой площадке упругой среды

$$t_n = n \cdot T\,, \tag{2.4}$$

где T – тензор напряжений;

n – нормаль к площадке.

Откуда главный вектор V и главный момент M относительно точки приложения сосредоточенной силы:

$$V = \iint_S t_n do\,,$$
$$M = \iint_S R \times t_n do\,. \tag{2.5}$$

Примем, в качестве замкнутой поверхности S сферу радиусом R с центром в начале координат:

$$do = R^2 do^*, \tag{2.6}$$

где do^* - элемент поверхности концентрической сферы.

В качестве решения уравнений теории упругости для нашего случая будем исходить из общего решения в форме П.Ф.Папковича:

$$U = B - \frac{m}{4(m-1)} \operatorname{grad}\left(\mathrm{R} \cdot \mathrm{B} + B_0\right), \tag{2.7}$$

где U - вектор перемещения;

m - число Пуассона;

B - потенциальный вектор;

B_0 - потенциальный скаляр;

$$\Delta B = 0, \tag{2.8}$$

$$\Delta B_0 = div \operatorname{grad} B_0 = 0. \tag{2.9}$$

Решение уравнения (2.7) для случая действия сосредоточенной силы в неограниченной упругой среде получено А.И. Лурье, сводящееся к определению перемещений и напряжений на поверхности сферы [106].

Откуда получим уравнения перемещений материала преграды u под действием сосредоточенной силы Q:

$$\begin{cases} u_x = \dfrac{mQ}{16\pi G\left(m-1\right)} \dfrac{xz}{R^3}, \\ u_y = \dfrac{mQ}{16\pi G\left(m-1\right)} \dfrac{yz}{R^3}, \\ u_y = \dfrac{mQ}{16\pi G\left(m-1\right)} \dfrac{yz}{R^3}, \end{cases} \tag{2.10}$$

где G- модуль сдвига.

По зависимостям (2.10) получим компоненты тензора напряжений (2.11).

В случае действия сосредоточенной силы в полубесконечной упругой среде в работе [106] установлено, что перемещение представляется суммой

четырех слагаемых:

1) перемещений, обусловленных действием главного вектора V;

2) перемещений, создаваемых главным моментом M;

3) перемещений, вызванных наличием центра расширения;

4) перемещений, создаваемых девиаторной частью силового тензора.

Для практических расчетов рекомендуется применять простейшие распределения особенностей, какими являются центр расширения и центр вращения.

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \dfrac{Qz}{8\pi(m-1)R^3}\left(m-2-\dfrac{3mz^2}{R^2}\right), \\ \sigma_{yy} = \dfrac{Qz}{8\pi(m-1)R^3}\left(m-2-\dfrac{3my^2}{R^2}\right), \\ \sigma_{zz} = \dfrac{Qz}{8\pi(m-1)R^3}\left(m-2+\dfrac{3mz^2}{R^2}\right), \\ \sigma_{xy} = \dfrac{3Qmxyz}{8\pi(m-1)R^5}, \\ \sigma_{xz} = \dfrac{Qx}{8\pi(m-1)R^3}\left(m-2+\dfrac{3mz^2}{R^2}\right), \\ \sigma_{yz} = \dfrac{Qy}{8\pi(m-1)R^3}\left(m-2+\dfrac{3mz^2}{R^2}\right). \end{cases} \tag{2.11}$$

Далее рассмотрим распределение двух этих особенностей.

Уравнение расширения линии центров запишем в виде:

$$U = A\,\mathrm{grad}\ln\left(R-\mathrm{R}\cdot e\right), \tag{2.12}$$

где А - постоянный скаляр.

Функция $\ln\left(R-\mathrm{R}\cdot e\right)$ является гармонической. Вектор U является потенциальным, а объёмное расширение равно нулю:

$$divU = 0 \tag{2.13}$$

так как

$$div\,\mathrm{grad}\ln\left(R-\mathrm{R}\cdot e\right) = \Delta\ln\left(R-\mathrm{R}\cdot e\right) = 0. \tag{2.14}$$

Напряжение на площадке с нормалью n определяется вектором:

$$t_n = 2GA\left(n \cdot \mathrm{grad}\right)\mathrm{grad}\ln\left(R - \mathrm{R} \cdot e\right) = 2GA\frac{\partial}{\partial n}\frac{\mathrm{R} - eR}{\left(R - \mathrm{R} \cdot e\right)R}. \qquad (2.15)$$

Продифференцируем выражение (2.15):

$$t_n = 2GA\left[e\frac{R \cdot n - R\left(n \cdot e\right)}{R\left(R - R \cdot e\right)^2} + \frac{n}{R\left(R - R \cdot e\right)} + \mathrm{R}\frac{R^2\left(n \cdot e\right) - 2R\left(\mathrm{R} \cdot n\right) + \left(\mathrm{R} \cdot n\right)\left(\mathrm{R} \cdot e\right)}{R^3\left(R - \mathrm{R} \cdot e\right)^2}\right]. \qquad (2.16)$$

Примем, что линия центра расширения совпадает с отрицательной осью z. С учетом того, что в начале $n = k$, получим:

$$t_z = -2GA\frac{\mathrm{R}}{R^3}. \qquad (2.17)$$

Тогда уравнения для компонентов тензора напряжений примут следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = -2GA\dfrac{x}{R^3}, \\ \sigma_{xy} = -2GA\dfrac{y}{R^3}, \\ \sigma_{zz} = -2GA\dfrac{z}{R^3}. \end{cases} \qquad (2.18)$$

Откуда при $n = i$:

$$t_x = 2GA\left[\frac{i}{R\left(R + z\right)} - \frac{kx}{R\left(R + z\right)^3} - \mathrm{R}\frac{2Rx + xz}{R^3\left(R + z\right)^2}\right]. \qquad (2.19)$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2GA\left[\frac{1}{R\left(R + z\right)} - \frac{x^2\left(2R + z\right)}{R^3\left(R + z\right)^2}\right], \\ \sigma_{xy} &= -2GA\frac{xy\left(2R + z\right)}{R^3\left(R + z\right)^3}. \end{aligned} \qquad (2.20)$$

При $n = j$:

$$\sigma_{yy} = 2GA\left[\frac{1}{R\left(R+z\right)} - \frac{y^2\left(2R+z\right)}{R^3\left(R+z\right)^2}\right]. \tag{2.21}$$

Направив вектор e по отрицательной оси z, перейдем в сферическую систему координат:

$$\begin{aligned} n &= e_R = r, \\ n &= e_\vartheta, \\ n &= e_\varphi. \end{aligned} \tag{2.22}$$

Уравнения для определения компонентов тензора напряжений в сферической системе координат примут следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = -\dfrac{2GA}{R^2}, \\ \sigma_{r\vartheta} = \dfrac{2GA\sin\vartheta}{R^2\left(1+\cos\vartheta\right)}, \\ \sigma_{r\varphi} = 0, \\ \sigma_{\vartheta\vartheta} = \dfrac{2GA\cos\vartheta}{R^2\left(1+\cos\vartheta\right)}, \\ \sigma_{\vartheta\varphi} = 0, \\ \sigma_{\varphi\varphi} = \dfrac{2GA}{R^2\left(1+\cos\vartheta\right)}. \end{cases} \tag{2.23}$$

Решение задачи действия сосредоточенной силы нормальной к граничной плоскости упругого полупространства сведем к некоторой краевой задаче теории потенциала. Необходимо определить одну гармоническую функцию, обладающую всеми характеристическими свойствами потенциала простого слоя, распределённого по плоской области нагружения с плотностью, пропорциональной интенсивности нагрузки.

Совместим плоскость xy с ограничивающей полупространство плоскостью, а ось z, по которой направлена сила S_z, направим внутрь полупространства. Точку O приложения силы примем за начало координат (рисунок 2.5). В сферической системе координат с центром в O угол ϑ на

плоскости xy будет равен $\frac{\pi}{2}$ этой плоскости повсюду, кроме точки O**,** т. е. при $R \neq 0$, должно быть:

$$\begin{cases} \sigma_{\vartheta\vartheta} = 0, \\ \sigma_{r\vartheta} = 0, \\ \sigma_{\vartheta\varphi} = 0. \end{cases} \tag{2.24}$$

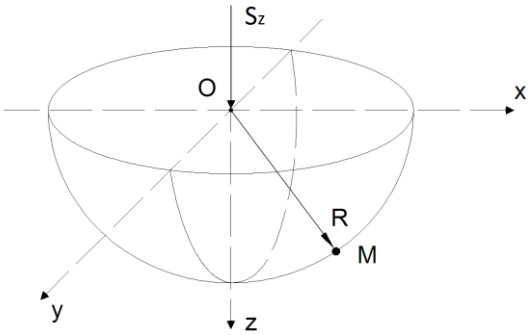


Рисунок 2.5 - Схема к оценке напряженного состояния стеклотекстолита под действием гидроабразивной струи

Первому и третьему условиям удовлетворяют решения (2.23). Можно удовлетворить и второму условию (2.24), если подобрать постоянные A и Q в этих решениях так, чтобы

$$A = -\frac{Q(m-2)}{16\pi G(m-1)}. \tag{2.25}$$

В результате получим новое решение, зависящее от одной постоянной Q и имеющее особенность в точке O**.**

Проверим, соответствует ли эта особенность действию сосредоточенной силы, нормальной к плоскости xy, и подберем постоянную Q так, чтобы величина этой силы имела заданное значение S_z**.**

На поверхности полусферы с центром в O, расположенной в области $z > 0$ по (2.23), (2.24) распределены напряжения:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \dfrac{Q}{8\pi R^2 (m-1)}\left[-(4m-2)\cos\vartheta + (m-2)\right], \\ \sigma_{r\vartheta} = \dfrac{(m-2)Q\sin\vartheta\cos\vartheta}{8\pi R^2 (m-1)(1+\cos\vartheta)}, \\ \sigma_{r\varphi} = 0. \end{cases} \tag{2.26}$$

Пусть M главный момент этой системы напряжений относительно точки O, а V - главный вектор, тогда можно записать:

$$M=0. \tag{2.27}$$

Это выражение удовлетворяется тождественно подставив 2.19 в 2.5 в проекциях на декартовы оси

$$S_z + V = 0. \tag{2.28}$$

Первое условие выполняется:

$$V_x = V_y = 0 \ . \tag{2.29}$$

Данные выражения удовлетворяются тождественно, подставив 2.16 в 2.4 в проекции на оси x и y.

Остается условие, при котором:

$$S_z = -V_z = \iint_{\Sigma} (\sigma_{rr}\cos\vartheta - \sigma_{r\vartheta}\sin\vartheta)do = -R^2 \iint_{\Sigma^*} (\sigma_{rr}\cos\vartheta - \sigma_{r\vartheta}\sin\vartheta)do^*, \tag{2.30}$$

где $do^* = \sin\vartheta d\theta d\vartheta$ - элемент поверхности единичной полусферы.

Откуда:

$$\begin{aligned} S_z &= \frac{Q}{8\pi(m-1)}\int_0^{\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin\vartheta d\vartheta \left[(4m-2)\cos^2\vartheta - (m-2)\cos\vartheta + (m-2)\frac{\sin^2\vartheta\cos\vartheta}{1+\cos\vartheta}\right] = \\ &= \frac{3Qm}{4(m-1)}\int_0^{\pi/2} \sin\vartheta\cos^2\vartheta d\vartheta = \frac{Qm}{4(m-1)} \end{aligned} \ . \tag{2.31}$$

Тогда неизвестные постоянные интегрирования для случая приложения силы нормально к полупространству

$$Q = \frac{4(m-1)S_z}{m}, \tag{2.32}$$

$$A = \frac{(m-2)S_z}{4\pi Gm}. \tag{2.33}$$

Далее по (2.12) получим выражения для определения перемещений:

$$\begin{cases} u_x = \dfrac{S_z x}{4\pi G}\left(\dfrac{z}{R^3} - \dfrac{m-2}{R(R+z)m}\right), \\ u_y = \dfrac{S_z y}{4\pi G}\left(\dfrac{z}{R^3} - \dfrac{m-2}{R(R+z)m}\right), \\ u_z = \dfrac{S_z}{4\pi G}\left(\dfrac{z^2}{R^3} + \dfrac{2(m-2)}{Rm}\right). \end{cases} \tag{2.34}$$

Рассмотрим случай действия сосредоточенной силы в параллельной граничной плоскости *xy*.

Граничные условия для такого типа нагружения примут вид при $z = 0$:

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = \sigma_{xz}^0(x, y), \\ \sigma_{zy} = \sigma_{zy}^0(x, y), \\ \sigma_{zz} = 0. \end{cases} \tag{2.35}$$

Введем в рассмотрение функции φ_1 и φ_2, гармонические в полупространстве $z > 0$ и такие что значения их производных при $z \to 0$ пропорциональны заданным значениям напряжений в точках границы:

$$G\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial z}\right)_{z\to 0} = \begin{cases} \sigma_{xz}^0(x, y) \in \Omega \\ 0 \notin \Omega \end{cases}, \tag{2.36}$$

$$G\left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial z}\right)_{z\to 0} = \begin{cases} \sigma_{yz}^0(x, y) \in \Omega \\ 0 \notin \Omega \end{cases}. \tag{2.37}$$

где Ω - область нагружения плоскости.

Функции (2.36), (2.37) могут быть представлены как потенциалы, с плотностями соответственно равными: $-\dfrac{1}{2\pi G}\sigma_{xz}^0$ и $-\dfrac{1}{2\pi G}\sigma_{yz}^0$.

Таким образом:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\frac{1}{2\pi G}\iint_\Omega \frac{\sigma_{xz}^0(x', y')}{R'} do', \\ \varphi_2 &= -\frac{1}{2\pi G}\iint_\Omega \frac{\sigma_{yz}^0(x', y')}{R'} do'. \end{aligned} \tag{2.38}$$

где $R' = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2}\, do' = dx'dy'$.

Необходимо ввести еще две гармонические функции:

$$\psi_1 = -\frac{1}{2\pi G}\iint_{\Omega} \sigma_{xz}^0\left(x', y'\right)\ln\left(R' + z\right) do',$$
$$\psi_2 = -\frac{1}{2\pi G}\iint_{\Omega} \sigma_{yz}^0\left(x', y'\right)\ln\left(R' + z\right) do'. \quad (2.39)$$

которые, связанны с функциями φ (2.38) соотношениями:

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial z} = \varphi_1$$
$$\frac{\partial \psi_2}{\partial z} = \varphi_2 . \quad (2.40)$$

Рассмотрим теперь гармонический вектор $\Delta u_x^0 \;\; \Delta u_y^0 \;\; \Delta u_z^0$

$$\Delta u_x^0 = 0$$
$$\Delta u_y^0 = 0 . \quad (2.41)$$
$$\Delta u_z^0 = 0$$

Этот вектор представляет частное решение уравнений теории упругости, если выполняется следующее условие:

$$\frac{\partial u_x^0}{\partial x} + \frac{\partial u_y^0}{\partial y} + \frac{\partial u_z^0}{\partial z} = 0. \quad (2.42)$$

Касательные напряжения σ_{xz} и σ_{yz} примут вид:

$$\frac{1}{G}\sigma_{xz} = \frac{\partial u_x^0}{\partial z} + \frac{\partial u_z^0}{\partial x},$$
$$\frac{1}{G}\sigma_{yz} = \frac{\partial u_z^0}{\partial y} + \frac{\partial u_y^0}{\partial z}. \quad (2.43)$$

Учитывая (2.36) и (2.37) запишем граничные условия в виде:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = \frac{\partial u_x^0}{\partial z} + \frac{\partial u_z^0}{\partial x},$$
$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial z} = \frac{\partial u_z^0}{\partial y} + \frac{\partial u_y^0}{\partial z}. \quad (2.44)$$

Можно записать что:

$$u_x^0 = \varphi_1 + \int_z^\infty \frac{\partial u_z^0}{\partial x} dz,$$
$$u_y^0 = \varphi_2 + \int_z^\infty \frac{\partial u_z^0}{\partial y} dz. \tag{2.45}$$

Остается удовлетворить условию (2.42):

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + \int_z^\infty \left(\frac{\partial^2 u_z^0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z^0}{\partial y^2} \right) dz + \frac{\partial u_z^0}{\partial z} = 0, \tag{2.46}$$

или

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} - \int_z^\infty \frac{\partial^2 u_z^0}{\partial z^2} dz + \frac{\partial u_z^0}{\partial z} = 0, \tag{2.47}$$

так как $\frac{\partial u_z^0}{\partial z}$ при $z \to \infty$ стремится к нулю то:

$$\frac{\partial u_z^0}{\partial z} = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \right). \tag{2.48}$$

По (2.40) можно записать:

$$u_z^0 = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \psi_1}{\partial x} + \frac{\partial \psi_2}{\partial y} \right). \tag{2.49}$$

Принимая во внимание (2.45) и (2.49) запишем:

$$\begin{cases} u_x^0 = \varphi_1 - \frac{1}{2}\int_z^\infty \left(\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x \partial y} \right) dz, \\ u_y^0 = \varphi_2 - \frac{1}{2}\int_z^\infty \left(\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial y^2} \right) dz, \\ u_z^0 = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \psi_1}{\partial x} + \frac{\partial \psi_2}{\partial y} \right). \end{cases} \tag{2.50}$$

Полученное частное решение удовлетворяет первым двум условиям (2.44) последние условие равенство нулю нормального напряжения при $z = 0$ не выполняется с учетом (2.59) нормальное напряжение равно:

$$\sigma_{zz} = 2G\frac{\partial u_z^0}{\partial z} = -G\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \right). \tag{2.51}$$

Поэтому необходимо добавить к (2.50) решение соответствующее

граничным условиям при $z=0$:

$$\begin{cases} \sigma_{zx}=0, \\ \sigma_{yz}=0, \\ \sigma_{zz}=G\left(\dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x}+\dfrac{\partial\varphi_2}{\partial y}\right). \end{cases} \tag{2.52}$$

Введем в рассмотрение гармоническую функцию ω. На границе должно выполняться условие:

$$\omega(x,y,z)=\iint\limits_{\Omega}\sigma_{zz}\frac{do'}{R'}, \tag{2.53}$$

или

$$G\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial x}+\frac{\partial\varphi_2}{\partial y}\right)=\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\partial\omega}{\partial z}\right). \tag{2.54}$$

Далее получаем:

$$\omega_1(x,y,z)=\iint\limits_{\Omega}p(x',y')\ln(R'+z)do', \tag{2.55}$$

или

$$\omega_1=-2\pi G\int\limits_{z}^{\infty}\left(\frac{\partial\psi_1}{\partial x}+\frac{\partial\psi_2}{\partial y}\right)dz. \tag{2.56}$$

Для этого случая перемещения, определяются по формулам [106]:

$$\begin{cases} u_x^*=-\dfrac{1}{4\pi G}\left(z\dfrac{\partial\omega}{\partial x}+\dfrac{m-2}{m}\dfrac{\partial\omega_1}{\partial x}\right), \\ u_y^*=\dfrac{1}{4\pi G}\left(z\dfrac{\partial\omega}{\partial y}+\dfrac{m-2}{m}\dfrac{\partial\omega_1}{\partial y}\right), \\ u_z^*=\dfrac{m-1}{2\pi mG}\omega-\dfrac{z}{4\pi G}\dfrac{\partial\omega}{\partial z}. \end{cases} \tag{2.57}$$

Учитывая (2.47) и (2.57) получим:

$$\begin{cases} u_x^* = -\frac{1}{2}z\left(\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi_2}{\partial x\partial y}\right)+\frac{m-2}{2m}\int\limits_z^\infty\left(\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi_2}{\partial x\partial y}\right)dz, \\ u_y^* = -\frac{1}{2}z\left(\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2\psi_2}{\partial y^2}\right)+\frac{m-2}{2m}\int\limits_z^\infty\left(\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2\psi_2}{\partial y^2}\right)dz, \\ u_z^* = \frac{m-1}{m}\left(\frac{\partial\psi_1}{\partial x}+\frac{\partial\psi_2}{\partial y}\right)-\frac{1}{2}z\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial x}+\frac{\partial\varphi_2}{\partial y}\right). \end{cases} \tag{2.58}$$

Складывая (2.50) и (2.58) найдем решение поставленной задачи

$$\begin{cases} u_x = \varphi_1 - \frac{1}{2}z\left(\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2\psi_2}{\partial y^2}\right)-\frac{1}{m}\int\limits_z^\infty\left(\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi_2}{\partial x\partial y}\right)dz, \\ u_y = \varphi_2 - \frac{1}{2}z\left(\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2\psi_2}{\partial y^2}\right)-\frac{1}{m}\int\limits_z^\infty\left(\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2\psi_2}{\partial y^2}\right)dz, \\ u_z = \frac{m-1}{2m}\left(\frac{\partial\psi_1}{\partial x}+\frac{\partial\psi_2}{\partial y}\right)-\frac{1}{2}z\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial x}+\frac{\partial\varphi_2}{\partial y}\right). \end{cases} \tag{2.59}$$

Рассмотрим действие сосредоточенной силы S_x в плоскости, ограничивающей полупространство, располагая начало координат в точке приложение сосредоточенной силы и направляя вдоль нее ось x.

Примем функции φ и ψ в следующем виде:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{S_x}{2\pi G}\frac{1}{R}, \\ \psi_1 = \frac{S_x}{2\pi G}\ln(R+z), \\ \varphi_2 = 0, \\ \psi_2 = 0. \end{cases} \tag{2.60}$$

Вычисляя далее:

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial x} = \frac{S_x}{2\pi G}\frac{1}{R^3}, \tag{2.61}$$

$$\frac{\partial\psi_1}{\partial x} = \frac{S_x}{2\pi G}\frac{x}{R(R+z)}, \tag{2.62}$$

$$\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x^2} = \frac{S_x}{2\pi G}\left(\frac{1}{R(R+z)}-\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right), \tag{2.63}$$

$$\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x\partial y} = -\frac{S_x}{2\pi G}\frac{xy}{R^3}\frac{(2R+z)}{(R+z)^2}\ , \tag{2.64}$$

$$\frac{1}{2}z\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x^2} = \frac{S_x}{4\pi G}\left(\frac{1}{R}-\frac{x^2}{R^3}-\frac{1}{R+z}+\frac{x^2}{R(R+z)^2}\right), \tag{2.65}$$

$$\frac{1}{2}z\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x\partial y}=-\frac{S_x}{4\pi G}\left(\frac{1}{R^3}-\frac{1}{R(R+z)^2}\right), \tag{2.66}$$

$$\int_z^\infty\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x^2}=\frac{S_x}{2\pi G}\left(\frac{1}{R+z}-\frac{x^2}{R(R+z)^2}\right), \tag{2.67}$$

$$\int_z^\infty\frac{\partial^2\psi_1}{\partial x\partial y}dz=-\frac{S_x}{2\pi G}\frac{xy}{R(R+z)^2} \tag{2.68}$$

и подставляя в (2.59) получим выражения для перемещений:

$$\begin{cases} u_x=\dfrac{S_x}{4\pi G}\left(\dfrac{1}{R}+\dfrac{x^2}{R^3}+\dfrac{m-2}{m}\left(\dfrac{1}{R+z}-\dfrac{x^2}{R(R+z)^2}\right)\right), \\ u_y=\dfrac{S_x}{4\pi G}\left(\dfrac{1}{R^3}-\dfrac{m-2}{m}\dfrac{1}{R(R+z)^2}\right), \\ u_z=\dfrac{S_x}{4\pi G}\left(\dfrac{xz}{R^3}+\dfrac{m-2}{m}\dfrac{x}{R(R+z)}\right). \end{cases} \tag{2.69}$$

Для случая действия сосредоточенной силы плоскости xy вдоль оси y можно получить выражения, аналогичные (2.69).

Имея решения (2.34) и (2.69) составим выражения для определения перемещений точек упругого полупространства вызываемых действием произвольной по направлению силы *S*, приложенной в точке плоскости ограничивающей полупространство, ось z направлена внутрь упругого тела:

$$\begin{cases} u_x=\dfrac{1}{4\pi G}\left(S_x\left(\dfrac{1}{R}+\dfrac{x^2}{R^3}+\dfrac{m-2}{m}\left(\dfrac{1}{R+z}-\dfrac{x^2}{R(R+z)^2}\right)\right)+S_y\left(\dfrac{xy}{R^3}-\dfrac{m-2}{m}\dfrac{xy}{R(R+z)^2}\right)+\right. \\ \left.+S_z\left(\dfrac{xz}{R^3}-\dfrac{m-2}{m}\dfrac{x}{R(R+z)}\right)\right), \\ u_y=\dfrac{1}{4\pi G}\left(S_x\left(\dfrac{xy}{R^3}-\dfrac{m-2}{m}\dfrac{xy}{R(R+z)^2}\right)+S_y\left(\dfrac{1}{R}+\dfrac{y^2}{R^3}+\dfrac{m-2}{m}\left(\dfrac{1}{R+z}-\dfrac{y^2}{R(R+z)^2}\right)\right)+\right. \\ \left.+S_z\left(\dfrac{yz}{R^3}-\dfrac{m-2}{m}\dfrac{y}{R(R+z)}\right)\right), \\ u_z=\dfrac{1}{4\pi G}\left(S_x\left(\dfrac{xz}{R^3}+\dfrac{m-2}{m}\dfrac{x}{R(R+z)}\right)+S_y\left(\dfrac{zy}{R^3}+\dfrac{m-2}{m}\dfrac{y}{R(R+z)}\right)+\right. \\ \left.+S_z\left(\dfrac{2(m-2)}{Rm}+\dfrac{z^2}{R^3}\right)\right). \end{cases} \tag{2.70}$$

Для определения напряжений, вызываемых действием произвольной сосредоточенно силы на полупространство, воспользуемся следующими соотношениями:

$$\sigma_{ij} = G\left[\frac{2}{m-2}\delta_{ij} divU + \left(u_{i,j} + u_{j,i}\right)\right], \tag{2.71}$$

$$\begin{aligned} u_{x,x} = \frac{1}{4\pi G}\Bigg(& S_x\left(\frac{x}{R^3} - \frac{3x^3}{R^5} + \frac{m-2}{m}\left(-\frac{3x}{R(R+z)^2} - \frac{x^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3}\right)\right) + \\ & +S_y\left(-\frac{y}{R^3} - \frac{3x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m}\left(\frac{y}{R(R+z)^2} - \frac{x^2y(3R+z)}{R^2(R+z)^4}\right)\right) + \\ & +S_z\left(\frac{z}{R^3} - \frac{3x^2z}{R^5} - \frac{m-2}{m}\left(\frac{1}{R(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right)\right)\Bigg), \end{aligned} \tag{2.72}$$

$$\begin{aligned} u_{x,y} = \frac{1}{4\pi G}\Bigg(& S_x\left(-\frac{y}{R^3} - \frac{3x^2y}{R^5} + \frac{m-2}{m}\left(-\frac{y}{R(R+z)^2} - \frac{x^2y(3R+z)}{R^3(R+z)^3}\right)\right) + \\ & +S_y\left(\frac{x}{R^3} - \frac{3xy^2}{R^5} - \frac{m-2}{m}\left(\frac{x}{R(R+z)^2} - \frac{xy^2(3R+z)}{R^2(R+z)^4}\right)\right) + \\ & +S_z\left(-\frac{3xyz}{R^5} + \frac{m-2}{m}\frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right)\Bigg), \end{aligned} \tag{2.73}$$

$$\begin{aligned} u_{x,z} = \frac{1}{4\pi G}\Bigg(& S_x\left(-\frac{z}{R^3} - \frac{3z^2x}{R^5} + \frac{m-2}{m}\left(-\frac{1}{R(R+z)} - \frac{x^3(R+z)(2R+z)}{R^3(R+z)^4}\right)\right) + \\ & +S_y\left(-\frac{3xyz}{R^5} + \frac{m-2}{m}\frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right) + S_z\left(\frac{x}{R^3} - \frac{3xz^2}{R^5} - \frac{m-2}{m}\frac{x}{R^3}\right)\Bigg), \end{aligned} \tag{2.74}$$

$$\begin{aligned} u_{y,y} = \frac{1}{4\pi G}\Bigg(& S_x\left(\frac{x}{R^3} - \frac{3y^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m}\left(\frac{x}{R^2(R+z)} - \frac{xy^2(3R+z)}{R^2(R+z)^4}\right)\right) + \\ & +S_y\left(\frac{y}{R^3} - \frac{3y^3}{R^5} + \frac{m-2}{m}\left(-\frac{3y}{R(R+z)^2} + \frac{y^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3}\right)\right) + \\ & +S_z\left(\frac{z}{R^3} - \frac{3zy^2}{R^5} - \frac{m-2}{m}\left(\frac{1}{R(R+z)} + \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right)\right)\Bigg), \end{aligned} \tag{2.75}$$

$$u_{y,z}=\frac{1}{4\pi G}\left(S_x\left(-\frac{3y^2x}{R^5}+\frac{m-2}{m}\frac{xy(R+z)}{R^3(R+z)^2}\right)+\right.$$
$$+S_y\left(-\frac{z}{R^3}-\frac{3zy^2}{R^5}+\frac{m-2}{m}\left(\frac{1}{R(R+z)}+\frac{yz(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right)\right)+ \tag{2.76}$$
$$\left.+S_z\left(\frac{y}{R^3}-\frac{3z^2y}{R^5}+\frac{m-2}{m}\frac{y}{R^3}\right)\right),$$

$$u_{z,z}=\frac{1}{4\pi G}\left(S_x\left(\frac{x}{R^3}-\frac{3z^2x}{R^5}-\frac{m-2}{m}\frac{x}{R^3}\right)+\right.$$
$$\left.+S_y\left(\frac{y}{R^3}-\frac{3z^2y}{R^5}-\frac{m-2}{m}\frac{y}{R^3}\right)+S_z\left(-\frac{2(m-1)}{m}\frac{z}{R^3}+\frac{2z}{R^3}-\frac{3z^3}{R^5}\right)\right), \tag{2.77}$$

тогда

$$divU=\frac{1}{4\pi G}\left(S_x\left(\frac{3x}{R^3}-\frac{3x^3}{R^5}-\frac{3y^2x}{R^5}-\frac{3z^2x}{R^5}+\frac{m-2}{m}\left(-\frac{4x}{R(R+z)^2}-\frac{x^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3}+\frac{xy^2(3R+z)}{R^2(R+z)^4}-\frac{x}{R^3}\right)\right)+\right.$$
$$+S_y\left(-\frac{3x^2y}{R^5}-\frac{3y^3}{R^5}+\frac{y}{R^3}-\frac{3z^2y}{R^5}-\frac{m-2}{m}\left(\frac{4y}{R(R+z)^2}-\frac{x^2y(3R+z)}{R^2(R+z)^4}-\frac{y^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3}+\frac{y}{R^3}\right)\right)+ \tag{2.78}$$
$$\left.+S_z\left(\frac{4z}{R^3}-\frac{3x^2z}{R^5}-\frac{3z^3}{R^5}-\frac{2(m-1)}{m}\frac{z}{R^3}-\frac{3zy^2}{R^5}-\frac{m-2}{m}\left(\frac{2}{R(R+z)}-\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2}+\frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right)\right)\right)$$

$$\sigma_{xx}=\frac{2G}{m-2}divU+\frac{1}{2\pi}\left(S_x\left(\frac{x}{R^3}-\frac{3x^3}{R^5}+\frac{m-2}{m}\left(-\frac{3x}{R(R+z)^2}-\frac{x^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3}\right)\right)+\right.$$
$$+S_y\left(-\frac{y}{R^3}-\frac{3x^2y}{R^5}-\frac{m-2}{m}\left(\frac{y}{R(R+z)^2}-\frac{x^2y(3R+z)}{R^2(R+z)^4}\right)\right)+ \tag{2.79}$$
$$\left.+S_z\left(\frac{z}{R^3}-\frac{3x^2z}{R^5}-\frac{m-2}{m}\left(\frac{1}{R(R+z)}-\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right)\right)\right),$$

$$\sigma_{yy}=\frac{2G}{m-2}divU+\frac{1}{2\pi}\left(S_x\left(\frac{x}{R^3}-\frac{3y^2x}{R^5}-\frac{m-2}{m}\left(\frac{x}{R^2(R+z)}-\frac{xy^2(3R+z)}{R^2(R+z)^4}\right)\right)+\right.$$
$$+S_y\left(\frac{y}{R^3}-\frac{3y^3}{R^5}+\frac{m-2}{m}\left(-\frac{3y}{R(R+z)^2}+\frac{y^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3}\right)\right)+ \tag{2.80}$$
$$\left.+S_z\left(\frac{z}{R^3}-\frac{3zy^2}{R^5}-\frac{m-2}{m}\left(\frac{1}{R(R+z)}+\frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2}\right)\right)\right),$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2G}{m-2} divU + \frac{1}{2\pi}\left(S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3z^2 x}{R^5} - \frac{m-2}{m}\frac{x}{R^3} \right) + S_y \left(\frac{y}{R^3} - \frac{3z^2 y}{R^5} - \frac{m-2}{m}\frac{y}{R^3} \right) + \right.$$
$$\left. + S_z \left(-\frac{2(m-1)}{m}\frac{z}{R^3} + \frac{2z}{R^3} - \frac{3z^3}{R^5} \right) \right), \tag{2.81}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{4\pi}\left(S_x \left(-\frac{6x^2 y}{R^5} - \frac{m-2}{m}\frac{2y}{R(R+z)^2} \right) + S_y \left(\frac{x}{R^3} + \frac{1}{R^3} - \frac{6xy^2}{R^5} \right) + \right.$$
$$\left. + 2S_z \left(-\frac{3xyz}{R^5} + \frac{m-2}{m}\frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right), \tag{2.82}$$

$$\sigma_{yz} = \frac{1}{2\pi}\left(S_x \left(-\frac{3y^2 x}{R^5} - \frac{3xyz}{R^5} \right) + S_y \left(\frac{m-2}{m}\left(\frac{2}{R(R+z)} + \frac{yz(2R+z)}{R^3(R+z)^2} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) + \right.$$
$$\left. + S_z \left(-\frac{6z^2 y}{R^5} + \left(1 + \frac{3(m-2)}{m} \right)\frac{y}{R^3} \right) \right), \tag{2.83}$$

$$\sigma_{zx} = \frac{1}{4\pi}\left(S_x \left(-\frac{3zx^2}{R^5} - \frac{3z^2 x}{R^5} - \frac{m-2}{m}\left(\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} + \frac{x^3(2R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + S_y \frac{6xyz}{R^5} + \right.$$
$$\left. + S_z \left(\left(1 + \frac{m-2}{m} \right)\frac{x}{R^3} - \frac{6xz^2}{R^5} \right) \right). \tag{2.84}$$

При воздействии сосредоточенной силы на слоеный материал происходит поперечное смещение слоев, что приводит к разрушению материала по границе склейки слоев.

На рисунках 2.6 – 2.11 представлены результаты численного расчета напряжений по поверхности стеклотекстолита при проникании гидроабразивной струи.

На рисунках 2.12 – 2.14 представлены результаты численного расчета перемещений по поверхности стеклотекстолита при проникании гидроабразивной струи.

Поскольку стеклотекстолит - материал со слоистой структурой, и не является изотропным однородным материалом, наш образец был заменен на изотропный однородный материал с осредненными значениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона, взятыми из эксперимента по растяжению

призматического образца стеклотекстолита. Расчет напряжений проводился для различных значений слоев при заданной силе резания и на основании гипотезы прочности делался вывод о разрушении слоя или его расслоении. При не удовлетворительных результатах производилась корректировка силы резания в итерационном процессе.

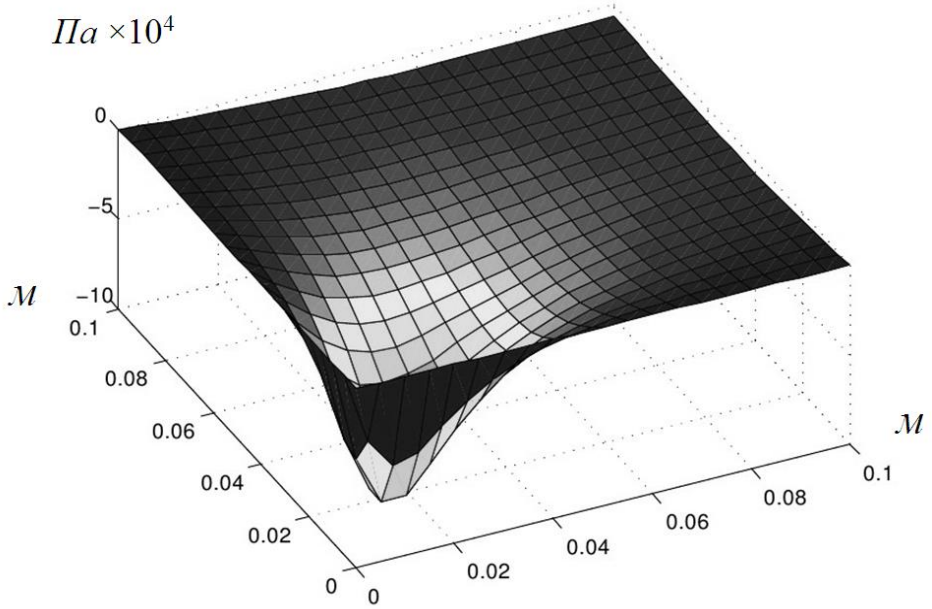


Рисунок 2.6 - Напряжения в зоне проникания гидроабразивной струи в слоистый материал σ_{xy}

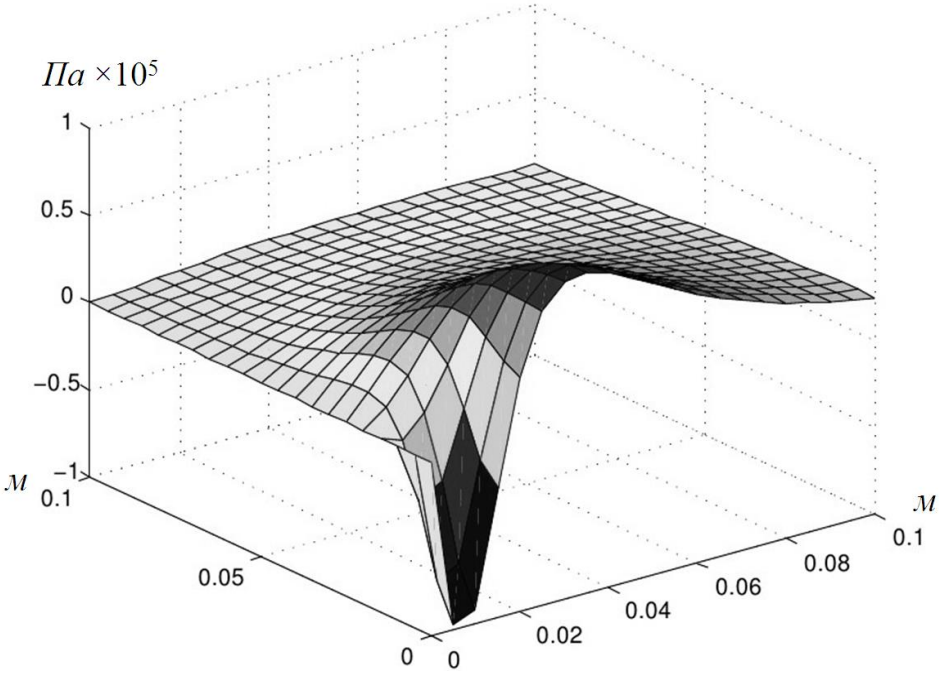


Рисунок 2.7 - Напряжения в зоне проникания гидроабразивной струи в слоистый материал σ_{zy}

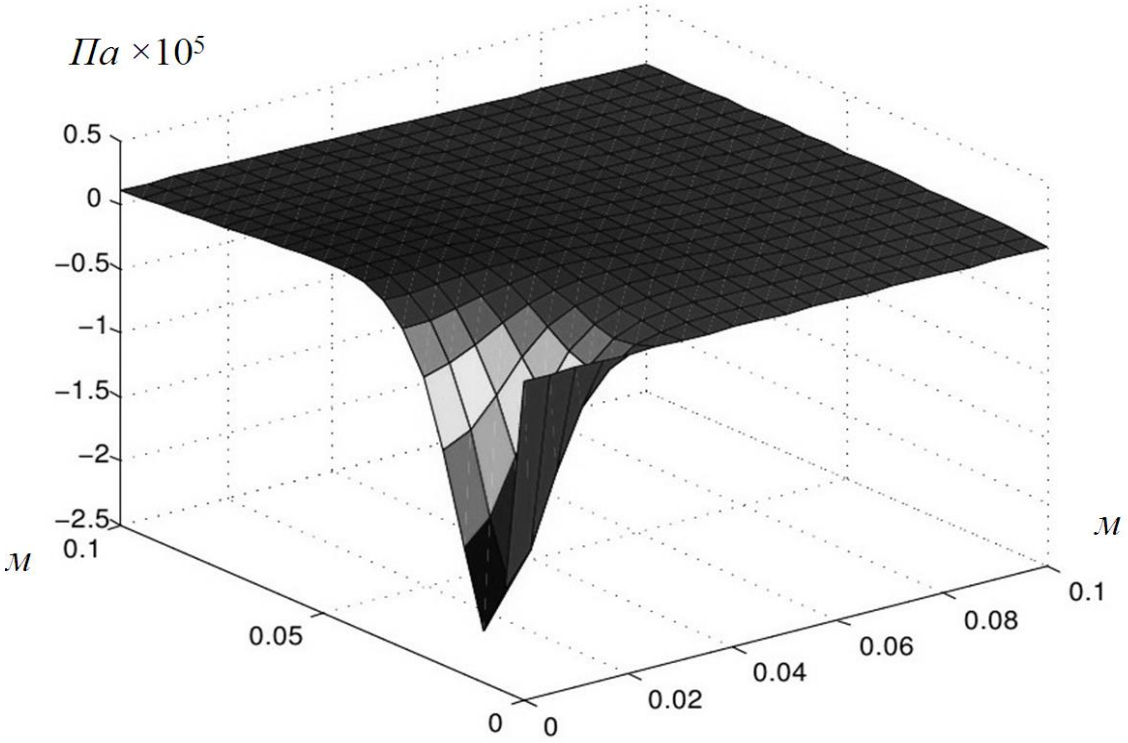


Рисунок 2.8 - Напряжения в зоне проникания гидроабразивной струи в слоистый материал σ_{xz}

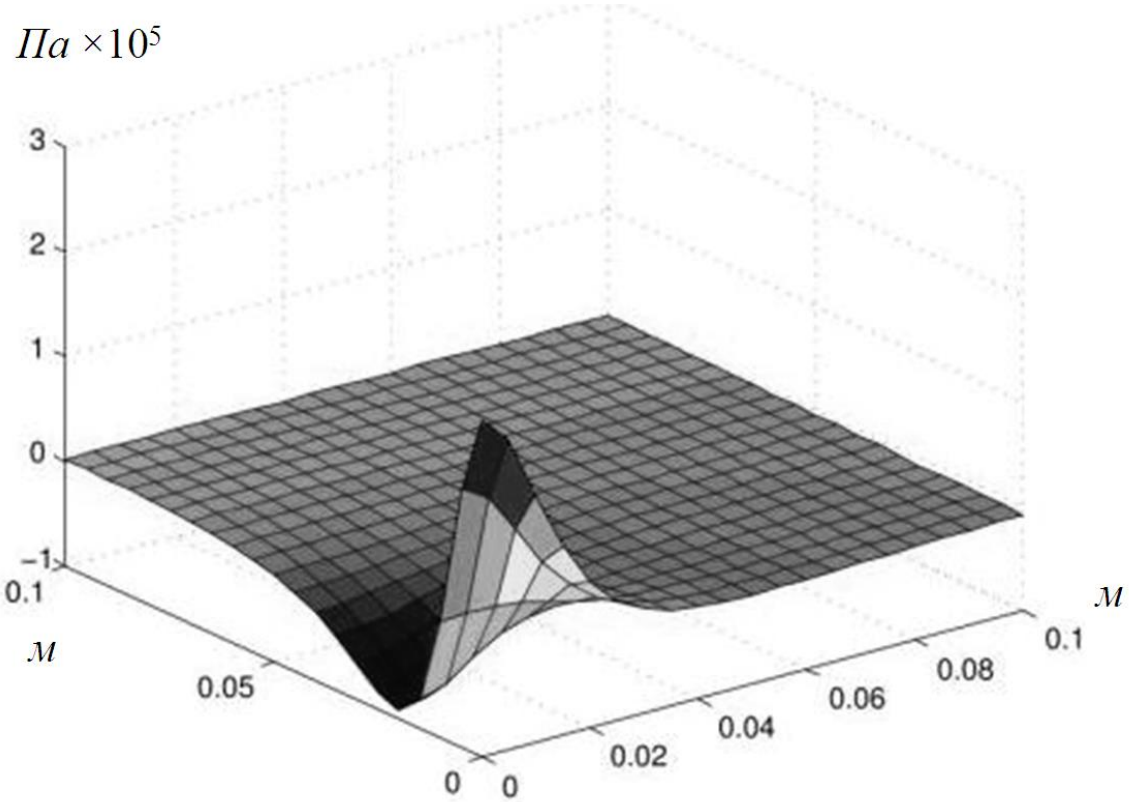


Рисунок 2.9 - Напряжения в зоне проникания гидроабразивной струи в слоистый материал σ_x

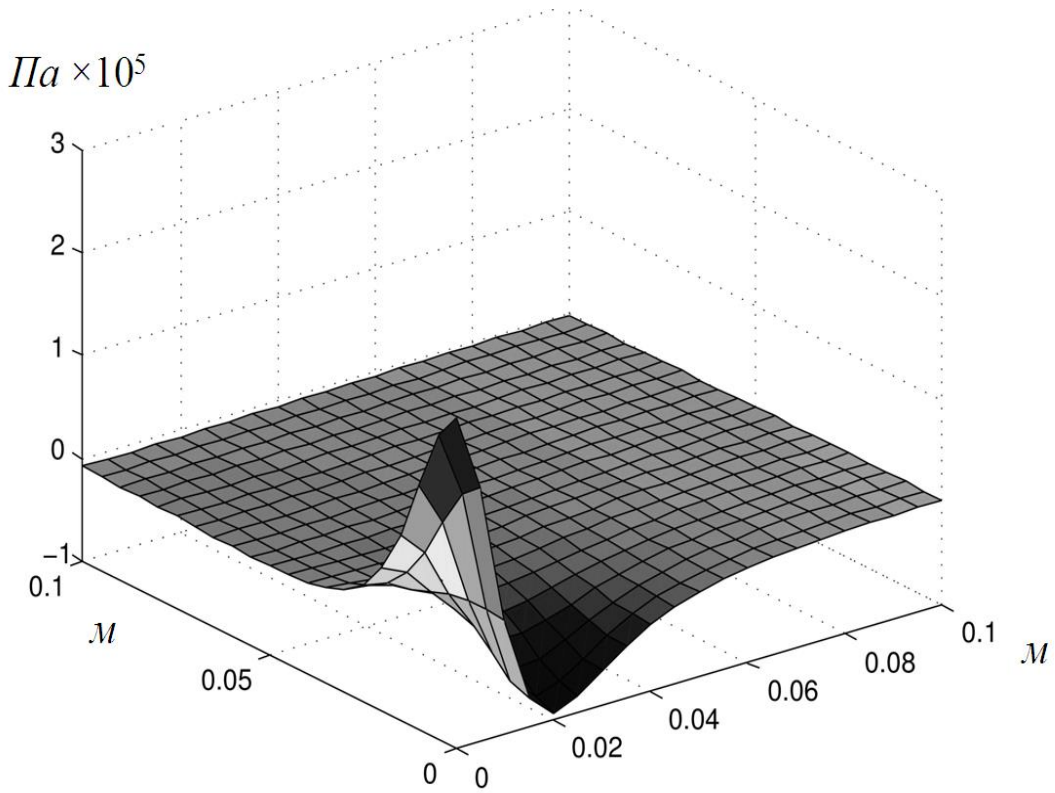


Рисунок 2.10 - Напряжения в зоне проникания гидроабразивной струи в слоистый материал σ_y

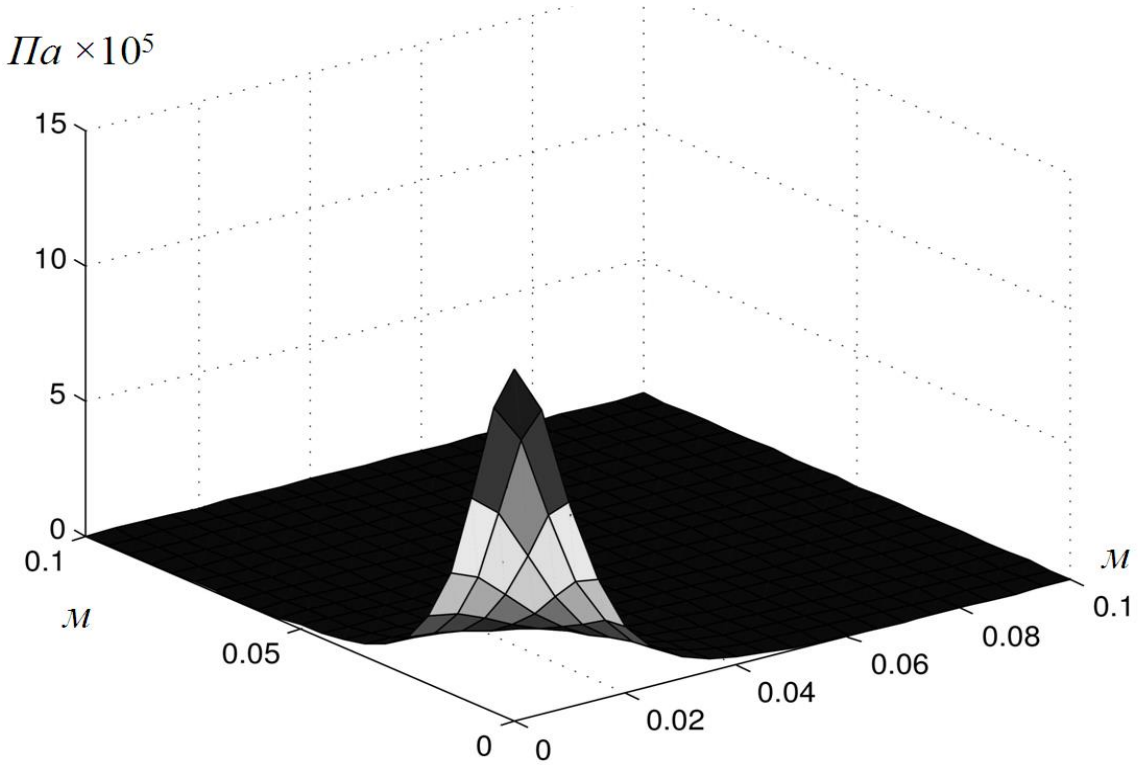


Рисунок 2.11 - Напряжения в зоне проникания гидроабразивной струи в слоистый материал σ_z

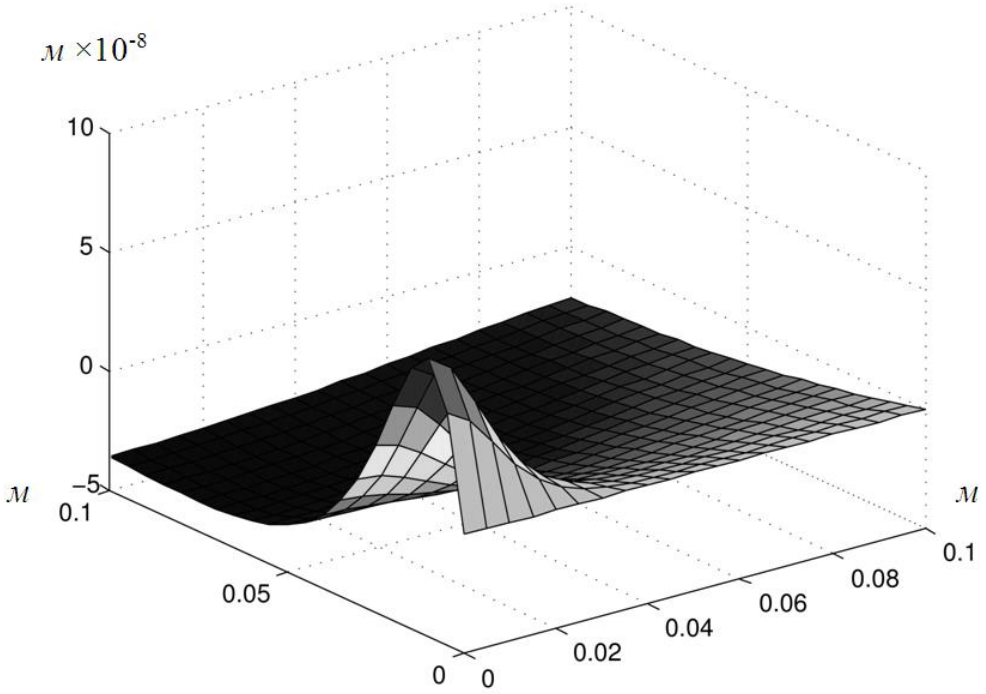


Рисунок 2.12 - Перемещения материала U_x
под действием гидроабразивной струи

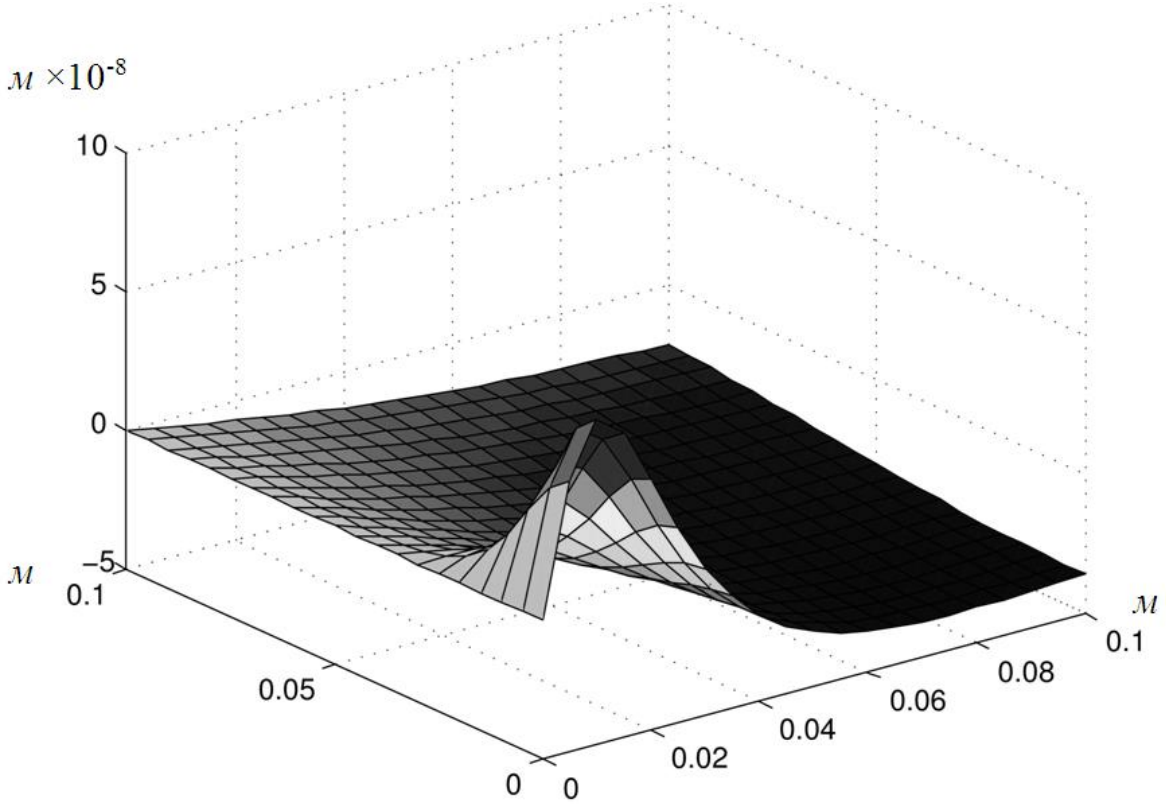


Рисунок 2.13 - Перемещения материала U_y
под действием гидроабразивной струи

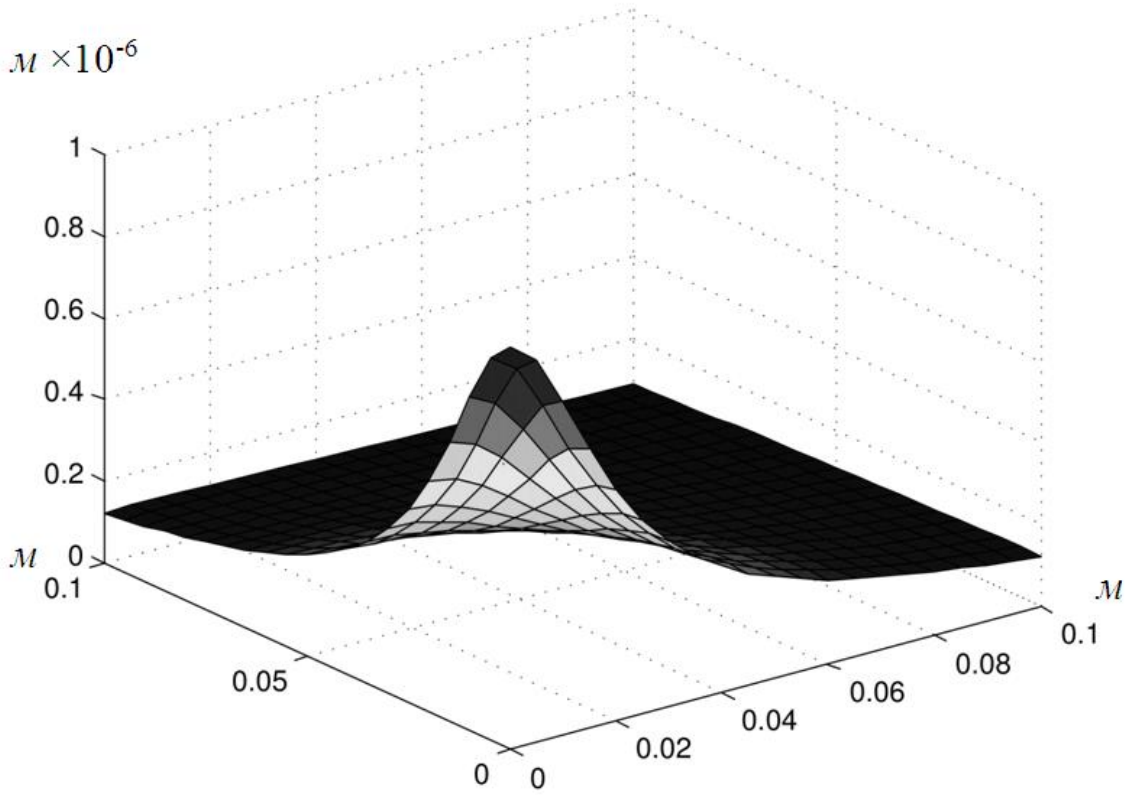


Рисунок 2.14 - Перемещения материала U_z
под действием гидроабразивной струи

2.3 Выводы по второй главе

1. Предложена физическая модель расслоения стеклотекстолита под действием гидроабразивной струи при прошивке, в которой выделены три стадии разрушения (изгиб верхних слоев, проникание и поперечное растекание струи), что позволило выявить преимущественную роль касательных напряжений в материале по степени влияния на возникновение межслойных трещин.

2. На основе моделирования напряженно-деформированного состояния получены уравнения касательных напряжений, созданных в материале при проникании гидроабразивной струи, что позволяет по их критическому уровню прогнозировать расслоение стеклотекстолита от давления истечения струи и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОШИВКИ ЛИСТОВЫХ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ СТЭФ-I ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУЕЙ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАССЛОЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

В качестве объекта исследования был выбран материал СТЭФ-I 1с ГОСТ 12652-74 - один из наиболее распространенных материалов группы стеклотекстолитов, - композиционный полимерный материал, связующим веществом которого является синтетическая смола, а наполнителем, придающим повышенную прочность всей композиции, - стеклянное волокно. СТЭФ-I используются при изготовлении электрораспределительных устройств, щитов, панелей, конструкции которых могут содержать большое количество сквозных элементов (отверстия под крепеж, окна, пазы различной конфигурации).

Опытные работы по резке заготовок из стеклотекстолита выявили проблему образования расслоений различной величины от 1…5 мм до 70…80 мм во время прошивки материала (рисунок 3.1). При дальнейшем резании стеклотекстолитов струей расслоения в материале не образуются.

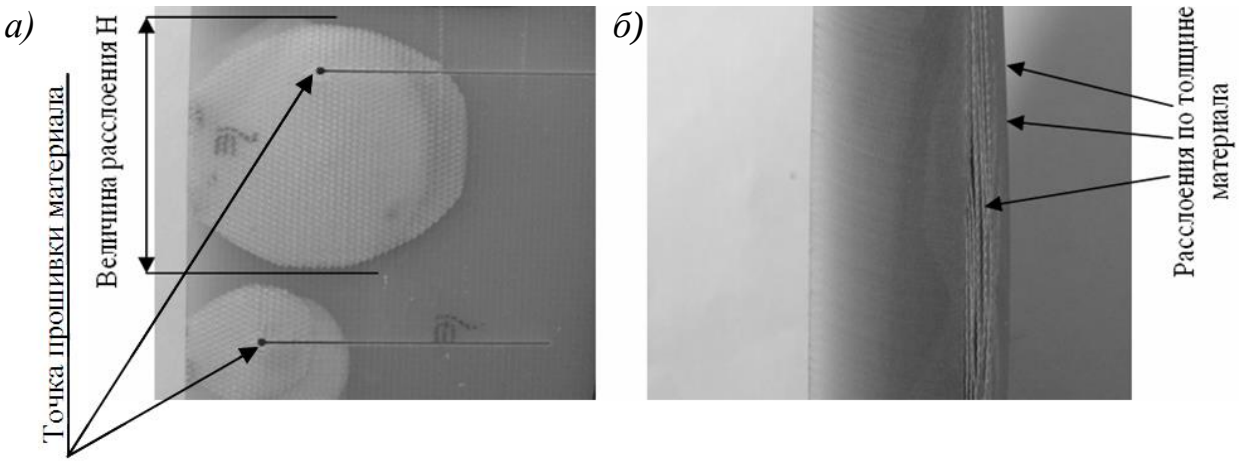


Рисунок 3.1 - Экспериментальные образцы: а) вид сверху, б) вид слева (торец заготовки)

В связи с отсутствием практически применимых рекомендаций и

расчетных моделей по выбору режимов прошивки материала (имеющиеся расчетные зависимости основаны на моделировании самого процесса резания), были проведены экспериментальные исследования по прошивке электротехнического стеклотекстолита СТЭФ-I с целью выявить технологические параметры и эффекты их взаимодействия, оказывающие наиболее существенное, доминирующее влияние на величину расслоений.

Основными технологическими параметрами при прошивке материала являются [107]:

– траектория движения фокусирующей трубки при прошивке (с движением фокусирующей трубки по окружности или с неподвижной фокусирующей трубкой);

– давление истечения гидроабразивной струи *P*;

– расход абразивного материала *Q*;

– расстояние между фокусирующей трубкой и материалом *l*;

– диаметр выходного отверстия фокусирующей трубки *d*;

– средний размер абразивного зерна *3*.

Для выбора толщины изучаемого листового материала были проведены предварительные эксперименты. Выполнялось по десять прошивок при давлении *100* МПа листовых стеклотекстолитов толщиной *S* от 0,5 до 50мм. Эксперименты показали, что во время прошивки стеклотекстолита толщиной *16* мм и выше расслоения образуются чаще (в 80% случаев и выше), чем во время прошивки материала толщиной менее 16мм (рисунок 3.2). Поэтому в качестве дальнейшего объекта исследования были использованы образцы электротехнического листового стеклотекстолита СТЭФ-I 1с ГОСТ 12652-74 толщиной 20 мм.

Для изучения зависимости величины расслоений от вышеперечисленных параметров был проведен ряд полных факторных экспериментов.

Исследования включали в себя проведение четырех серий полных факторных экспериментов (ПФЭ) типа 2^5. Прошивка образцов проводилось

двумя приемами: с движением фокусирующей трубки по окружности Ø 1мм и с неподвижной фокусирующей трубкой. В качестве абразивного материала для резания использовался гранатовый абразив со средним размером абразивного зерна 0,125мм и 0,178 мм.

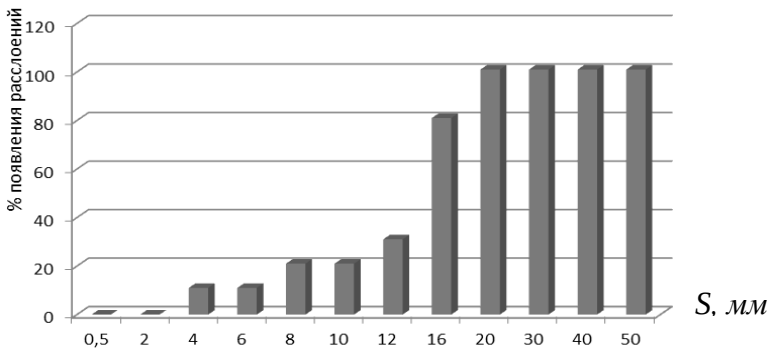


Рисунок 3.2 - Зависимость появления расслоений при прошивке от толщины материала (*P=100 МПа, Q=150 г/мин, l=3мм; d=0,76 мм, абразив гранат 0,178мм*).

Результаты экспериментов подвергали как регрессионному, так и дисперсионному анализу, что позволило с большей объективностью оценить факторы и эффекты их взаимодействия, выявить факторы, оказывающие наиболее существенное, доминирующее влияние на величину расслоений. При этом варьируемыми параметрами были:

- x_1- давление истечения гидроабразивной струи P, МПа;
- x_2- расход абразивного материала Q, г/мин;
- x_3- расстояние между фокусирующей трубкой и материалом l, мм;
- x_4- диаметр выходного отверстия фокусирующей трубки d, мм;
- x_5- средний размер абразивного зерна $З$, мм.

Задача экспериментальных исследований сводилась к определению размера расслоений H и получению уравнения регрессионного анализа в виде:

$$H=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\ldots+b_5x_5+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+\ldots+b_{12345}x_1x_2x_3x_4x_5, \quad (3.1)$$

где b_i- коэффициенты регрессии;

x_i-варьируемые параметры.

3.1 Исследование влияния режимов прошивки с движением фокусирующей трубки по окружности на величину и глубину расслоений поверхности деталей из стеклотекстолита

Для определения основных параметров, наиболее сильно влияющих на величину расслоения при прошивке с движением по окружности, было проведено 2 серии ПФЭ 2^5.

Для определения области варьирования параметра давления истечения гидроабразивной струи был проведен ряд экспериментов. Выяснено, что при давлении *64 -68 МПа* происходят частые засорения фокусирующей трубки с диаметрами выходного отверстия *0,6мм* и *0,76мм*. При значениях давления *P≥70МПа* засорение фокусирующей трубки прекращалось. При давлениях *P≥150МПа* в 100% на исследуемых образцах образовывались значительные расслоения размером свыше 50 мм.

Область варьирования входных факторах в экспериментах представлены в таблицах 3.1 и 3.2.

Планы экспериментов, результаты их обработки, проверка гипотезы однородности дисперсии опытов, расчет доверительного интервала коэффициентов уравнения регрессии и проверка адекватности модели представлены в приложении А.

Таблица 3.1 - Область варьирования входных факторов в эксперименте № 1

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьиования Δx
	-1	0	1	
Давление *P*, *МПа*	70	110	150	40
Расход абразива *Q*, *г/мин*	100	150	200	50
Расстояние от фокусирующей трубки до материала *l*, *мм*	2	3	4	1
Диаметр фокусирующей трубки *d*, *мм*	0,6	0,68	0,76	0,08
Средний размер абразивного зерна *З*, *мм*	0,125	0,1515	0,178	0,0265

Таблица 3.2 - Область варьирования входных факторов в эксперименте № 2

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьиования Δx
	-1	0	1	
Давление *P*, *МПа*	70	110	150	40
Расход абразива *Q*, *г/мин*	100	150	200	50
Расстояние от фокусирующей трубки до материала *l*, *мм*	2	3	4	1
Диаметр фокусирующей трубки *d*, *мм*	0,76	0,89	1,02	0,13
Средний размер абразивного зерна *З*,*мм*	0,125	0,1515	0,178	0,0265

Расчеты выполнены при помощи программы Microsoft Excel.

Полученные уравнения регрессии представлены в таблице 3.3.

Для удобства анализа производится так называемое ранжирование эффектов факторов (рисунки 3.3, 3.5).

Для более объективной оценки влияния факторов и их взаимодействия на отклик регрессионный анализ результатов многофакторного эксперимента дополняют дисперсионным анализом, выполняемым по методике [108]. Дисперсионный анализ на основе многофакторного эксперимента позволяет определить вклад факторов и их взаимодействия в дисперсию отклика (рисунки 3.4, 3.6).

По результату регрессионного анализа проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы [113]:

– на величину расслоения значительное влияние оказывают: давление при прошивке материала *P* (x_1), диаметр фокусирующей трубки *d* (x_4) и средний размер абразивного зерна *З* (x_5);

– при увеличении давления прошивки, величина расслоения увеличивается;

– с увеличением диаметра фокусирующей трубки величина расслоений уменьшается;

Таблица 3.3 - Результаты обработки экспериментов по прошивке стеклотекстолита СТЭФ-I, 1с-20,0 ГОСТ 12652-74 с траекторией движения фокусирующей трубки по окружности Ø 1мм

№ эксп.	Интервал варьирования *d*, мм	Уравнение регрессии в кодированном виде	Уравнение регрессии в натуральном виде
1	0,6-0,76	$y(H)=13{,}957+9{,}054x_1+0{,}825x_2-0{,}819x_3-2{,}316x_4+3{,}365x_5+0{,}656x_1x_2-1{,}316x_1x_3+2{,}123x_1x_4+3{,}365x_1x_5-1{,}082x_2x_3$ (3.2)	$H=76{,}83-0{,}656P+0{,}045Q+6{,}046l-101{,}928d-222{,}217З+0{,}0003PQ-0{,}033Pl+0{,}663Pd+3{,}175PЗ-0{,}022Ql$ (3.3)
2	0,76-1,02	$y(H)=8{,}013+7{,}78x_1-1{,}258x_3-3{,}629x_4+1{,}994x_5-1{,}301x_1x_3-3{,}396x_1x_4+1{,}994x_1x_5-1{,}395x_4x_5-1{,}347x_1x_4x_5+0{,}89x_2x_3x_4+0{,}475x_2x_4x_5+0{,}944x_1x_2x_3x_4$ (3.4)	$H=100{,}239-2{,}184P-0{,}329Q-32{,}181l-113{,}0667d-360{,}117З+2{,}462Pd+0{,}0097PQ+0{,}452Pl+10{,}581PЗ+39{,}368dl+0{,}3696dQ+0{,}234Ql+256{,}667dЗ-2{,}454QЗ-0{,}003PQl-0{,}0109PQd-0{,}545Pld-9{,}775PdЗ-0{,}262Qld+2{,}756QdЗ+0{,}004PQld$ (3.5)

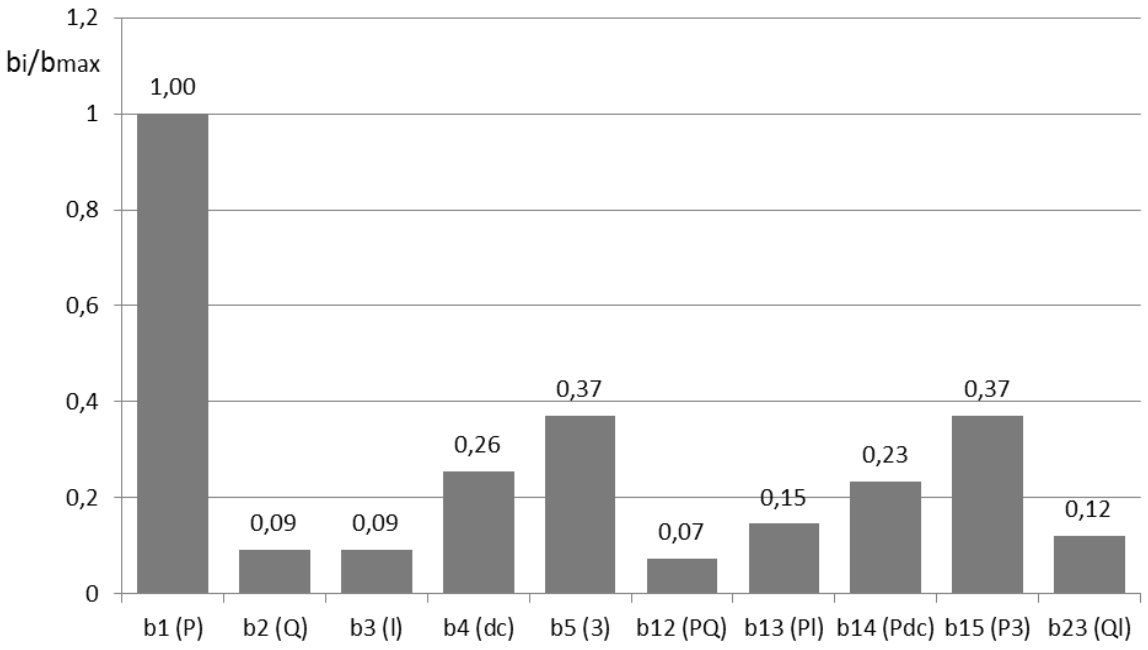


Рисунок 3.3 - Ранжирование эффектов факторов по t - критерию (критерию Стьюдента), регрессионный анализ (эксперимент №1)

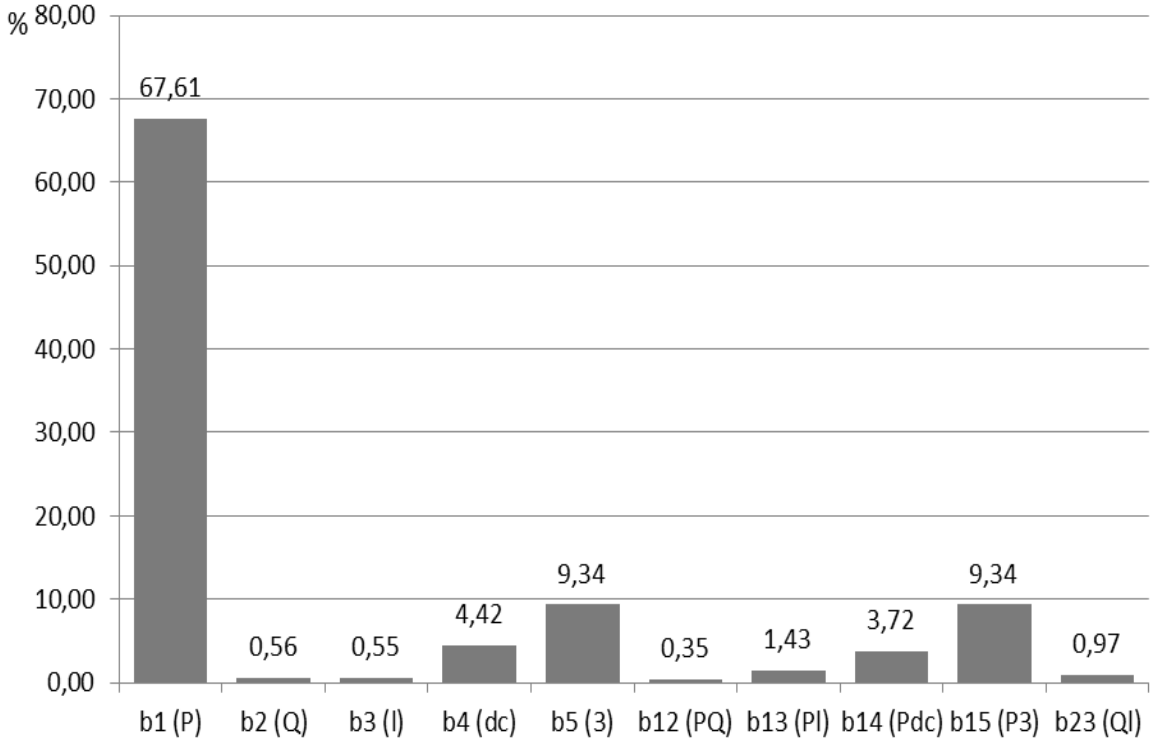


Рисунок 3.4 - Ранжирование эффектов факторов по F - критерию (критерию Фишера), дисперсионный анализ (эксперимент №1)

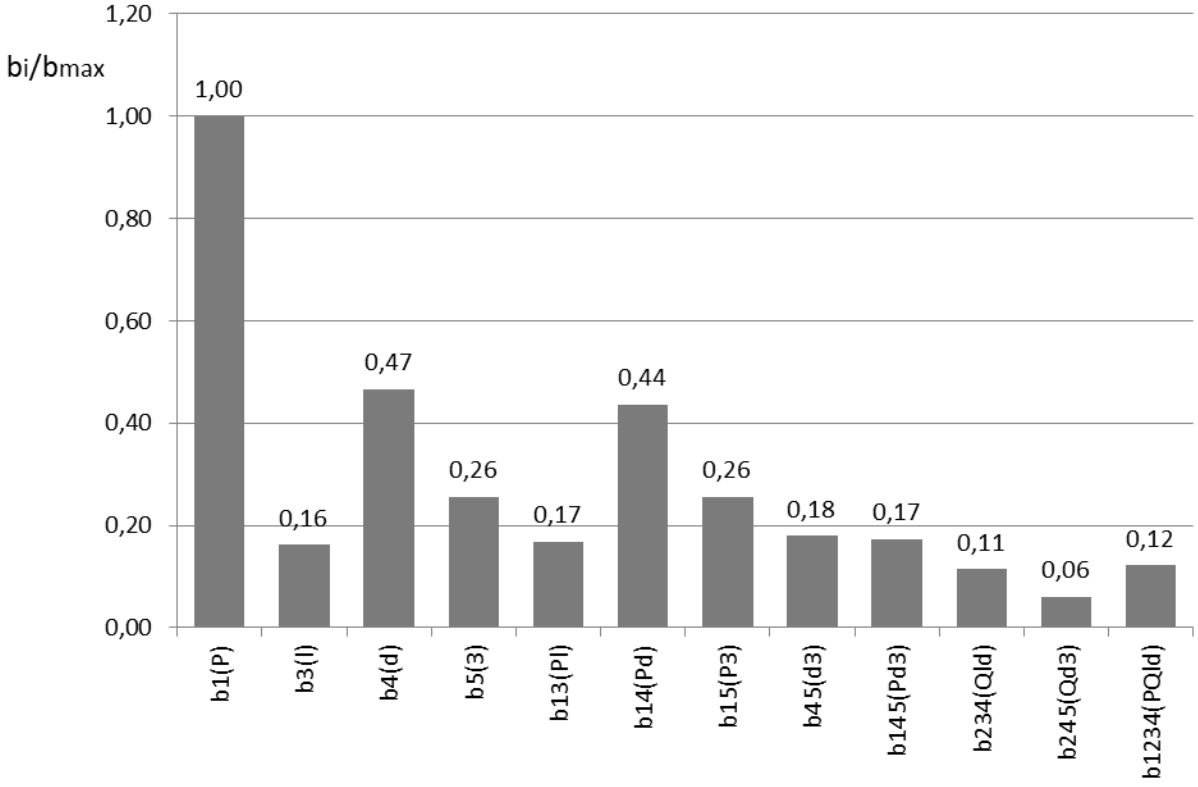


Рисунок 3.5 - Ранжирование эффектов факторов по t - критерию, регрессионный анализ (эксперимент №2)

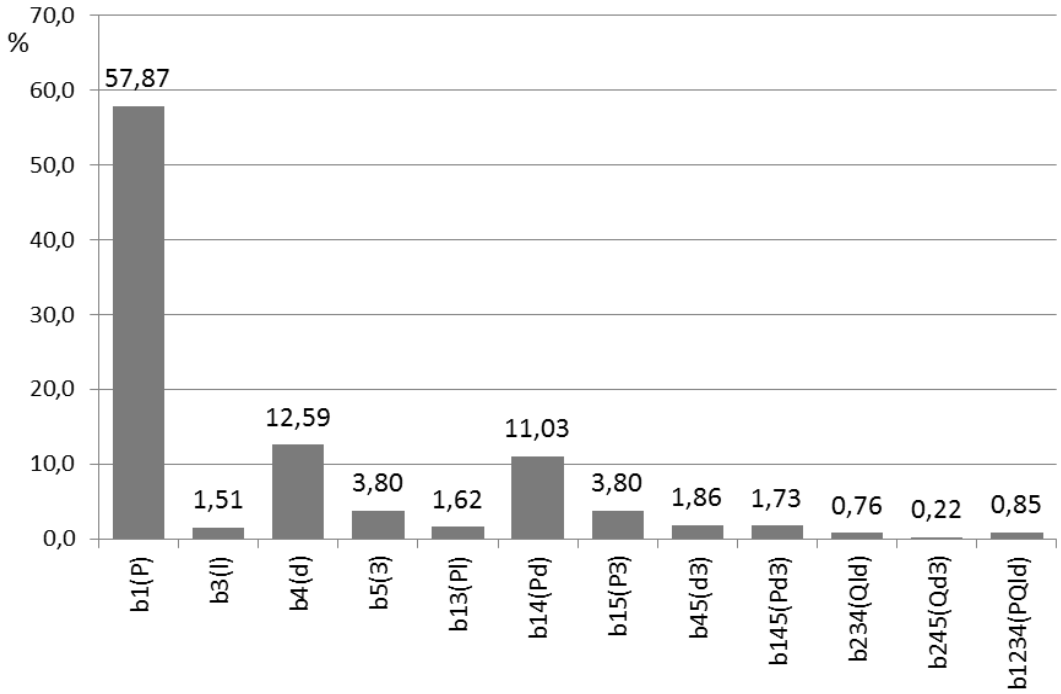


Рисунок 3.6 - Ранжирование эффектов факторов по F - критерию, дисперсионный анализ (эксперимент №2)

– с увеличением размера абразивного зерна размер расслоений увеличивается;

– расход абразива Q (x_2) и расстояние от фокусирующей трубки до материала l (x_3) оказывают значительно меньшее влияние (до 0,6%).

В большинстве случаев (более 95%) расслоения образуются в верхних слоях материала, глубина возникновения расслоений не превышает 6 мм от верхней кромки материала.

Дисперсионный анализ результатов экспериментов показал, что наибольший % дисперсии отклика вызван влиянием факторов: давления при прошивке (до 67,61%) , диаметра фокусирующей трубки (до 4,42%), среднего размера абразивного зерна (до 9,34%) и их взаимодействием, т.е. подтвердил выводы при регрессионном анализе.

Для более глубокого изучения влияния давления при прошивке на величину расслоения материала был проведен ряд экспериментов: проводилась прошивка стеклотекстолита СТЭФ-I-1с ГОСТ 12652-74 различных толщин с использованием абразива со средним размером абразивного зерна 0,178 мм (рисунок 3.7) (таблица 3.4).

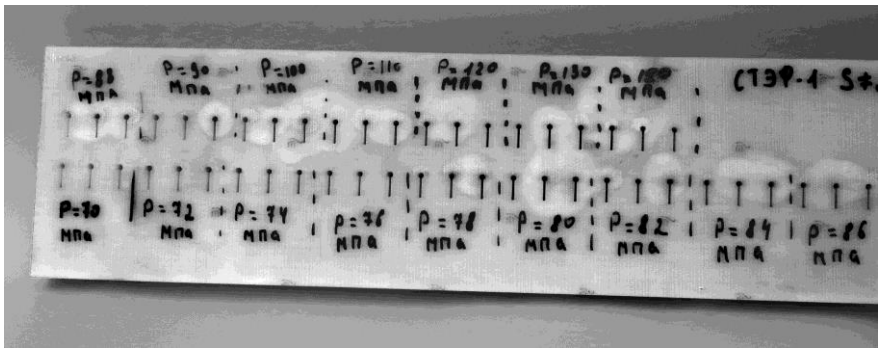


Рисунок 3.7 - Исследование влияния давления прошивки на величину расслоения материала (образец: СТЭФ-I 1с, 5,0 *Q=200 г/мин; l=4мм; d=0,76мм; размер абразивного зерна 0,178 мм*)

Из таблицы 3.4 видно, что для стеклотекстолитов марки СТЭФ-1,1с ГОСТ 12652-74 расслоения в материале не образуются при давлении прошивки *70-76* МПа в зависимости от толщины обрабатываемого материала

(рисунок 3.8). С увеличением толщины обрабатываемого материала, требуется снижение давления при пирсинге.

Таблица 3.4 - Величина максимального расслоения при прошивке стеклотекстолита СТЭФ-I 1с различных толщин с движением фокусирующей трубки по окружности Ø1 мм

Толщина материала, *мм*	Давление прошивки материала, *МПа*									
	Величина расслоения материала, *мм*									
	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80
1	засорение	0	0	0	0	0	0	0	3,82	7,54
5	засорение	0	0	0	0	0	0	0	4,24	8,31
10	-	засорение	0	0	0	0	1,93	4,42	6,77	9,12
15	-	засорение	0	0	0	0	2,16	4,17	6,12	8,68
20	-	-	засорение	0	0	1,99	3,55	5,12	6,69	8,25
30	-	-	засорение	0	0	3,03	5,47	7,72	9,71	12,45
40	-	-	-	засорение	0	4,28	7,24	9,49	12,32	14,93
50	-	-	-	засорение	0	4,74	8,17	11,02	14,64	16,93

При значениях давления *62-68 МПа* начинают наблюдаться засорения фокусирующей трубки и процесс прошивки прекращается. Поэтому если возникает необходимость снижения давления прошивки необходимо использовать фокусирующие трубки большего диаметра (например, *d=1,02мм*) и абразив меньшей зернистости (например, 0,125 мм).

Для изучения влияния диаметра окружности, по которой движется фокусирующая трубка при прошивке материала, на величину расслоения производили прошивку материала СТЭФ-I-1с-20,0 ГОСТ 12652-74 при значениях давления от *70* до *80* МПа с движением фокусирующей трубки по окружностям диаметром от *1* до *2* мм (таблица 3.5).

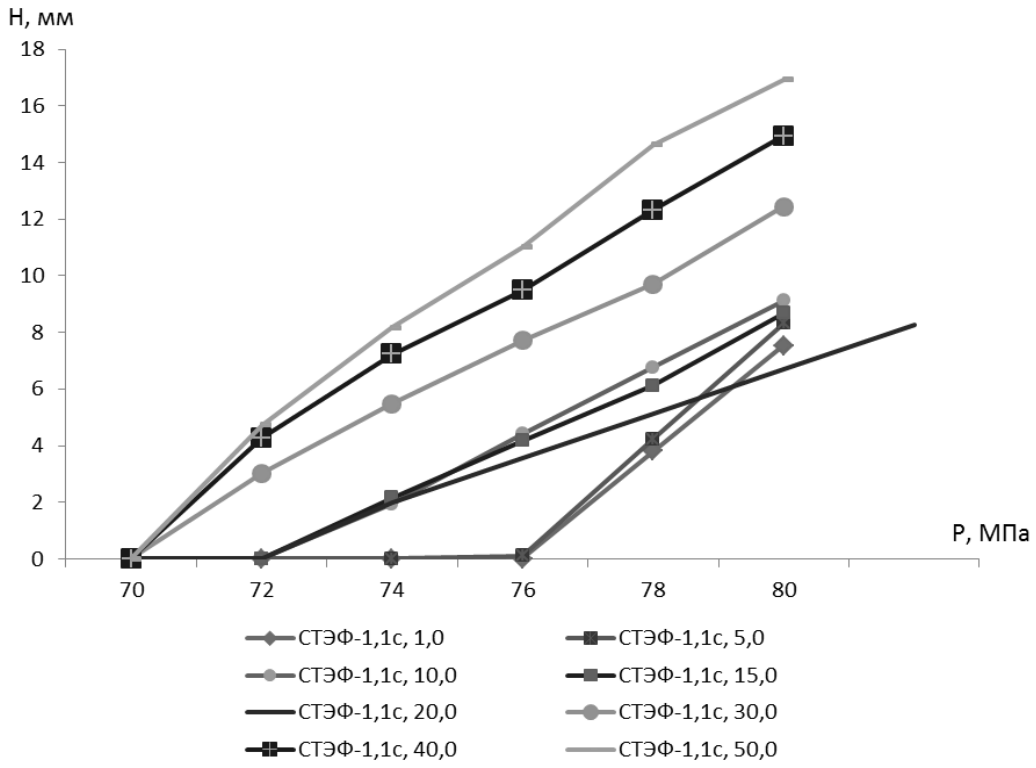


Рисунок 3.8 – Зависимость величины расслоения стеклотекстолитов различных толщин от давления при прошивке

Таблица 3.5 - Величина расслоения стеклотекстолита СТЭФ-1,1с-20,0 ГОСТ 12652-74 при прошивке с движением фокусирующей трубки по окружностям различного диаметра

Диаметр окружности траектории движения фокусирующей трубки при прошивке, *мм*	Давление прошивки, *МПа*					
	Величина расслоения материала, *мм*					
	70	72	74	76	78	80
1	0	1,99	3,55	5,12	6,69	8,25
1,3	0	2,17	3,85	5,58	6,72	9,05
1,6	0	2,04	3,68	5,23	6,38	7,98
1,9	0	2,56	4,16	4,94	5,91	8,17
2	0	2,25	3,95	5,77	6,83	9,32

Значительного влияния диаметра окружности траектории движения фокусирующей трубки на величину расслоения материала не выявлено (рисунок 3.9).

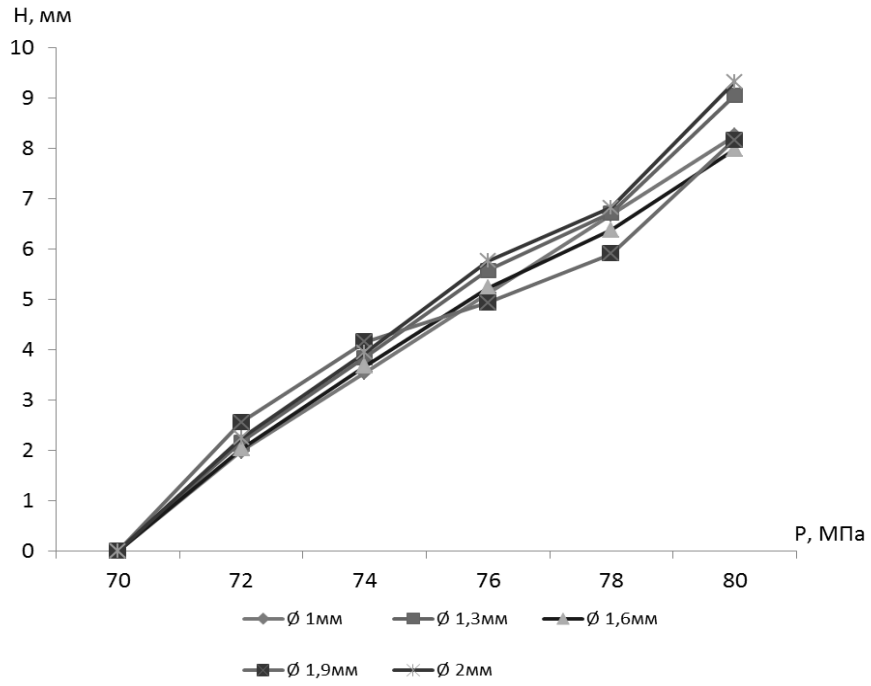


Рисунок 3.9 – Зависимость величины расслоения стеклотекстолитов от давления струи при прошивке с траекторией движения фокусирующей трубки по окружностям различного диаметра

Рассмотрим результаты и проведем анализ влияния рассматриваемых технологических параметров на величину расслоения при прошивке материала с движением фокусирующей трубки по окружности:

1) давление прошивки:

- на всем диапазоне исследуемых толщин от 1,0 до 50 мм с увеличением давления при прошивке увеличивается размер расслоения материала. Это связано с тем, что с увеличением давления прошивки возрастает уровень касательных напряжений в материале, способствующих расслоению материала.

- минимальная величина расслоения наблюдается при давлениях *70-76*МПа в зависимости от толщины обрабатываемого материала;

- при низких значениях давления прошивки (*62-68 МПа*) и использовании фокусирующих трубок диаметром *0,76*мм в сочетании с абразивом с размером зерна 0,178 мм наблюдается засорение фокусирующих трубок.

2) диаметр фокусирующей трубки (рисунок 3.10):

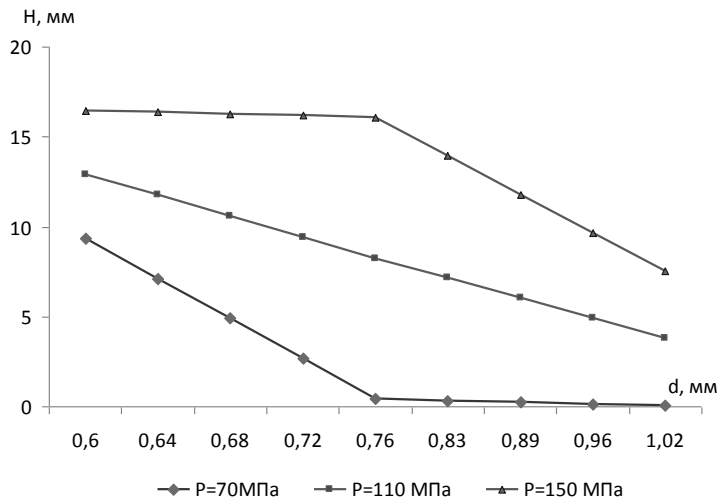


Рисунок 3.10 - Зависимость величины расслоения стеклотекстолита от диаметра фокусирующей трубки при прошивке с различными давлениями (*Q=150 г/мин; l=3мм; З=0,125 мм*)

- с увеличением диаметра фокусирующей трубки наблюдается снижение величины расслоения. Это связано с тем, что с увеличением диаметра фокусирующей трубки снижается удельное давление на обрабатываемый материал, что способствует более «мягкому» воздействию и несколько снижает значения касательных напряжений, создаваемых в материале во время его прошивки.

Наименьшие величины расслоения материала наблюдаются при использовании трубок диаметром *0,76*мм и выше.

Диаметр фокусирующей трубки влияет на качество обработанной поверхности. При уменьшении диаметра фокусирующей трубки [32]:

– улучшается производительность резания;

– улучшается качество поверхности резания (рисунок 3.11);

– улучшается точность резания;

– уменьшается ширина реза.

По этой причине с точки зрения производительности, точности и качества резания более предпочтительным является использование

фокусирующих трубок с внутренним диаметром *d= 0,76* мм.

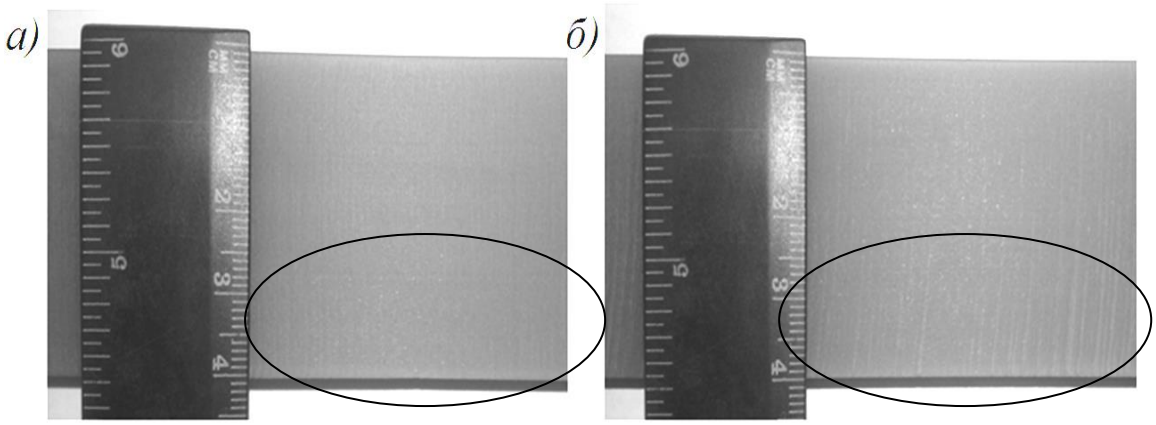


Рисунок 3.11 - Поверхность реза материала, обработанная методом ГАР (материал: СТЭФ-I-1с-40,0 ГОСТ 12652-74; *З*= 0,178 мм; $P_{резания}$ =*360*МПа; *S= 150* мм/мин): а) обработка фокусирующей трубкой *Ø 0,76*мм; б) обработка фокусирующей трубкой *Ø 1,02*мм.

3) величина абразивного зерна (рисунок 3.12):

- при давлении прошивки 70 МПа не наблюдается влияния среднего размера абразивного зерна на величину расслоения материала;

- при повышении значения давления прошивки изменение размера абразивного зерна приводит к увеличению расслоения материала;

- чем больше значение давления прошивки, тем интенсивнее возрастает величина расслоения материала с ростом размера абразивного зерна.

3.2 Исследование влияния режимов прошивки с неподвижной фокусирующей трубкой на величину и глубину расслоений поверхности деталей из стеклотекстолита

Для определения основных параметров, наиболее сильно влияющих на величину расслоения при прошивке с неподвижной фокусирующей трубкой было проведено 2 серии ПФЭ 2^5.

Область варьирования входных факторах в экспериментах

представлены в таблицах 3.6 и 3.7.

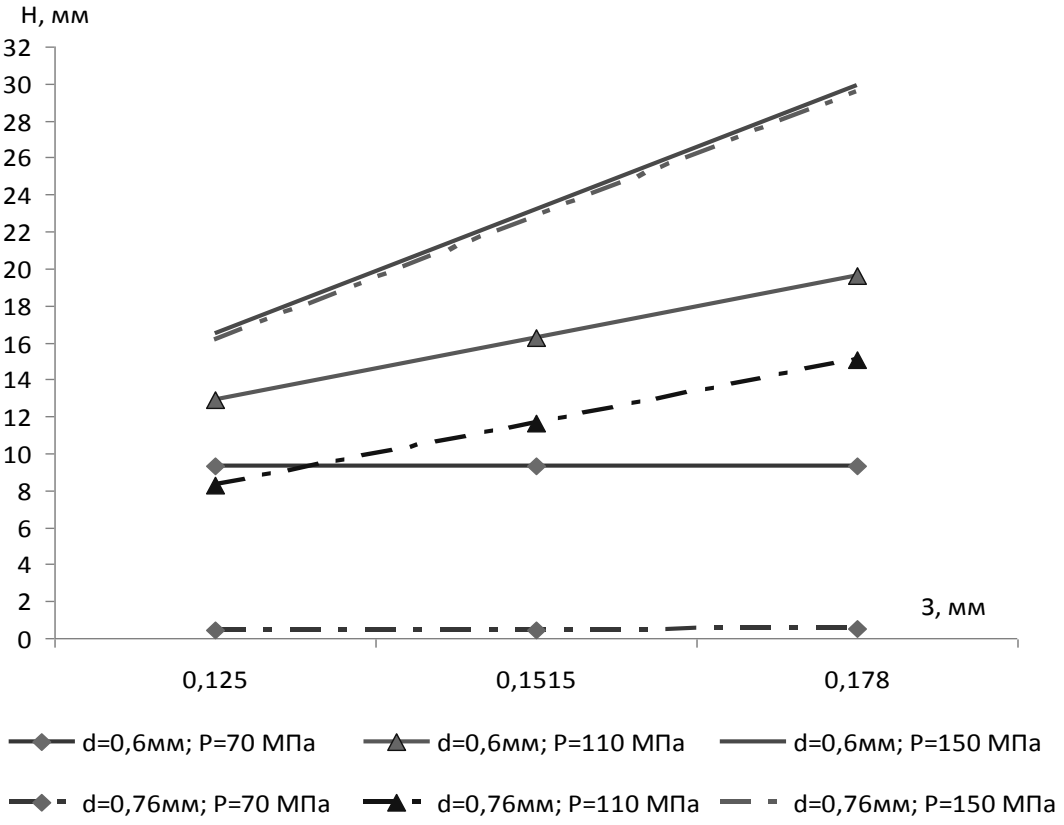


Рисунок 3.12 – Зависимость величины расслоения стеклотекстолитов от среднего размера абразивного зерна при прошивке с различными значениями давления (*Q=150 г/мин; l=3мм*)

Таблица 3.6 -Область варьирования входных факторов в эксперименте № 3

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьиования Δx
	-1	0	1	
Давление *P*, *МПа*	70	110	150	40
Расход абразива *Q*, *г/мин*	100	150	200	50
Расстояние от фокусирующей трубки до материала *l*, *мм*	2	3	4	1
Диаметр фокусирующей трубки *d*, *мм*	0,6	0,68	0,76	0,08
Средний размер абразивного зерна *З*, *мм*	0,125	0,1515	0,178	0,0265

Таблица 3.7- Область варьирования входных факторов в эксперименте № 4

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьиования Δx
	-1	0	1	
Давление *P*, *МПа*	70	110	150	40
Расход абразива *Q*, *г/мин*	100	150	200	50
Расстояние от фокусирующей трубки до материала *l*, *мм*	2	3	4	1
Диаметр фокусирующей трубки *d*, *мм*	0,76	0,89	1,02	0,13
Средний размер абразивного зерна *З*,*мм*	0,125	0,1515	0,178	0,0265

Планы экспериментов, результаты их обработки, проверка гипотезы однородности дисперсии опытов, расчет доверительного интервала коэффициентов уравнения регрессии и проверка адекватности модели представлены в приложении А. Полученные уравнения регрессии представлены в таблице 3.8.

Ранжирование эффектов факторов представлено на рисунках 3.13, 3.15.

Дисперсионный анализ представлен на рисунках 3.14, 3.16.

По результатам экспериментов можно отметить, что давление прошивки оказывает наиболее существенное влияние на величину расслоения материала (как и в случае прошивки с движением фокусирующей трубки по окружности). С ростом давления прошивки возрастает величина расслоения материала (рисунок 3.17) на всем диапазоне варьирования диаметров фокусирующих трубок.

Размер абразивного зерна не оказывает существенного влияния на величину расслоения при значении давления прошивки *70 МПа* (рисунок 3.18). При увеличении давления прошивки с ростом размера абразивного зерна наблюдается рост величины расслоения материала.

Аналогичная закономерность характерна и для случая прошивки материала с траекторией движения фокусирующей трубки по окружности.

Таблица 3.8 - Результаты обработки экспериментов по прошивке стеклотекстолита СТЭФ-I, 1с-20,0 ГОСТ 12652-74 с неподвижной фокусирующей трубкой

№ эксп.	Интервал варьирования *d*, мм	Уравнение регрессии в кодированном виде	Уравнение регрессии в натуральном виде
3	0,6-0,76	$y(H)=23{,}282+14{,}761x_1+1{,}525x_2+2{,}255x_4+1{,}738x_5+$ $+1{,}349x_1x_2+1{,}7386x_1x_5-1{,}143x_2x_3+1{,}726x_2x_4+$ $+1{,}19x_3x_4-0{,}829x_1x_2x_3+1{,}575x_1x_3x_4-2{,}002x_2x_3x_4-$ $-1{,}11x_1x_2x_3x_4$ (3.6)	$H= -54{,}487+2{,}376P+0{,}02Q+50{,}078l+129{,}281d-$ $-114{,}774З-0{,}011PQ-0{,}98Pl -3{,}96Pd+ 1{,}64PЗ-0{,}156Ql -$ $-0{,}356Qd-78{,}66ld + 0{,}004PQl+0{,}021PQd+1{,}533Pld+$ $+0{,}263Qld-0{,}007PQld$ (3.7)
4	0,76-1,02	$y(H)=25{,}689+20{,}196x_1+1{,}784x_3+0{,}873x_5+$ $+1{,}724x_1x_3+3{,}395x_1x_4+0{,}873x_1x_5-1{,}007x_2x_3-$ $-2{,}69x_2x_4-0{,}661x_1x_2x_3-1{,}89x_1x_2x_4-0{,}651x_2x_3x_5+$ $+2{,}138x_2x_3x_4+1{,}279x_1x_2x_3x_4-0{,}942x_1x_2x_3x_5$ (3.8)	$H = 95{,}655-2{,}208P-0{,}293Q-0{,}452l-225{,}16d+601{,}05З+$ $+0{,}0125PQ+0{,}3455Pl+ 3{,}9568Pd-7{,}175PЗ-0{,}017Ql+$ $+1{,}022Qd-4{,}39QЗ+31{,}828ld-219{,}567lЗ-0{,}022PQd-$ $-0{,}738Pld+0{,}053PQЗ- 0{,}002PQl+1{,}464QlЗ+$ $+2{,}66PlЗ- 0{,}212Qld-0{,}0178PQlЗ+0{,}005PQld$ (3.9)

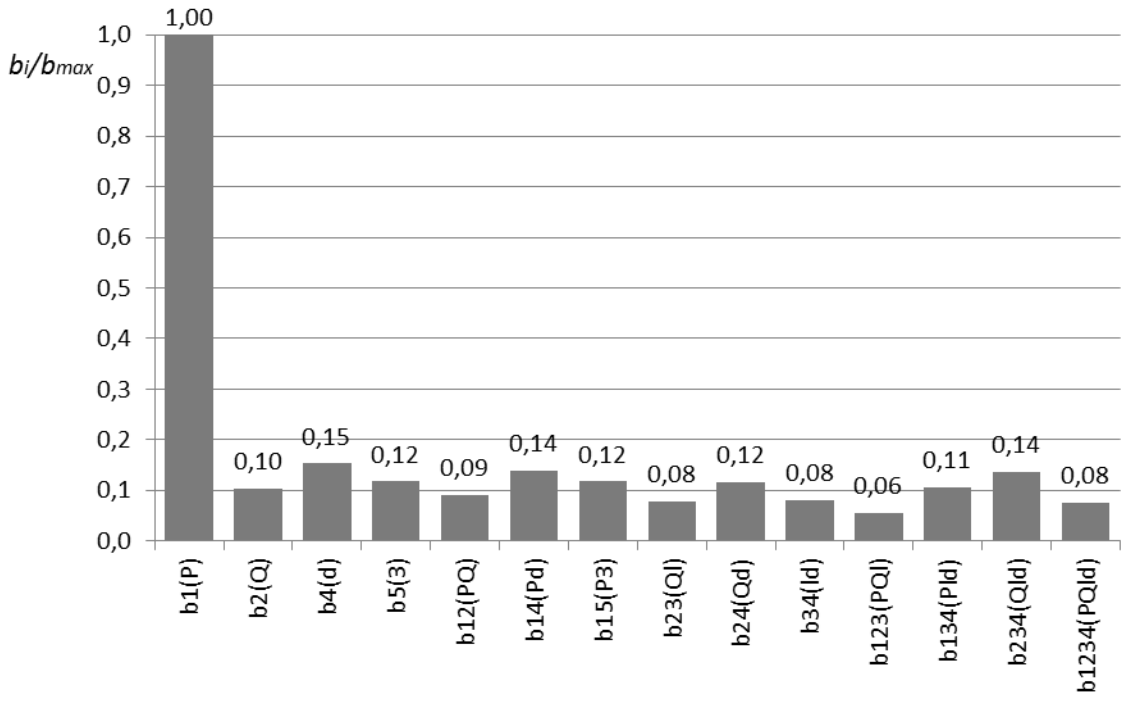


Рисунок 3.13 - Ранжирование эффектов факторов по t - критерию, регрессионный анализ (ПФЭ 2^5 № 3)

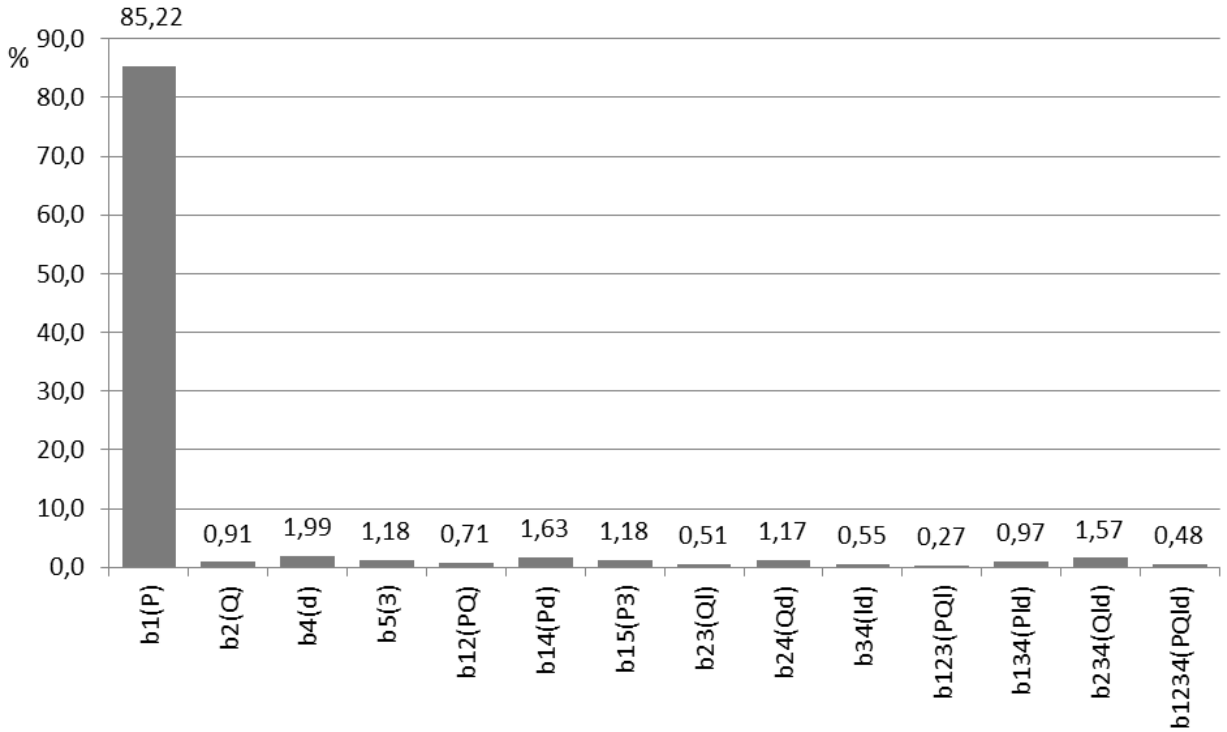


Рисунок 3.14- Ранжирование эффектов факторов по F - критерию (критерию Фишера), дисперсионный анализ (эксперимент №3)

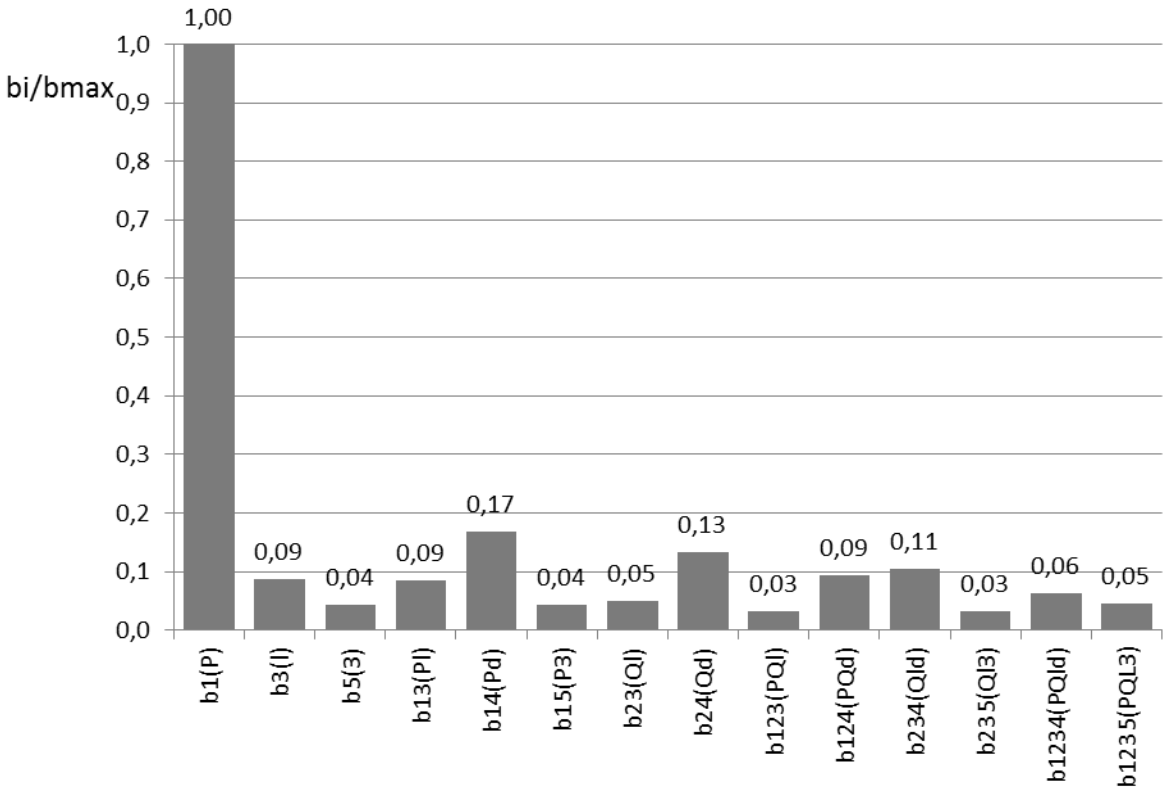


Рисунок 3.15 - Ранжирование эффектов факторов по t - критерию, регрессионный анализ (ПФЭ 2^5 № 4)

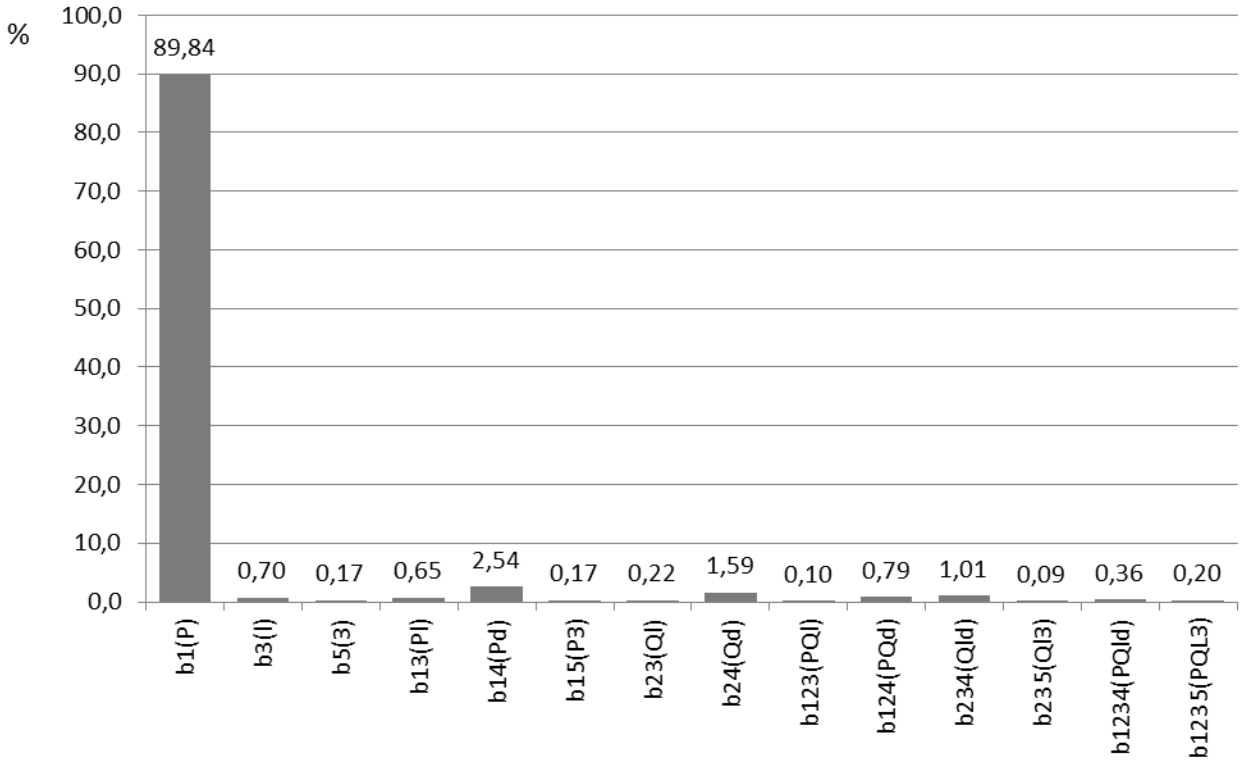


Рисунок 3.16 - Ранжирование эффектов факторов по F - критерию, дисперсионный анализ (ПФЭ 2^5 №4)

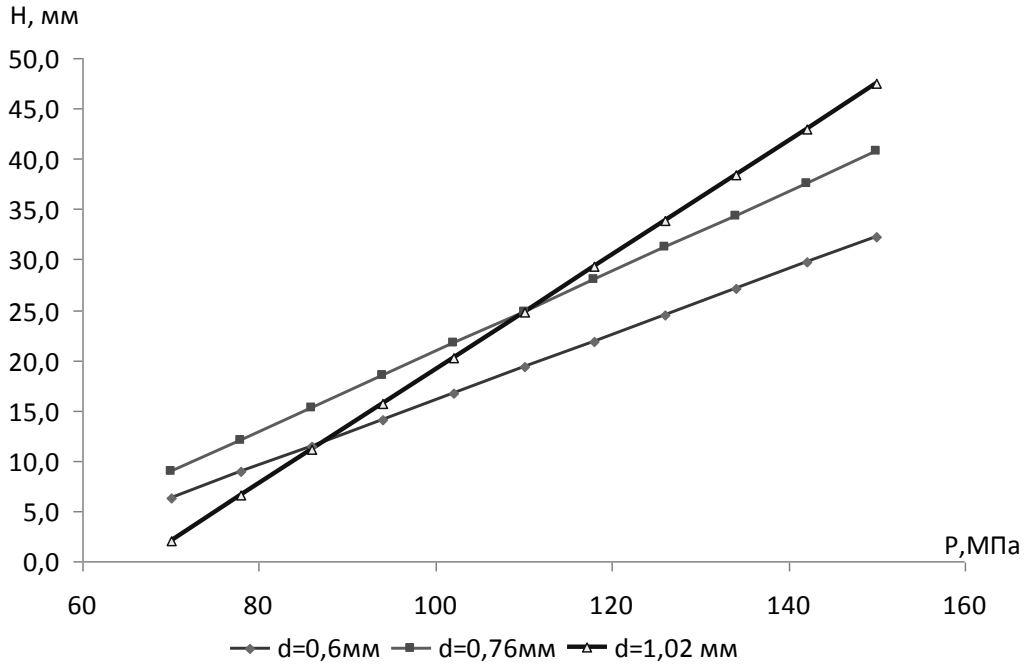


Рисунок 3.17 – Зависимость величины расслоения стеклотекстолита СТЭФ-I, 1с, 20,0 от давления истечения струи при прошивке с неподвижной фокусирующей трубкой различного диаметра (*Q=150 г/мин; l=3мм*)

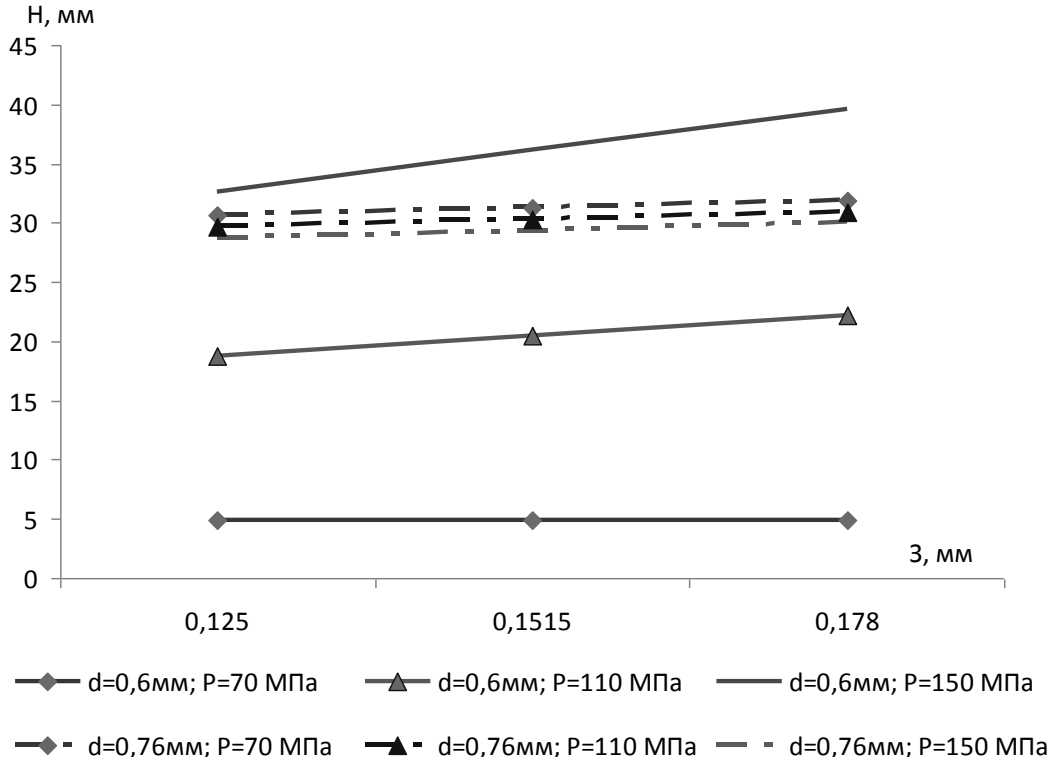


Рисунок 3.18 – Зависимость величины расслоения стеклотекстолита СТЭФ-I, 1с, 20,0 от среднего размера абразивного зерна при прошивке с неподвижной фокусирующей трубкой (*Q=200 г/мин; l=4мм*)

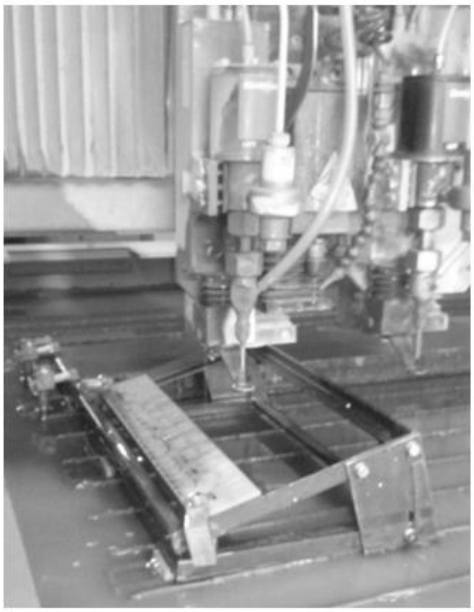
3.3 Исследование влияния режимов прошивки под углом к поверхности резания на величину и глубину расслоений поверхности деталей из стеклотекстолита

В конструкции множества деталей в машиностроении часто встречаются наклонные и конические поверхности. Для обработки данных поверхностей эффективно используются системы гидроабразивной резки с возможностью трехмерной обработки.

В деталях из стеклотекстолитов также встречаются наклонные и конические поверхности в виде фасок, конических отверстий для крепежа и др. Поэтому была поставлена задача исследования влияния режимов прошивки под углом к поверхности резания на величину и глубину расслоений стеклотекстолита.

Для изменения угла поверхности резания было разработано и изготовлено приспособление (рисунок 3.19), позволяющее устанавливать обрабатываемый образец под углом до 30º с точностью $\pm 30'$.

а)



б)

Рисунок 3.19 - Приспособление для изменения угла поверхности резания а) общий вид; б) увеличено

Предварительно был проведен ряд тестовых прошивок для определения зависимости величины расслоения материала от следующих параметров:

– диаметр фокусирующей трубки;
– давление прошивки;
– средний размер абразивного зерна;
– расстояние от фокусирующей трубки до материала;
– объем абразива при прошивке.

Выяснено, что характер возникновения и величина расслоения материала при прошивке с наклоном поверхности резания и без ее наклона аналогичны и наибольшее влияние на величину расслоения оказывает давление прошивки.

Поэтому для исследования влияния режимов прошивки под углом к поверхности резания на величину и глубину расслоений поверхности деталей из стеклотекстолита был проведен ряд экспериментов, в которых варьируемыми параметрами были: угол наклона поверхности резания и давление прошивки (таблица 3.9).

Таблица 3.9 - Величина расслоения материала в зависимости от угла наклона поверхности резания при прошивке

Давление прошивки, *МПа*	Угол наклона поверхности резания, °				
	Величина расслоения материала, *мм*				
	0	5	10	15	20
70	0	0	0	0	0
150	16,09	14,64	16,75	15,64	18,24

Эксперимент проводили при следующих условиях:

– марка материала: СТЭФ-1,1с-20,0 ГОСТ 12652-74;

– диаметр фокусирующей трубки *d=0,76мм*;

– средний размер абразивного зерна 0,178 мм;

– расстояние от фокусирующей трубки до материала *l=4 мм*;

– объем абразива при прошивке *Q=200 г/мин*;

– прошивка с движением фокусирующей трубки по окружности Ø1мм.

Выяснено, что характер возникновения и величина расслоения материала при прошивке с наклоном поверхности резания и без ее наклона аналогичны (рисунок 3.20). На величину расслоения материала наиболее сильно влияет давление прошивки. С увеличением давления прошивки увеличивается размер расслоений. При давлении прошивки *70-76* МПа размер величина расслоения не превышает 2 мм. Расслоения материала, как и в случае без наклона поверхности резания, образуются в верхних слоях материала.

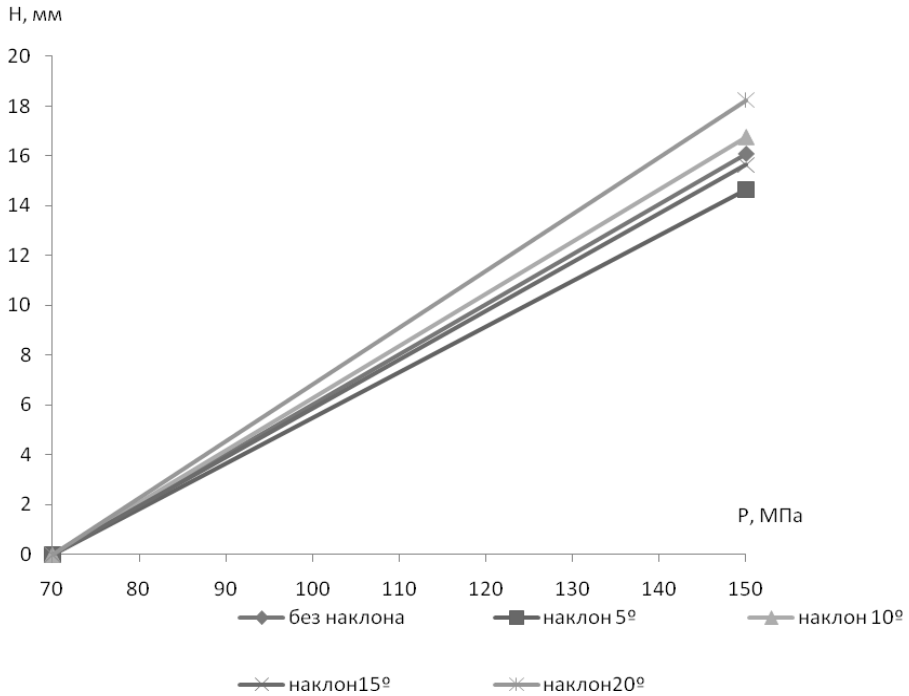


Рисунок 3.20 – Зависимость величины расслоения стеклотекстолита СТЭФ-I, 1с, 20,0 от давления при прошивке при различных углах наклона поверхности резания

3.4 Анализ особенностей расслоения поверхности деталей из стеклотекстолита при резании гидроабразивной струей

Как показали экспериментальные исследования и производственный опыт гидроабразивного резания стеклотекстолитов, на возникновение расслоений существенно влияют две группы факторов:

1) режимы прошивки материала и характер движения фокусирующей трубки при прошивке;

2) свойства материала на момент его обработки [107].

Факторы первой группы являются «управляемыми», и подробный анализ их влияния на возникновение и величину расслоений проведен в разделах 3.1-3.3.

Факторы второй группы являются «неуправляемыми», поскольку материал в состоянии поставки обладает определенным набором физико-механических свойств, приобретенных им во время изготовления, которые невозможно изменить с целью улучшения обрабатываемости данного материала.

В разделе 2.2 была установлена зависимость касательных напряжений, возникающих в материале во время прошивки от свойств обрабатываемого материала. Однако, стеклотекстолитам, как и остальным прессованным стеклопластикам, присуща неоднородность структуры, а следовательно, и механических свойств [109].

На прочность стеклотекстолитов сильное влияние оказывают дефекты структуры материала, которые разделяют на два вида: макроскопические и микроскопические [109,110].

К микродефектам относятся микропустоты и поры, являющиеся, в частности, следствием неравномерной пропитки стеклянных нитей, разрушение отдельных волокон и участков связующего, местный изгиб отдельных волокон, отсутствие адгезионной связи между связующим и наполнителем на отдельных участках и т.д. К макродефектам относятся:

разрывы и местный изгиб стеклянных нитей и прядей, отклонения их ориентации от заданных оптимальных направлений и т.д. [109].

Расслоению материала предшествуют локальные разрушения, возникающие вследствие дефектов, имеющих место в армирующих волокнах и полимерной матрице. Исследования [110] показали, что концентрация напряжений в местах разрыва волокон является источником возникновения начальных микротрещин, которые впоследствии при нагружении (прошивке струей) могут развиваться по разным направлениям, и прежде всего, вдоль волокна. В этом случае наблюдается расслоение системы смола – стекловолокно, причем разрыв связи может неограниченно распространяться вдоль стекловолокна. При прошивке материала струей этот процесс усугубляется воздействием «гидроклина». Начальные микротрещины могут быть вызваны и дефектами полимерной матрицы: наличием пузырьков воздуха, газа или инородными включениями. Зарождение трещин в смоле изучено в опытах Фелтнера [111]: рост трещин происходит в областях окружающих воздушные пузырьки или инородные включения. Это является начальной стадией разрушения [110].

Особенностью гидроабразивного резания полимерных материалов является то, струя в процессе прошивки имеет избирательную способность, которая проявляется в том, что отрыв мельчайших частиц (образование стружки) происходит не по плоскости скалывания, определяемой геометрией режущего инструмента, как это наблюдается при способах механической обработки, а по наиболее ослабленным участкам материала: царапинам, микротрещинам микропустотам и другим концентраторам напряжений. Жидкость, внедряясь по этим трещинам и создавая мощные мгновенные давления внутри материала, расслаивает его [1].

Чем больше размер и количество дефектов в материале, тем ниже его прочность, и при нагружении перпендикулярно к направлению армирования эти дефекты в сочетании с концентрацией напряжений вокруг волокон приводят к расслоению материала.

Дефекты в материале неизбежно образуются в процессе их изготовления [109,110], и это связано с невозможностью получения армирования и полимерной матрицы без дефектов, а также в процессе их транспортировки и хранения с течением времени.

Неоднородность структуры стеклотекстолитов приводит к значительному разбросу показателей прочностных и упругих свойств. Как показали исследования [109], коэффициент вариации пределов прочности и модулей упругости стеклопластиков обычно составляет 10-30%, в то время как для металлов он редко превышает 5%.

Во время экспериментальных исследований было выявлено, что вероятность появления расслоений в материале при прошивке возрастает с увеличением длительности хранения материала. Для исследования влияния длительности хранения материала на количество расслоений в материале при прошивке бал проведен ряд экспериментов. В листовой заготовке при одинаковых технологических режимах каждые 3 месяца в течение 36 месяцев производилось по 10 прошивок и определялось количество прошивок с расслоениями.

Эксперимент проводили при следующих технологических режимах:

– материал: СТЭФ-I,1с-20,0 ГОСТ 12652-74;
– давление при прошивке: P=70МПа;
– диаметр фокусирующей трубки d=0,76 мм;
– абразив со средним размером абразивного зерна *0,178 мм*;
– расстояние от фокусирующей трубки до материала *l=4мм*;
– расход абразива при прошивке Q=200 г/мин;
– прошивка с движением фокусирующей трубки по окружности *Ø 1мм*.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.21.

Выяснено, что с увеличением длительности хранения материала увеличивается вероятность расслоения стеклотекстолита при прошивке. Это связано с ростом количества микродефектов в материале.

Образование микродефектов в процессе хранения и транспортировки в

основном связано с неправильной укладкой листового материала, длительным воздействием и перепадов температур и влажности и т.д.

Исходя из сказанного, для качественной вырезки деталей из стеклотекстолитов методом гидроабразивной резки необходимо учитывать обе группы факторов, влияющих на появление расслоений.

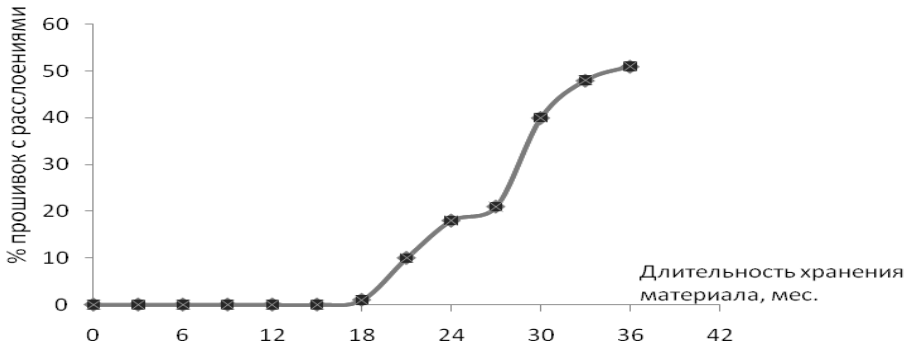


Рисунок 3.21 – Зависимость количества расслоений, образующихся в материале при прошивке от длительности хранения материала

3.5 Выводы по третьей главе

1. Экспериментальными исследованиями доказана возможность применения метода гидроабразивной резки для обработки деталей из стеклотекстолитов.

2. Экспериментально получены зависимости величины расслоения материала от технологических режимов и характера движения фокусирующей трубки при прошивке.

Выяснено, что для обработки стеклотекстолитов предпочтительнее выбирать прошивку с движением фокусирующей трубки по окружности. Это связано с лучшим отводом отработанной абразивно-жидкостной смеси из зоны резания.

На величину расслоения также значительно (до 90%) влияет давление при прошивке. С ростом давления увеличивается размер расслоения материала.

Выяснено, что на величину расслоения стеклотекстолита при прошивке с движением фокусирующей трубки по окружности также оказывают средний размер абразивного зерна (до 12,5%) и диаметр выходного отверстия фокусирующей трубки (до 9,5%). С увеличением размера абразивного зерна увеличивается величина расслоений. С увеличением диаметра выходного отверстия фокусирующей трубки размер расслоений уменьшается.

При прошивке с движением фокусирующей трубки по окружности необходимо назначать следующие параметры:

– давление прошивки: $P=70...76$ МПа;
– диаметр фокусирующей трубки: $d=0,76...1,02$ мм;
– абразив со средним размером зерна *0,125мм*.

3. Выяснено, что характер возникновения и величина расслоения стеклотекстолита при прошивке с наклоном поверхности резания и без ее наклона аналогичны: на величину расслоения материала наиболее существенно влияет давление при прошивке.

4. На основании экспериментальных исследований и производственного опыта гидроабразивного резания стеклотекстолитов факторы, влияющие на возникновение расслоений при прошивке предложено разбить на две группы:

1) «управляемые» - режимы прошивки материала и характер движения фокусирующей трубки при прошивке;

2) «неуправляемые» - свойства материала на момент его обработки.

Определена функциональная зависимость величины максимального расслоения материала, образующегося при прошивке, от длительности его хранения (фактор второй группы), что позволяет делать коррекцию режимов прошивки стеклотекстолитов с учетом длительности хранения. Установлено, что при хранении материала более 18 месяцев необходимо проводить коррекции режимов прошивки и траектории движения фокусирующей трубки.

Глава 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ

Как было отмечено в разделе 3.4, на возникновение и величину расслоений стеклотекстолитов при прошивке гидроабразивной струей влияет ряд факторов, в том числе и «неуправляемых» или «случайных». В связи с этим возникает необходимость разработки методики, в которой будут содержаться не только рекомендации по выбору технологических режимов («управляемых» факторов), но и учитываться воздействие «неуправляемых» факторов на процесс прошивки с целью получения необходимого качества обработки.

4.1 Количественная оценка обрабатываемости стеклотекстолитов по коэффициенту относительной обрабатываемости по расслоению

Внедрение новых технологий и методов обработки, а также усовершенствование существующих вызывают необходимость оценки обрабатываемости материалов. Обрабатываемость - важнейшее технологическое свойство, которое характеризует совокупность качеств материала, определяющих его способность подвергаться обработке.

Обрабатываемость материалов резанием можно оценить различными показателями: качеством обработанной поверхности; стойкостью режущего инструмента; силами, возникающими при резании; скоростью резания; типом стружки; и т.п.

В качестве количественной оценки обрабатываемости резанием пластмасс предлагался ряд критериев [49,62]. Среди них: критерий оценки обрабатываемости по скорости резания, критерий оценки обрабатываемости по стойкости инструмента, критерий оценки обрабатываемости по силе резания, критерий оценки обрабатываемости по средней температуре в зоне

резания, критерий оценки обрабатываемости по энергозатратам и др. (таблица 4.1).

Таблица 4.1- Основные критерии обрабатываемости материалов

Критерий обрабатываемости	Формула определения
Стойкость режущего инструмента	$K_T = \frac{T}{T_{эт}}$ (4.1)
Скорость резания	$K_v = \frac{v}{v_{эт}}$ (4.2)
Сила резания	$K_P = \frac{P}{P_{эт}}$ (4.3)
Средняя температура в зоне резания	$K_t = \frac{t}{t_{эт}}$ (4.4)
Энергозатраты	$K_Э = \frac{Э}{Э_{эт}}$ (4.5)

где: K_T, K_v, K_P, K_t, $K_э$ – коэффициенты относительной обрабатываемости по стойкости, скорости, силе резания, средней температуре в зоне резания, энергозатратам соответственно;

T, v, P, t, Э - стойкость, скорость, сила резания, средняя температура в зоне резания, энергозатраты при обработке оцениваемого материала;

$T_{эт}$, $v_{эт}$, $P_{эт}$, $t_{эт}$, $Э_{эт}$ - стойкость, скорость, сила резания, средняя температура в зоне резания, энергозатраты при обработке эталонного материала.

Выбор критерия обрабатываемости зависит от целей и требований конкретного производства. Например, в случае интенсивного износа режущего инструмента основными являются критерии обрабатываемости по стойкости инструмента; если на первый план выступает повышение производительности обработки – выбираются критерии, обеспечивающие максимальную подачу или скорость резания; при обработке нежестких деталей - силу резания и т.д.

Основной проблемой гидроабразивного резания стеклотекстолитов является возникновение расслоений при их прошивке. Поэтому предложено проводить оценку обрабатываемости листовых стеклотекстолитов по коэффициенту относительной обрабатываемости по критерию величины расслоения (коэффициент обрабатываемости по расслоению) K_H.

Коэффициент обрабатываемости по расслоению представляет собой отношение величины расслоения обрабатываемого материала H к величине расслоения эталонного материала при технологических режимах, полученных экспериментально для данной толщины $H_{эт}$:

$$K_H = \frac{H}{H_{эт}} \ , \qquad (4.6)$$

где H - величина расслоения обрабатываемого материала, мм;

$H_{эт}$ - величина расслоения эталонного материала при прошивке на технологических режимах, полученных экспериментально, мм.

Чем больше коэффициент обрабатываемости по расслоению, тем более отличны свойства обрабатываемого материала от эталонного.

При отсутствии расслоения принимаем величину расслоения $H=1$, что соизмеримо с диаметром отверстия, образующегося в материале при прошивке.

Количественная оценка обрабатываемости стеклотекстолитов по расслоению является крайне важной характеристикой, позволяющей специалисту, составляющему раскрой материала решить следующие задачи:

1. Определение необходимости корректировки технологических режимов прошивки.

2. Определение целесообразности увеличения межлекального расстояния в раскрое. Межлекальное расстояние при раскрое большинства материалов составляет 6-8 мм (рисунок 4.1).

Данное значение обеспечивает отсутствие зарезов на деталях от прошивок и перемычек, жесткость положения детали в процессе ее обработки (отсутствие вибраций), безопасное и легкое извлечение деталей

после их обработки. Для исключения распространения расслоения на обрабатываемые детали, межлекальное расстояние должно быть больше величины расслоения на 50-60% (рисунок 4.2). При этом расслоение остается в отходе материала, а полученные детали являются годными. Однако при размерах расслоения, больших 10-12 мм значение межлекального расстояния в раскрое должно быть не менее 15 мм. Такой раскрой материала становится нерациональным с точки зрения расхода материала. В данном случае для экономии раскраиваемого материала будет необходимо применение специальных технологических мероприятий по ограничению распространения расслоений на поверхность детали.

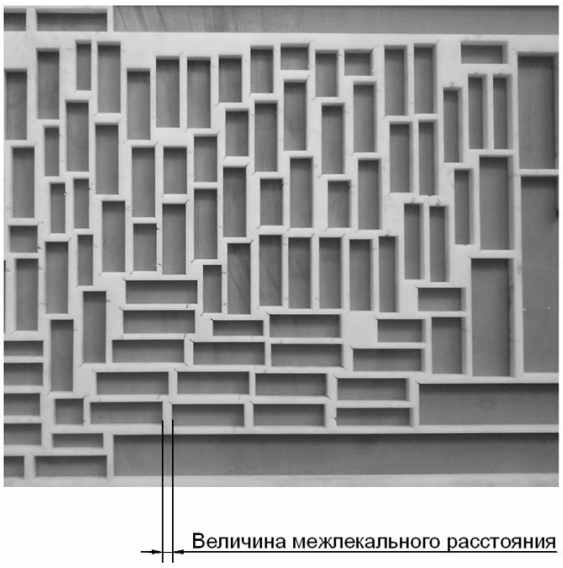


Рисунок 4.1 - Отход материала после раскроя деталей методом ГАР

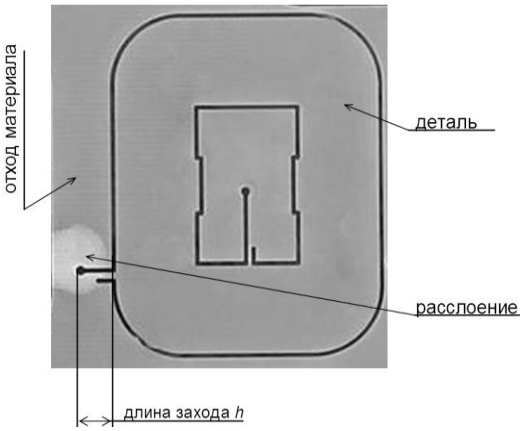


Рисунок 4.2 - Расслоение материала, не приводящее к браку детали

3. Определение необходимости увеличения расстояния *h* удаления точки прошивки от обрабатываемого внутреннего контура (рисунок 4.3).

Поскольку при обработке внутренних контуров детали (окон, отверстий и т.д.) вырезанный материал является отходом, то увеличение расстояния *h* не приводит к увеличению нормы расхода материала, однако, способствует увеличению длины пути резания, и, следовательно, увеличению времени обработки детали и норм расхода абразива.

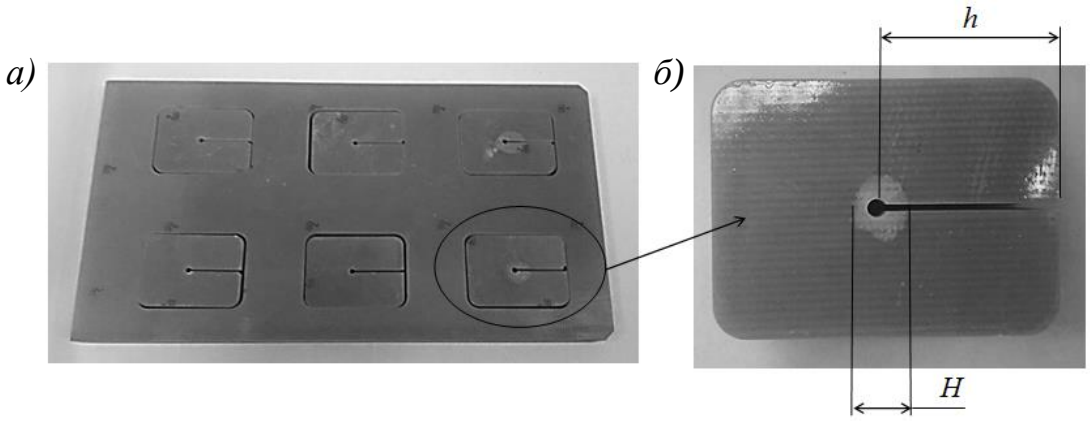


Рисунок 4.3 - Заход к обрабатываемому контуру: а) общий вид; б) увеличено

4. Определение возможности обработки внутренних поверхностей деталей (отверстий, окон и т.д.) из данного материала (рисунок 4.4). В ряде случаев целесообразнее производить обработку только наружного контура детали и достаточно больших сквозных элементов (от 10-15 мм), а обработку оставшихся внутренних контуров выполнять способами механической обработки.

Исходя из цели экономии раскраиваемого материала, автором предложено разделить листовой материал из стеклотекстолитов на группы по величине коэффициента обрабатываемости по расслоению:

- к первой группе относится листовой материал, со значением коэффициента относительной обрабатываемости по расслоению $K_H \leq 5$. Обрабатываемый материал считается близким по своим свойствам к эталонному;
- ко второй группе относится листовой материал, со значением

коэффициента относительной обрабатываемости по расслоению $5 < K_H \leq 10$. Для исключения возникновения брака при обработке данных материалов необходима корректировка эталонных режимов прошивки:

– снижение давления при прошивке;
– увеличение диаметра фокусирующей трубки.

В ряде случаев возникает необходимость увеличения межлекального расстояния в раскрое;

- к третьей группе относится листовой материал, со значением коэффициента относительной обрабатываемости по расслоению $K_H > 10$. При данных значениях необходима не только корректировка технологических параметров прошивки, но и проведение специальных мероприятий по исключению распространения расслоений на обрабатываемый контур.

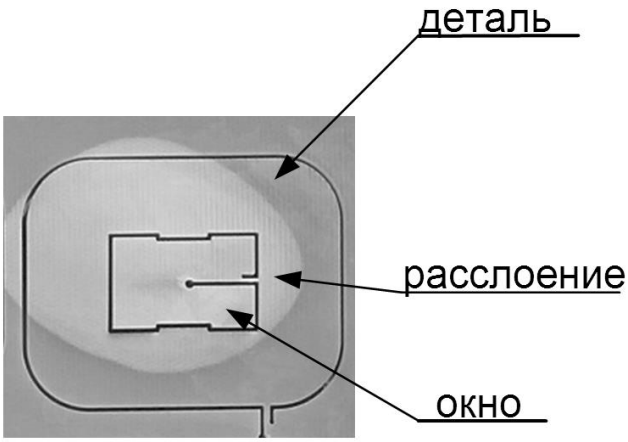


Рисунок 4.4 - Расслоение, образующееся при пирсинге материала при обработке внутреннего контура и приводящее к браку детали

Отметим, что данная классификация хорошо применима для обработки наружных контуров. Для определения целесообразности обработки внутренних контуров необходимо сопоставление размеров расслоения и внутреннего контура.

4.2 Методика диагностирования и определения коэффициента относительной обрабатываемости по расслоению обрабатываемого стеклотекстолита

Для объективной оценки обрабатываемости стеклотекстолитов методом гидроабразивной резки была разработана методика диагностирования материала и определения коэффициента относительной обрабатываемости по расслоению листовых стеклотекстолитов.

Диагностирование материала необходимо производить непосредственно перед его обработкой. Поскольку каждая листовая заготовка «уникальна» по своим физико-механическим свойствам, необходимо производить диагностирование каждой листовой заготовки партии.

На основании данной методики можно записать следующий алгоритм последовательности выполнения приемов для диагностирования стеклотекстолита и определения коэффициента его относительной обрабатываемости по расслоению:

1. Перед диагностированием материала подготавливается предварительная управляющая программа раскроя деталей, в которой содержатся не только контуры деталей, подлежащих обработке, но и несколько прошивок в различных точках листовой заготовки. В первую очередь выполняются тестовые прошивки. На стандартной листовой заготовке (*~1000* х *1200 мм*) достаточно выполнить 8-10 тестовых прошивок. Прошивку необходимо производить в местах будущих отходов материала (между деталями, в окнах или отверстиях). Примерное расположение точек прошивок показано на рисунке 4.5. Технологические режимы прошивки назначаются в соответствии с эталонными (таблица 4.2). При обработке листовых заготовок, толщиной менее 5 мм необходимо применение подложек (фанера, специальный сетчатый настил и т.п.) для исключения прогиба материала при его обработке.

Таблица 4.2 - Эталонные режимы прошивки для электротехнического стеклотекстолита СТЭФ-I 1с ГОСТ12652-74

Толщина материала, *мм*	Траектория движения фокусирующей трубки при прошивке	Значение эталонного расслоения *Нэт, мм*	Критическое давление прошивки, *МПа*	Рекомендуемое давление прошивки, *МПа*	Диаметр фокусирующей трубки, *мм*	Средний размер абразивного зерна, мм
1	С движением фокусирующей трубки по окружности *Ø 1 мм*	1	62	76	0,76	0,125
5			62	76		
10			64	72		
15			64	72		
20			66	70		
30			66	70		
40			68	70		
50			68	70		
1	С неподвижной фокусирующей трубкой	1	66	72	0,76	0,125
5		1	66	70		
10		1	68	70		
15		1	68	70		
20		1	68	70		
30		2	68	70		
40		2	68	70		
50		2	68	70		

Примечание: критическое давление прошивки – значение, при котором начинают наблюдаться засорения фокусирующей трубки

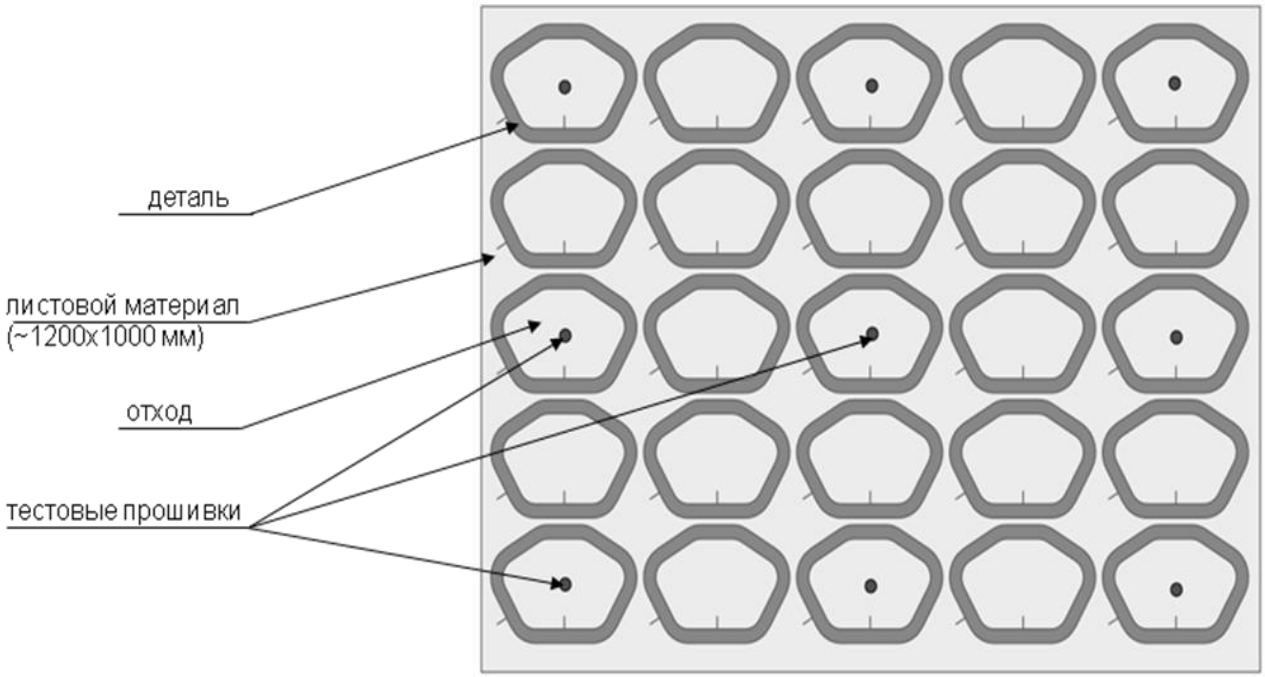


Рисунок 4.5 - Пример расположения тестовых прошивок в раскрое деталей при диагностировании материала на обрабатываемость по расслоению

2. Произвести тестовые прошивки. Остановить работу установки. Оценить величину максимального расслоения, образующегося при прошивке.

3. Рассчитать коэффициент обрабатываемости материала по расслоению по формуле (4.6).

4. Определить, к какой группе относится партия данного материала:

- если материал относится к первой группе ($K_H \leq 5$) обрабатываемый материал считается близким по своим свойствам к эталонному материалу. Поэтому обработку следует производить на эталонных режимах. Сравнив величины расслоения с межлекальным расстоянием в раскрое и расстоянием удаления точки прошивки от обрабатываемого контура, определяется необходимость корректировки раскроя с точки зрения расположения деталей друг относительно друга и увеличения длинны захода к обрабатываемому контуру;

- если материал относится ко второй группе ($5 < K_H \leq 10$) необходима корректировка технологических параметров прошивки:

– снижение величины давления прошивки материала (давление прошивки материала при этом не должно быть ниже значения критического давления прошивки материала, во избежание засорения фокусирующей трубки);

– использование фокусирующей трубки большего диаметра (например, с диаметром выходного отверстия *1,02 мм*).

Также определяется целесообразность увеличения межлекальных расстояний в раскрое до значений *10-12 мм*;

- если партия материала относится к третьей группе ($K_H > 10$), то физико-механические свойства обрабатываемого материала и эталонного материала существенно различаются. Если корректировка технологических режимов прошивки не приводит к значительному уменьшению величины расслоения, необходимо проведение специальных технологических мероприятий по исключению распространения расслоений на поверхность детали, описанных ниже.

5. Произвести необходимые корректировки технологических режимов прошивки и расположения деталей в раскрое и выполнить обработку листового материала.

Как было отмечено в разделе 3.4, в зависимости от длительности и условий хранения материала, его свойства могут изменяться. Поэтому, даже если ранее было произведено диагностирование данного листового материала, перед новым запуском деталей в обработку необходимо снова произвести диагностирование.

4.3 Разработка технологических рекомендаций по коррекции траектории рабочих ходов по критерию относительной обрабатываемости, обеспечивающих повышение качества гидроабразивного резания стеклотекстолитов

После проведения тестовых прошивок, оценки максимальной

величины расслоения материала и расчета коэффициента относительной обрабатываемости по расслоению принимается решение о необходимости корректирования управляющей программы раскроя и технологических режимов прошивки.

При значении $К_Н$>5 требуется корректировка технологических параметров прошивки материала и управляющей программы. Выполняют специальные технологические мероприятия по исключению возникновения расслоений или препятствию их распространения на поверхность обрабатываемой детали.

К данным мероприятиям относятся:

1. Предварительное сверление отверстий диаметром $D_{сверла}$*=2,5-3 мм* в материале для захода струи. Модулем предварительного сверления укомплектовываются установки ведущих зарубежных производителей (рисунок 4.6).

Однако существует ряд недостатков, связанных с его применением:

– установки гидроабразивной резки, поставляющиеся с модулем предварительного сверления отверстий являются достаточно дорогостоящими, и ряд производителей не укомплектовывает свои установки данной функцией;

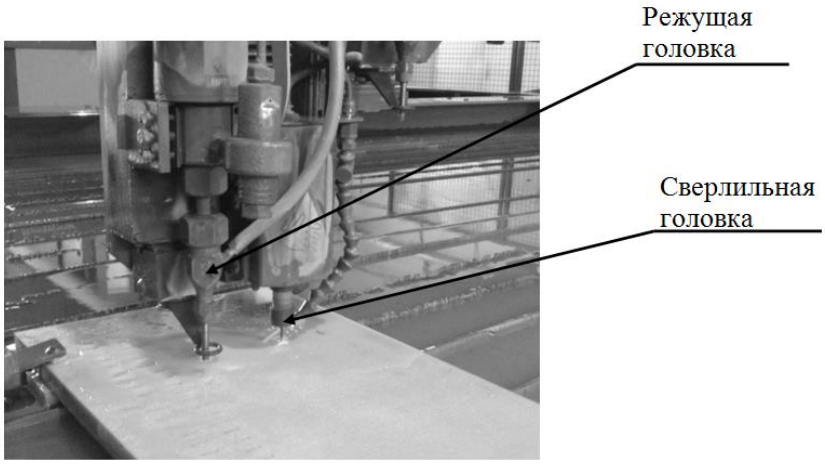


Рисунок 4.6 - Режущая головка установки ГАР, укомплектованная модулем для предварительного засверливания отверстий

– необходимо засверливание отверстий для захода к каждому обрабатываемому контуру. Т.к. количество обрабатываемых контуров в раскрое достигает нескольких сотен, а период стойкости мелкоразмерных сверл T составляет $(0{,}5...2)D_{сверла}$ - для быстрорежущих и $(2...3)D_{сверла}$ - для твердосплавных сверл [62], то очень высока вероятность поломки сверла вследствие его критического износа в процессе обработки. Замена сверла в процессе раскроя листа является достаточно трудоемкой задачей и связана со значительным простоем оборудования.

– существует вероятность поломки сверла при столкновении с металлической кромкой опоры, на которой установлена листовая заготовка. Поэтому необходимо применение специальных подложек даже для толстолистовых материалов или применение дорогостоящих быстроизнашивающихся опорных пластин со вставками из мягких полимерных материалов;

– необходима точная калибровка положения сверла относительно фокусирующей трубки. В противном случае при прошивке струя не попадет в предварительно засверленное отверстие. Калибровку положения инструментов необходимо проводить после каждой их замены. Это достаточно трудоемкая операция, особенно в случае, когда необходима замена инструмента в процессе раскроя (вследствие поломки или износа).[43]

2. Коррекция траектории рабочих ходов.

Данные мероприятия позволяют препятствовать распространению расслоений на поверхность деталей. К коррекции траектории рабочих ходов относят:

1) увеличение длины захода к обрабатываемому контуру.

После выполнения тестовых прошивок определяется величина максимального расслоения материала. Так как расслоение образуется вокруг точки прошивки (рисунок 4.7), длина захода должна быть на 60-70% больше половины величины максимального расслоения.

Данный прием рекомендуется использовать при обработке

крупногабаритных деталей (с размерами более *250-300мм*), когда увеличение длины захода не приводит к значительному увеличению норм расхода материала, а также при обработке внутренних поверхностей детали (отверстия, окна и т.д.), когда материал вырезанных внутренних элементов является отходом.

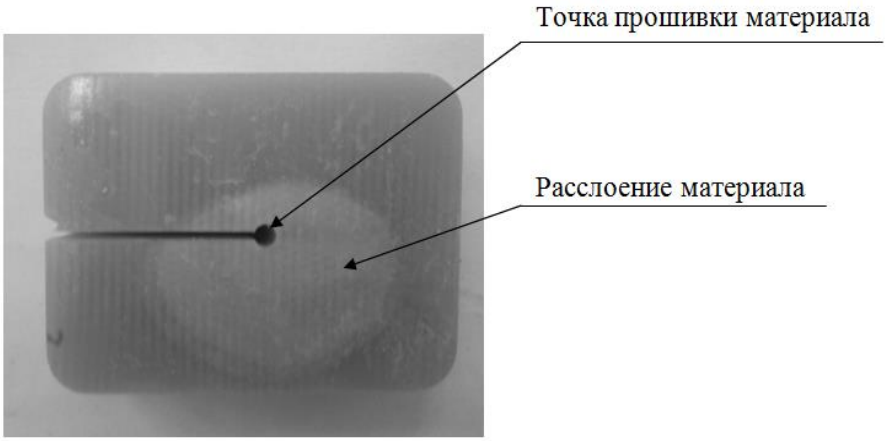


Рисунок 4.7 - Расслоение, образующееся вокруг точки прошивки материала

2) выполнение начала обработки детали вне материала. Данный прием позволяет не выполнять «пирсинг», поэтому расслоения в материале не образуются.

Обработку деталей необходимо производить последовательно, рядами. Точка начала обработки деталей 1-го ряда располагается на расстоянии 0,5-1мм от края листа (рисунок 4.8). Такое расстояние необходимо для исключения возможности столкновения фокусирующей трубки и кромки листового материала, которая может приподниматься в процессе обработки, создавая при этом препятствия для перемещения фокусирующей трубки.

Обработанные детали первого ряда извлекаются из листовой заготовки, и начало обработки деталей второго ряда осуществляется в окнах, оставшихся от извлеченных деталей предыдущего ряда (рисунок 4.9). Аналогично производят обработку последующих рядов.

Данный способ целесообразно применять при обработке деталей с габаритными размерами *≥100 мм* толщиной от *10 мм*, когда время вырезки деталей сравнительно велико и простой оборудования, требуемый для

извлечения деталей, незначителен по сравнению с машинным временем обработки.

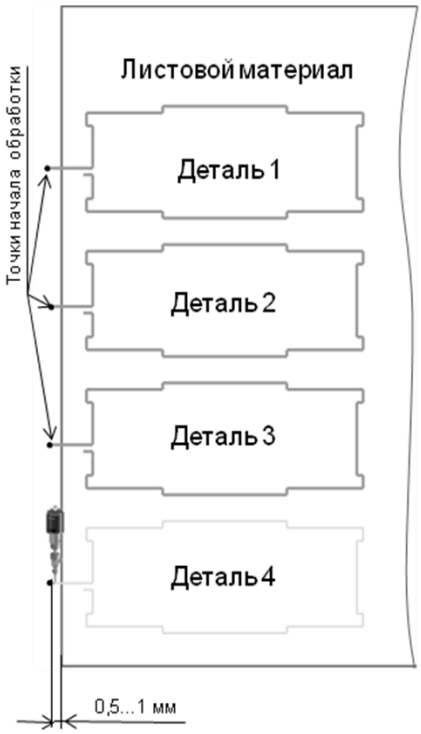


Рисунок 4.8 - Обработка первого ряда деталей в раскрое с точкой начала обработки вне материала

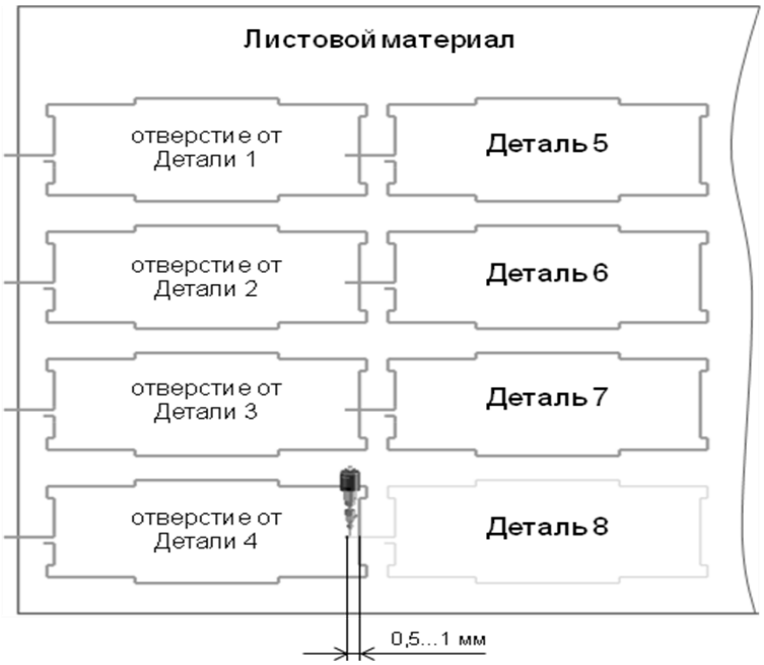


Рисунок 4.9 - Обработка второго ряда деталей в раскрое с точкой начала обработки вне материала

3) применение отсекающих резов [114].

Раскрой листового материала сравнительно небольших толщин (до *10 мм*) происходит с достаточно высокой скоростью. Например, для получения детали с шероховатостью $R_a 3,2$ из материала СТЭФ-I 1с-6,0 скорость резания $1500 мм/мин$, СТЭФ-I 1с-1,0 – до *10 000* мм/мин.

Машинное время обработки деталей из тонколистовых материалов будет значительно ниже времени, требующегося на извлечение вырезанных деталей (до 70-80%). Поэтому для обработки листового материала, толщиной до *10 мм* целесообразнее применять отсекающие резы.

Для этого перед вырезкой 1-ого ряда деталей производится технологический отсекающий рез (рисунок 4.10 *а*). Отсекающий рез производится при максимально возможной подаче, обеспечивающей сквозное прорезание материала. Выполнение отсекающего реза в листовом материале толщиной до *5* мм можно производить без добавления абразива с целью его экономии.

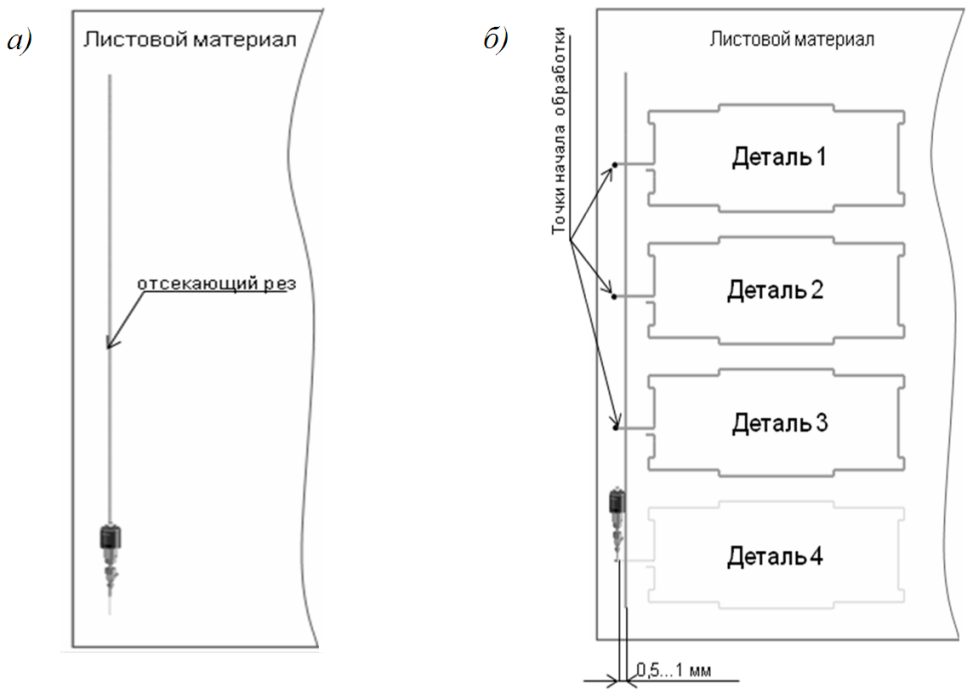


Рисунок 4.10 - Раскрой деталей с применением технологического отсекающего реза: а) выполнение технологического отсекающего реза; б) обработка 1-го ряда заготовок

После выполнения отсекающего реза производится обработка 1-го ряда деталей. При этом прошивка материала производится левее отсекающего реза, а контур самой детали расположен правее него (рисунок 4.10 *б*). Таким образом, отсекающий рез препятствует проникновению расслоения на поверхность детали (рисунок 4.11).

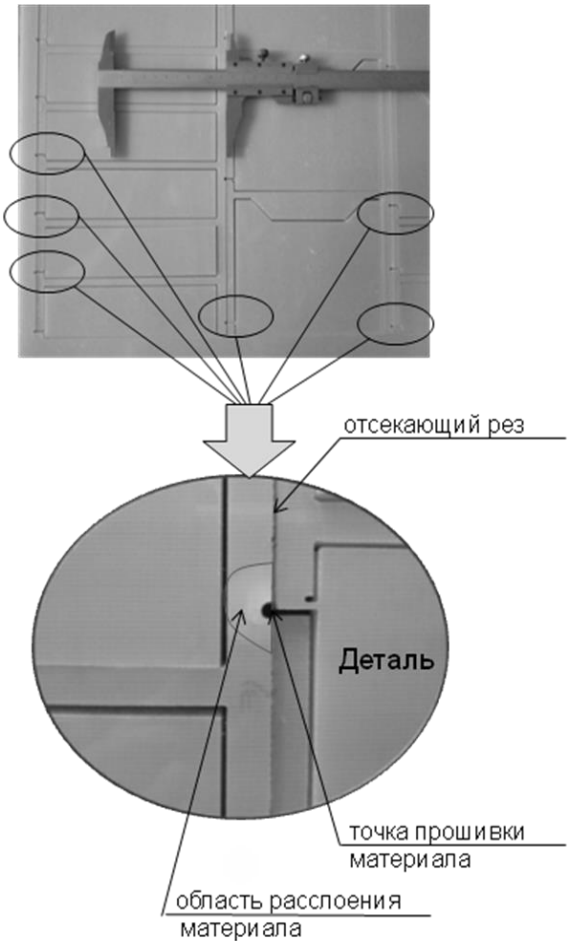


Рисунок 4.11 - Локализация области расслоения материала при раскрое деталей с применением технологических отсекающих резов

Аналогично выполняется обработка последующих рядов.

При использовании данного технологического приема необходимо, чтобы прошивка материала производилась на расстоянии не более 0,5-1 мм левее отсекающего реза, во избежание зацепления кромки материала фокусирующей трубкой, приводящего к сдвигу листового материала или поломке фокусирующей трубки. Это связано с тем, что при разрезке

тонколистовых материалов толщиной до 5 мм очень часто происходит приподнимание отрезанной кромки материала, что может привести к зацеплению фокусирующей трубкой приподнявшейся кромки. Во избежание зацепления величина расстояния от точки прошивки до отсекающего реза должна быть меньше наружного диаметра фокусирующей трубки.

Приемы 2) и 3) являются универсальными для обработки любых наружных контуров деталей. При использовании данных приемов можно уменьшить межлекальное расстояние в раскрое до 5-6 мм.

Для исключения возникновения вибрации детали в процессе обработки, необходимо правильно выбирать направление обхода контура детали. При некорректно выбранном направлении обхода обрабатываемого контура возникают вибрации при резании поверхностей, близко расположенных к отсекающему резу и к поверхностям уже вырезанных деталей. На рисунке 4.12 показана обработка детали с неправильно выбранным направлением обхода контура. Видно, что качество обработки поверхностей 3 и 4 значительно хуже, качества поверхностей 1 и 2. Это связано возникновением вибрации заготовки вследствие потери жесткости при резании данных поверхностей детали.

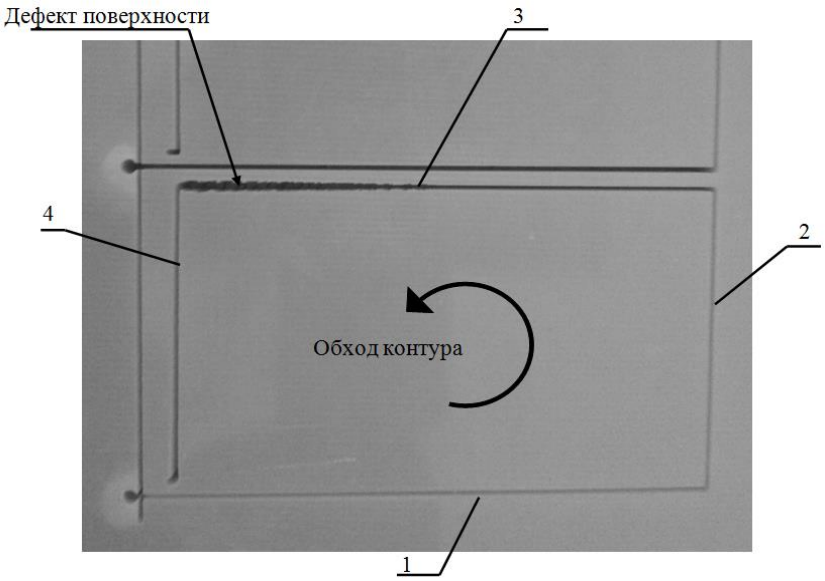


Рисунок 4.12 - Дефекты, образующиеся на поверхности резания при неправильно выбранном направлении обхода контура

В данном случае необходимо в первую очередь обработать поверхности, близко расположенные к отсекающему резу (поверхность 4) и к уже обработанной детали (поверхность 3) .

Для принятия решения о возможности обработки внутренних поверхностей детали (окна, отверстия, пазы и т.д.), необходимо сопоставить величину максимального расслоения при тестовых прошивках и размеров внутренних контуров. Если расслоение не превышает размера внутреннего контура, то можно производить обработку данных поверхностей. При этом точка прошивки должна располагаться ближе к центру обрабатываемого внутреннего контура.

Если величина максимального расслоения больше размера обрабатываемого внутреннего контура, то, исходя из экономических соображений и организационно-технических условий производства, рекомендуется применять следующие приемы и их сочетания:

– выполнять корректировку технологических режимов прошивки;

– методами механообработки (например, сверлением) выполнять отверстия под заход струи в местах прошивки материала;

– обрабатывать данные детали из материала другой партии, использовать листы данного материала для получения деталей, в которых требуется обработка только наружного контура;

– выполнять обработку только тех поверхностей, которые возможно обработать исходя из величины расслоения материала, а обработку остальных поверхностей выполнять методами механической обработки.

Исходя из вышесказанного, процесс подготовки управляющей программы и тестирования листовых стеклотекстолитов методом ГАР можно представить в виде блок-схемы (рисунок 4.13).

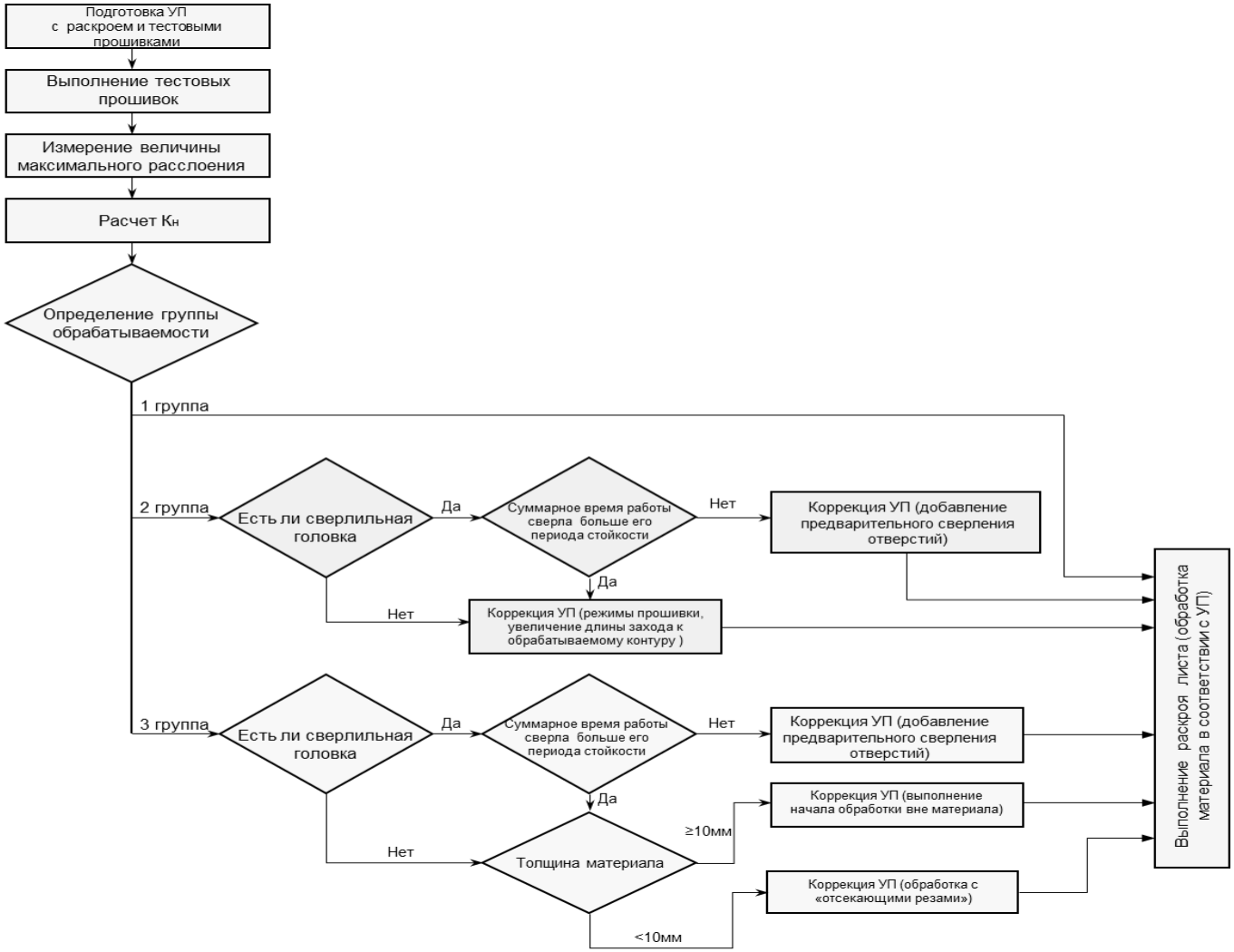


Рисунок 4.13 - Алгоритм последовательности действий при разработке УП и обработки листовых стеклотекстолитов методом ГАР

4.4 Технико-экономическая эффективность от внедрения результатов работы

Технико-экономическая эффективность использования результатов исследований в промышленности обусловлена повышением производительности и качества обработки за счет снижения трудоемкости изготовления детали, улучшения экологии рабочего места, а также исключения дорогостоящего быстроизнашиваемого режущего инструмента.

Ниже представлен расчет экономической эффективности применения метода ГАР для обработки детали «Стенка» (рисунок 4.14) из стеклотекстолита СТЭФ-I 1с ГОСТ12652-74 толщиной 20 мм.

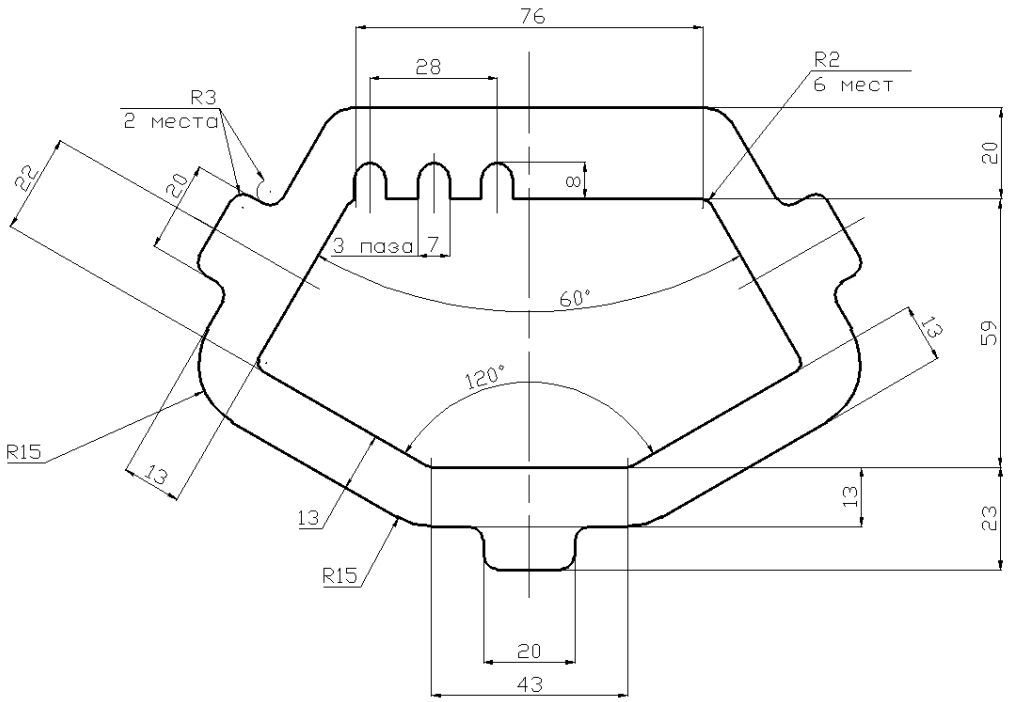


Рисунок 4.14 - Эскиз детали «Стенка»

Под технико-экономической эффективностью будем понимать разницу финансовых затрат на изготовление детали между базовым и усовершенствованным вариантам. За базовый был принят вариант изготовления детали методами механической обработки, за усовершенствованный - изготовления детали с применением метода ГАР.

В таблице 4.3 приведены маршруты технологических процессов по

изготовлению детали «Стенка», используемые по традиционной и предлагаемой технологии.

Параметры обработки детали «Стенка» по усовершенствованной технологии приведены в таблице 4.4.

Рассмотрим экономический эффект, получаемый от использования предложенной технологии.

Калькуляция цеховой себестоимости изготовления детали «Стенка» на действующий (базовый) технологический процесс получена на основании данных, предоставленных ОТЗ и ПЭО (ОАО «Тайфун»), на проектируемый вариант – расчетным путем по методике на основании данных ОТЗ и ПЭО.

Таблица 4.3 - Технологический маршрут изготовления детали «Стенка»

Базовая технология			Предлагаемая усовершенствованная технология		
№ оп.	Операция	Норма времени, мин	№ оп.	Операция	Норма времени, мин
005	Отрезная	5	005	Гидроабразивная с ЧПУ	8,2
010	Слесарная	4,5			
015	Программная фрезерная с ЧПУ	42			
020	Слесарная	15			
	Итого	66,5		Итого	8,2

Цеховая себестоимость $C_Ц$ изготовления детали рассчитывается по формуле:

$$C_Ц = З_М + З_Э + З_{ОР} + З_{ДР} + З_{Соц} + З_{Подг} + З_{Экспл} + З_{ОПр}, \quad (4.7)$$

где $З_М$ - затраты на основные и вспомогательные материалы, предусмотренные в технологическом процессе, руб.;

$З_Э$ - затраты на тепловую, электрическую и другие виды энергии,

расходуемые на технологические цели, руб.;

$З_{ОР}$, $З_{ДР}$ - затраты на основную и дополнительную заработную плату основных производственных рабочих, руб.;

$З_{Соц}$ - отчисления на социальные нужды, руб.;

$З_{Подг}$ - затраты на освоение и подготовку производства, руб.;

$З_{Экспл}$ - затраты на содержание и эксплуатацию оборудования, руб.;

$З_{ОПр}$ - общепроизводственные (цеховые) расходы, руб.

Таблица 4.4 - Параметры обработки детали «Стенка» по усовершенствованной технологии

Условия гидроабразивного резания	
Сопло	Инжекционного типа с камерой смешивания; струеформирующее сопло коническо-цилиндрическое, материал - сапфир, *d*=0,28мм, фокусирующая трубка - высокопрочная керамика, *d*=0,76мм
Режимы резания	Прошивка: давление истечения *P*=70МПа; расход абразива *Q*=250 г/мин. Резание: *P*=360МПа; расход абразива *Q*=350 г/мин; скорость подачи головки вдоль материала *S*=125мм/мин
Абразивный материал	Гранат Garnet средний размер абразивного зерна 0,125 мм (120 mesh) (Австралия)
Установка	ByJet4030 (Швейцария)

К затратам на основные и вспомогательные материалы относят затраты, связанные расходами на основные материалы, необходимые для изготовления изделия, а также расходные и вспомогательные материалы, используемые в технологическом процессе.

Затраты на материалы рассчитываются по формуле:

$$З_М = З_{МО} + З_{МР}, \quad (4.8)$$

где $З_{МО}$ - затраты на основные материалы, руб.;

$З_{МР}$ - затраты на расходные и вспомогательные материалы, используемые в технологическом процессе, руб..

$$З_{МО} = Ц_{МО} m_{МО}, \quad (4.9)$$

где $Ц_{МО}$ - цена материала заготовки, руб/кг;

$m_{МО}$ - вес заготовки, кг.

К затратам на расходные материалы $З_{МР}$ для операции Гидроабразивная с ЧПУ относятся затраты на абразивный материал, которые рассчитываются по формуле:

$$З_{МР} = Ц_{МРмин} t_О, \quad (4.10)$$

где $Ц_{МРмин}$ - стоимость абразивного материала для 1 минуты резания, руб/мин.;

$t_О$ - основное время выполнения операции, мин.

Затраты на основную заработную плату основных производственных рабочих рассчитываются по формуле:

$$З_{ОР} = \sum_{i=1}^{n} C_{НЧi} T_i, \quad (4.11)$$

где n- количество операций в маршруте обработки детали;

$C_{НЧi}$ - стоимость нормо-часа работы i - операции, руб./час;

T_i - время i - операции, час.

Затраты на дополнительную заработную плату основных производственных рабочих рассчитываются по формуле:

$$З_{ДР} = К_{ДР} \times З_{ОР}, \quad (4.12)$$

где $К_{ДР}$ - коэффициент дополнительной заработной платы производственных рабочих ($К_{ДР} = 0{,}12$).

К затратам на отчисления на социальные нужды относят отчисления в фонд социальной защиты от суммы основной и дополнительной заработных

плат основных производственных рабочих. Затраты на отчисление на социальное страхование рассчитываются по формуле:

$$З_{Соц} = К_{соц} \times (З_{ОР} + З_{ДР}), \quad (4.13)$$

где $К_{соц}$ - коэффициент отчислений на социальные нужды ($К_{соц} = 0{,}313$).

К затратам на подготовку и освоение производства относят:

– затраты на запуск нового оборудования и производственных участков;

– затраты на освоение новых изделий и научно-исследовательские работ, связанные с ними.

К затратам по эксплуатации и содержанию машин и оборудования относят расходы на:

– планово-предупредительный ремонт оборудования;

– амортизацию оборудования, занятого в технологическом процессе;

– ремонт и изготовление приспособлений.

Ежеминутные затраты на содержание, обслуживание и ремонт основных средств, используемых непосредственно в производственном процессе при обработке деталей методом ГАР представлены в таблице 4.5. Отметим, что расчет носит оценочный характер, и результат может быть другим при использовании разных типов и параметров установок и т.д. Это связано с конструкцией насоса и стоимостью расходных частей.

К затратам на общепроизводственные (цеховые) расходы относят расходы на:

– заработную плату управленческого аппарата цеха;

– заработную плату инженерно-технических работников цеха;

– заработную плату вспомогательных рабочих цеха;

– амортизацию оборудования общецехового назначения;

– затраты на текущий ремонт зданий, оборудования общецехового назначения;

– затраты на освещение, отопление, канализацию, водоснабжение, а

также на расходные материалы для хозяйственных нужд;

– охрану труда и промышленную санитарию.

Таблица 4.5 - Технологические затраты на гидроабразивную резку

Статья расходов		Стоимость, руб./мин
Расходные материалы для насоса высокого давления		14,81
Расходные материалы для клапанов высокого давления		0,52
Расходные материалы для абразивной головки		0,83
Изнашивающийся инструмент:	фокусирующая трубка	6,08
	сопло	3,2
Прочие запасные части		0,92
Суммарные ежеминутные расходы		26,36

Калькуляция цеховой себестоимости изготовления детали «Стенка» по базовой и усовершенствованной технологиям представлена в таблице 4.6.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

– цеховая себестоимость детали при изготовлении методом ГАР на 24% ниже, чем при изготовлении методами механической обработки;

– расходы на основные материалы при изготовлении методом ГАР на 7% ниже, чем при изготовлении методами механической обработки. Это связано с рациональным раскроем материала и устранением припусков на последующую обработку;

– время изготовления детали в 8,3 раза ниже при изготовлении методом ГАР, чем при изготовлении методами механической обработки;

– благодаря использованию метода ГАР значительно снижены транспортные перемещения детали;

– обработка детали происходит на рабочем месте с лучшей экологией.

Таблица 4.6 - Калькуляция цеховой себестоимости изготовления детали «Стенка» по базовой и усовершенствованной технологиям

№	Наименование статей затрат		Расходы по базовой технологии, руб.	Расходы по усоверш. технологии, руб.
1.	Сырье и материалы $З_М$	$З_{МО}$	112,78	105,42
		$З_{МР}$	54,12	171,87
2.	Энергия на технологические цели $З_Э$		39,24	4,8
3.	Основная заработная плата основных производственных $З_{ОР}$		213,91	28,29
4.	Дополнительная заработная плата основных производственных $З_{ДР}$		25,67	3,39
5.	Отчисления на социальные нужды $З_{соц}$		74,99	9,92
6.	Подготовка и освоение производства $З_{подг}$		8,56	1,13
7.	Эксплуатация и содержание машин и оборудования $З_{экспл}$		159,69	216,15
8.	Цеховые (общепроизводственные) расходы $З_{ОПР}$		29,94	3,96
Итого цеховая себестоимость $С_П$			**718,90**	**544,93**

4.5 Выводы по четвертой главе

1. Предложен критерий количественной оценки обрабатываемости стеклотекстолитов по коэффициенту относительной обрабатываемости по расслоению $К_н$, определяющий способность материала поддаваться прошивке гидроабразивной струей без образования расслоений. По величине $К_н$ предложено разбить листовые стеклотекстолиты на группы. К первой группе относится листовой материал, не требующий корректировки режимов прошивки и траектории движения фокусирующей трубки. Ко второй группе

относится листовой материал, при обработке которого необходима корректировка режимов прошивки и увеличения межлекальных расстояний в раскрое. К третьей группе относится листовой материал, при обработке которого требуется проведение специальных мероприятий по исключению распространения расслоений на обрабатываемый контур. К ним относятся:

– выполнение начала обработки вне материала;

– применение отсекающих резов.

2. Разработана методика оценки обрабатываемости листовых слоистых стеклотекстолитов гидроабразивной струей по величине $К_н$, что позволяет определить:

– необходимость корректировки технологических режимов прошивки;

– целесообразность коррекции межлекального расстояния в раскрое листа;

– необходимость коррекции величины захода к обрабатываемому контуру;

– необходимость применения специальных технологических приемов для исключения проникновения расслоений на поверхность детали;

– возможность обработки внутренних поверхностей деталей (отверстий, окон и т.д.) из данной партии листового материала.

Предложенный алгоритм разработки управляющей программы раскроя и обработки стеклотекстолитов определяет очередность действий специалиста-технолога и оператора-станочника и позволяет производить обработку деталей методом ГАР с учетом свойств конкретного материала .

3. Внедрение разработанного технологического процесса гидроабразивной резки деталей «Стенка» позволило:

– устранить недостатки обработки механическими методами;

– достигнуть существенного, около 8 раз, снижения трудоемкости их изготовления;

– снизить норму расхода материала на 7% благодаря рациональному

раскрою и назначению минимальных припусков;

– сократить цеховую себестоимость изготовления деталей на 24%;

– сократить транспортные перемещения заготовок в цехе;

– производить обработку деталей на рабочем месте с лучшей экологической обстановкой;

– производить обработку деталей фигурного профиля за один установ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Решена научно-техническая задача обеспечения качества гидроабразивного резания стеклотекстолитов на основе исследования механизма образования расслоений в процессе проникания гидроабразивной струи и разработки технологических приемов и методов коррекции режимов прошивки и траектории движения сопла.

2. На основе предложенной физической картины расслоения стеклотекстолита под действием гидроабразивной струи при прошивке и моделирования его напряженно-деформированного состояния установлено влияние силы воздействия гидроабразивной струи на возникновение расслоений, что позволяет делать сравнительный анализ уровня созданных напряжений с критическими значениями и прогнозировать возможность расслоения.

3. Установлены функциональные зависимости величины расслоения материала от траектории движения фокусирующей трубки при прошивке, давления истечения (до 90%), диаметра фокусирующей трубки и среднего размера абразивного зерна. Определены технологические режимы и параметры прошивки, обеспечивающие прошивку материала с минимальной величиной расслоения: прошивка с движением фокусирующей трубки по окружности; давление прошивки $P = 70 - 76$ *МП*а; диаметр фокусирующей трубки $d = 0,76...1,02$ *мм*; абразив со средним размером зерна *0,125 мм*.

4. Разработана методика оценки обрабатываемости листовых стеклотекстолитов гидроабразивной струей и предложена их классификация по коэффициенту относительной обрабатываемости по расслоению ($К_н$), что позволяет выявить необходимость проведения корректировки технологических режимов прошивки и раскроя с учетом физико-механических свойств обрабатываемого материала с целью исключения возникновения расслоений на поверхности готовой детали.

5. Разработан комплекс технологических приемов на основе коррекции траектории рабочих ходов, позволяющий предотвратить распространение расслоений материала на поверхность обрабатываемой детали.

6. Годовой экономический эффект от внедрения методики резания листовых стеклотекстолитов гидроабразивной струей составил:

ОАО «Тайфун» – 1 580 тыс. рублей;

ОАО «КЭМЗ» – 365 тыс. рублей;

ОАО «КЗАЭ» – 240 тыс. рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров, Р.А. Резание струями жидкости высокого давления. Механическая обработка пластмасс / Р.А. Тихомиров, В.И. Николаев. - М.: Машиностроение, 1975. - 120 с.

2. Блокнот технолога. Резка абразивной струей // Изобретатель и рационализатор.-1999.-№ 3.-С. 20.

3. Тихомиров, Р.А. Гидрообработка - новый процесс и оборудование: тез. докл. всеросс. науч. - техн. конф. «Актуальные проблемы машиностроения на современном этапе». Владимир: ВГТУ, 1995. С. 63 - 64.

4. Гидроструйная контурная резка: экспресс-информация ВИНИТИ // Технология и оборудование механосборочного производства:- 1972.-№36.- Реф. 307.

5. Раскрой материалов с помощью струи воды под давлением// Обувная промышленность. - 1975. - № 11.-С. 31 - 34.

6. Шумилин, Б.А. Резание водой: от искусства к технологии / Б.А. Шумилин // Изобретатель и рационализатор. - 1996. - № 12. - С. 12-13.

7. Смелянский, В.М. Ресурсосберегающие технологии машиностроения / В.М. Смелянский // Справочник. Инженерный журнал.- 1998.-№9.-С.19-24.

8. Тихомиров, Р.А. Высокопроизводительное резание полимерных материалов сверхзвуковыми струями жидкости: автореферат дис... д-ра техн. наук / Тихомиров Рудольф Анатольевич. - Владимир: ВГТУ, 1989. - 27 с.

9. Тихомиров, Р.А. Исследование и разработка технологии резания полимерных материалов струей жидкости высокого давления: автореф. дис… канд. техн. наук/ Тихомиров Рудольф Анатольевич.- Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1971. - 18 с.

10. Тихомиров, Р.А. Обработка струями абразивной суспензии сверхвысокого давления / Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов, Д.В. Кравченко // Актуальные проблемы повышения качества машиностроительной продукции: матер. Всерос. науч.-техн. конф., ВлГУ. - Владимир, 1999. - С. 64.

11. Тихомиров, Р.А. Отечественное и зарубежное гидрорежущее оборудование / Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов // СТИН.-1998. - № 6. - С. 38-43.

12. Тихомиров, Р.А. Приводы главного движения гидрорезных станков / Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов // Приводная техника.-1988.-№6.-С.29-31.

13. Тихомиров, Р.А. Схемы микроразрушения материалов в зоне резания при их гидрообработке / Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов, Д.В. Кравченко // Производственные технологии: матер. Междунар. науч.-техн. конф. ВлГУ.-Владимир, 2000.- С.68.

14. Тихомиров, Р.А. Гидрообработка - новый процесс и оборудование: тез. докл. Всерос. науч.- техн. конф. «Актуальные проблемы машиностроения на современном этапе».- Владимир: ВГТУ,1995.-С.63-64.

15. Тихомиров, Р.А. Гидрорезание судостроительных материалов/ Р.А. Тихомиров, В.Ф. Бабанин, Е.Н. Петухов. - Л.: Судостроение, 1987.-164 с.

16. Тихомиров, Р.А. Гидрорезание неметаллических материалов/ Р.А. Тихомиров, В.С. Гуенко.-К.: Техніка,1984, 150с.

17. Кравченко, Д.В. Качество отверстий, получаемых сверхзвуковой абразивно-жидкостной струей / Д.В. Кравченко, Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов // Актуальные проблемы повышения качества машиностроительной продукции: матер. Всерос. науч.-техн. конф., ВлГУ. - Владимир, 1999. - С. 44.

18. Кравченко, Д.В. Разработка и следование процесса получения отверстий сверхзвуковыми струями жидкости различного состава: дис… канд. техн. наук / Кравченко Дмитрий Владимирович.-Владимир:ВлГУ, 2000.-218с.

19. Experimental Investigations into Abrasive Waterjet Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic/ Prasad D. Unde, M. D. Gayakwad, N. G. Patil, R. S. Pawade, D. G. Thakur, P. K. Brahmankar// Journal of Composites.-Vol.2015.-[Электронный ресурс]: http://dx.doi.org/10.1155/2015/ 971596

20. Cénac F., Abrasive Water Jet Milling of composite materials: material integrity / F. Cénac, M. Déléris, F. Collombet, R. Zitoune // 2009 American WJTA

Conference and Expo August 18-20, Houston, Texas, 2009.-[Электронный ресурс]:http://www.wjta.org/images/wjta/Proceedings/Papers/2009/J3%20C%C3%83%C2%A9nac.pdf" type="application/pdf

21. Patent USA 6,120,351. Automatic machinability measuring and machining methods and apparatus therefore [Text] / Zeng; Jiyue. - № 144034, Filed: August 31,1998.

22. Tambe P., Abrasive waterjet cutting of polymer composites / P. Tambe, M.Shukla//.-[Электронный ресурс]: https://imgv2-2-f.scribdassets.com/img/document/17916648/original/fit_to_size/192x256/3af05c8464/1443574003

23. Shanmugam D.K., A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive / D.K. Shanmugam, T. Nguyen, J. Wang // Composites: Part A.-Vol.39.-2008.-P.923-929

24. Кузьмин, Р.А. О преимуществах гидрорезания материалов струей жидкости с добавлением водорастворимых полимеров / Р.А. Кузьмин, Р.А. Тихомиров, Д.В. Кравченко // Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков: Междунар. науч.-техн. конф. РГАТА.- Рыбинск, 2002.-Ч.2.-С.53-54.

25. Мирзоев, Р.Г. Резание листовых реактопластов струей жидкости под высоким давлением. В. кн.: Современное оборудование для переработки термореактивных материалов /Р.Г. Мирзоев.- Л.:ЛДНТП, 1970.-С.28-34.

26. Гуенко, В.С. Технологические основы создания оборудования для гидрорезания листовых материалов / В.С. Гуенко, Ю.А. Пономарев, А.С. Зенкин, В.А. Свистунов // Технология и автоматизация машиностроения.-1981.-№28.-С. 16-19.

27. Шапиро, И.И. Установка для контурного разрезания неметаллических материалов с помощью высоконапорной струи воды / И. И. Шапиро // Станки и инструмент.-1992.-№ 9.-С.20-22.

28. Новиков, В.А. Установка для гидрорезания / В.А. Новиков. С.Ф. Абрамов // Машиностроитель. - 1985. - № 3. - С. 25 - 26.

29. Петко, И.В. Обеспечение стабильности истечения струи жидкости

за счет выбора рациональных параметров гидрорезной установки / И.В. Петко, В.А. Слободянюк // Технология легкой промышленности. - 1992. - №5.-С.92-95.

30. Полянский, С.Н. Технология и оборудование гидроабразивной резки / С.Н. Полянский, А.С. Нестеров // Вестник машиностроения. - 2004. - №5.-С.43-46.

31. Петко, И.В. Моделирование процесса разрушения материала непрерывной высокоскоростной струей жидкости / И.В. Петко, И.Д. Чернявский // Технология легкой промышленности.-1991.-№2.-С.123-128.

32. Петко, И.В. Определение энергетических характеристик абразивно-жидкостной струи / И.В. Петко, Ю.В. Клапцов, В.А. Слободянюк // Технология легкой промышленности. - 1988. - №4.- С. 130-134.

33. Барсуков, Г.В. Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования состояний технологической системы: дис… д-ра техн. наук / Барсуков Геннадий Валерьевич.-Орел: ОГТУ, 2006.- 411с.

34. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. - 2008. - № 1. - С. 9 - 14.

35. Барсуков, Г.В. Разрушение преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц / Г.В. Барсуков, Ю.С. Степанов, А.В. Михеев. - М.: Издательский дом «Спектр», 2010. -152 с.

36. Барсуков Г.В. Исследование влияния технологических режимов гидроабразивного резания на расслоение поверхности деталей из стеклотекстолита / Г.В. Барсуков, Т.А. Журавлева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.-2013.-№4.-С.47-56.

37. Барсуков, Г.В. Влияние параметров течения сверхзвуковой гидроабразивной струи на геометрическую форму поверхности разрушения преграды / Г.В. Барсуков, Ю.С. Степанов, А.В. Михеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-5. С.53-63.

38. Степанов, Ю.С. Формирование качества поверхностного слоя деталей при резании сверхзвуковой струей жидкости / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков // СТИН.-2003.-№10.-С.15-17.

39. Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин // Наукоемкие технологии в машиностроении. - 2012.-№ 6.-С.15- 20.

40. Степанов, Ю.С. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей/ Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков.- М.: Машиностроение, 2004.- 240с.

41. Степанов, Ю.С. Моделирование разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.-2010.-№ 4.- С. 65-70.

42. Степанов, Ю.С. Повышение качества раскроя машиностроительных текстильных материалов сверхзвуковой струей жидкости на сетчатой опорной поверхности / Ю.С.Степанов, Г.В.Барсуков, Е.Т.Кобяков, А.П.Черепенько // Справочник. Инженерный журнал.-1999.-№2.-С.35-37.

43. Liu, H.-T. Piercing in delicate materials with abrasive-waterjets / H.-T. Liu, E. Schubert // Int. J. Adv. Manuf. Technol.-2009.-Vol. 42.-P.263–279

44. Arola, D. Abrasive waterjet machining of titanium alloy / D. Arola, M. Ramulu // Proc. 8th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn. Ass., St. Louis. - P. 389-408.

45. Kovacevic, R. Monitoring the depth of abrasive waterjet penetration/ R. Kovacevic // Int. J. Mach. Tools and Manuf., 1995. - № 32. - P. 725-736.

46. Geskin, E.S. Waterjet cutting experiments determine optimal techniques / E.S. Geskin, W.L. Chen // Glass Digest. - 1988. - P. 66 - 69.

47. Архангельский, Б.А. Пластические массы / Б.А. Архангельский.- Л.:Судпромгиз,1961.-721с.

48. Дрожжин, В.И. О контакте поверхности инструмента с пластмассой

при резании / В.И. Дрожжин // Резание и инструмент.-1970.-Вып.2.- С.59-66.

49. Штучный, Б.П. Обработка резанием пластмасс / Б.П. Штучный.- М.: Машиностроение, 1974.-144с.

50. Руднев, А.В. Влияние структуры и физико-механических свойств стеклопластиков на их относительную обрабатываемость при точении. В кн.: Механическая обработка стеклопластиков под ред. К.П. Имшеника / А.В. Руднев, А.А. Королев.-М.: ВНИИ. 1965.- С.65.

51. Руднев, А. В. Обработка резанием стеклопластиков/ А.В. Руднев, А. А. Королёв. - М.: Машиностроение, 1969.-116 с.

52. Киселев, Б.А. Стеклопластики/ Б.А. Киселев.-М.: Госхимиздат, 1961.- 240с.

53. Шалун, Г.Б. Слоистые пластики/ Г.Б.Шалун, Е.М. Сурженко.-Л.: Химия, 1978.-232с.

54. Производство стеклянных волокон и тканей / Под ред. М.Д. Ходаковкого. -М.:Химия, 1973.-302с.

55. Агаев, Ч.Г. Разработка и исследование технологических методов повышения качества и надежности стеклопластиков электротехнического назначения: дис… канд. техн. наук/ Агаев Чингиз Гусейн оглы. - Баку: Азерб. политех. ин-т, 1984.-215с.

56. Андреевская, Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики / Г.Д. Андреевская.-М.:Наука, 1966.-370с.

57. Гуль, В.Е. Основы переработки пластмасс / В.Е. Гуль, М.С. Акутин.- М.:Химия, 1985. 400с.

58. Доц, М.В. Обеспечение параметров качества поверхностей деталей из стеклопластика на основе нейросетевых моделей формирования шероховатости: дис…канд. техн. наук / Доц Марина Васильевна.-Барнаул: АлтГТУ, 2007.-149с.

59. Тюкаев, В.Н. Стекловолокниты. В кн.: Пластики конструкционного назначения/ В.Н. Тюкаев.-М.: Химия, 1974. С. 120-204.

60. Сравнение CO_2 и Nd: YAG лазеров при резке различных материалов

[Электронный ресурс]: http://www.4ne.ru/

61. Терентьев, И.С. Обработка пластмасс, применяемых в машиностроении / И.С. Терентьев.- М.-Л.:Машиностроение, 1965.-220с.

62. Штучный, Б.П. Механическая обработка пластмасс: Справочник.2-е изд., перераб. и доп./ Б.П. Штучный.-М.: Машиностроение, 1987.- 152с.

63. Дрожжин, В.И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс: автореф. дис... д-ра техн. наук/ Дрожжин Владимир Иванович. - Харьков: ХПИ, 1982.-32с.

64. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А. Степанов. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987.-176 с.

65. ГОСТ 27380-87. Стеклопластики профильные электроизоляционные. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 18 с.

66. Егоров, С.В. Обработка резанием конструкционных пластмасс/ С.В. Егоров. - М.: Оборонгиз, 1955.- 115с.

67. Егоров, С.В. Режимы резания и геометрия инструмента для обработки пластмасс/ С.В. Егоров. - М.: ВИНИТИ, 1957.- 41с.

68. Исаев, А.И. Обработка пластических масс резанием. В кн.: Пластические массы в машиностроении/ А.И. Исаев.- М.: Академгиз, 1955. С. 178-190.

69. Исаев, А.И. Обработка резанием конструкционных пластмасс. В кн.: Энциклопедический справочник: Машиностроение/ А.И. Исаев.- М.: Машгиз, 1947.С.700-708.

70. Исаев, А.И. Обработка резанием конструкционных пластмасс/ А.И. Исаев. - Москва-Свердловск: Машгиз, 1944.-40с.

71. Семко, М.Ф. Обработка резанием электроизоляционных материалов/ М.Ф. Семко, Г.К. Сустан, В.И. Дрожжин. - М.:Энергия, 1977.-174с.

72. Кобаяши, А.А. Обработка пластмасс резанием/ А.А. Кобаяши. - М.: Машиностроение, 1974.- 192с.

73. Штучный, Б.П. Точение стеклопластиков. В кн.: Пути повышения производительности режущего инструмента/ Б.П. Штучный.- М.: МДНТП, 1963. С. 103-109.

74. Алексеева, Э.М. Обработка тонких деталей из стекловолокнита / Э.М. Алексеева, В.А. Дмитриев, А.А. Токарев// Станки и инструменты.- 1971.- №7.- С.39-40.

75. Богданов, В.М. Износ резцов при точении пластмасс/ В.М. Богданов//Станки и инструменты.- 1970.- №3.С.27-29.

76. Вадачкория, В.И. Исследование обрабатываемости пластмасс резанием/ В.И.Вадачкория.- Тбилиси: ГрПИ им. Ленина, 1969.-87с.

77. Дуев, А.М. Механическая обработка изделий из пластмасс/ А.М. Дуев // Пластические массы.- 1962.-№5.С.67-70.

78. Ерохин, А.А. Обработка резанием стеклопластиков. В кн.: Высокопроизводительное резание в машиностроении / А.А. Ерохин. - М.: Наука, 1966.С.48-54.

79. Куликов, В.В. Режущий инструмент для механической обработки термореактивных пластмасс/ В.В.Куликов //М. ГОСИНТИ.- 1966.-№10.С.31-35.

80. Мордвин, А.Н. Механическая обработка стеклопластиков, полученных методом намотки/ А.Н. Мордвин, Е.М. Ершов, В.И. Давиденко.- Л.:ЛДНТН, 1966.- 39с.

81. Окунь, А.Г. Изнашиваемость режущего инструмента при механической обработке пластмасс. В кн.: Применение радиоактивных индикаторов для исследования и контроля износа инструмента/ А.Г. Окунь.- М.:НИИМАШ, 1969.С.72-88.

82. Режимы резания и геометрия инструмента для обработки пластмасс, применяемых в станкостроении. / Под ред. П.П. Грудова.-М.: ЦБТИ, 1956.-48с.

83. Афанасенко, К.А. Влияние термической деструкции и интенсивности коксообразования на расслоение стеклопластиков в условиях

повышенных температур / К.А. Афанасенко, А.П. Михайлюк // Проблемы пожарной безопасности.-2014.-Вып. 36.-С.24-30.

84. Гориянова, А.В. Стеклопластики в машиностроении / А.В. Гориянова. -М.: Машгиз,1961.-215с.

85. Бурнашов, М.А. Повышение эффективности разрезания листовых неметаллических материалов водоледяными струями высокого давления: автореф. дис… докт. техн. наук/ Бурнашов Михаил Анатольевич.-Орел. 2010.-37с.

86. Koenig, W. Machining of Fibre Reinfonced Plastics / W. Koenig, Ch. Wulf, P. Grass, H. Willersheild // Manufact. Tech., CIRP Annals, 1985.-Vol. 34.-P. 537-548.

87. Hashish, M. Machining of advanced composites with abrasive-waterjets / M. Hashish // ASME Winter Annual Meeting, Chicago, Illinois, Nov.27-Dec.2 ,1988.

88. Hashish, M. Characteristics of surfaces machined with abrasive waterjet/ M. Hashish // MD. -1999 - Vol. 16. - P. 23 -32.

89. Ho-Cheng, H. A failure analysis of water jet drilling in composite laminates / H. Ho-Cheng // Int. J. Mach. Tools Manufact., 1990.- Vol. 30.-P.423-429.

90. Цяпко, Н.Ф. Результаты экспериментальных исследований по разрушению твердого тела струями воды / Н.Ф. Цяпко // Сб. «Разрушение углей и пород». - М.: Углетехиздат,1958.

91. Roth, P. Delamination of abrasive particle velocity using laser-induced fluorescence and particle traking methods in abrasive water jets / P.Roth, H.Looser, K.C.Heiniger, S.Bühler // American waterjet conference.-2005.

92. Wang, J. Particle velocity models for ultra high pressure abrasive water jets/ J.Wang // Mater. Process Technol.-2009.P.209.

93. Guo, N.S. Schneidprozess und Schnitt qualitat beim wasser abrasive strahl schneiden/ S.N. Guo // VDI-Fortschritt-Berichte.-1994.-№328.

94. Геронтьев, В.И. Разрушение углей и горных пород струей воды/

В.И. Геронтьев, Л.П. Северин Л.П. // Тр. ин-та ЛГИ им. Г.В. Плеханова.-1959. - Вып.1.- С. 17-33.

95. Журавский, А.М. Основные задачи теории разрушения угля струей воды/ А.М. Журавский // Тр. ин-та ЛГИ им. Г. В. Плеханова.- 1959.- Вып.1.- С.94-105.

96. Лабазин, В.Г. Напряженное состояние и условия разрушения горного массива при статически приложенной нагрузке/ В.Г. Лабазин // Тр. ин-та ЛГИ им. Г.В. Плеханова.-1959.-Вып.1.-С.106-119.

97. Гарбуз, Т.Д. Напряженное состояние твердого тела при действии на него струи воды/ Т.Д. Гарбуз // Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского.-1972.-Вып.101.-С.23-32.

98. Хрущев, Г.Н. Исследование эффективности гидроотбойки в лабораторных условиях/ Г.Н. Хрущев, И.С. Куклин // Тр. Свердловского ин-та горного дела.-1962.-№3.-С.18-21.

99. Эрозия: Пер. с англ./Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982.

100. Денисов, А.С. Повышение эффективности гидроабразивного резания заготовок из толстолистовых металлов на основе дискретной подачи абразива: дис... канд. техн. наук / Денисов Александр Сергеевич.- Москва: МГТУ «Станкин», 2014.-132с.

101. Mark, J. Machining with Abrasives / J.M. Jackson, J.P. Davim, M.P. Hitchiner, T.Tawakoli, A.Rasifard, L.C. Zhang, J.Liu, C.Xu, H.Huang, L.Zhou, L.Yin, Y.M.Ali, J.Wang// Purdue university MET, Center for advanced manufacturing college of technology West Lafayette USA.-2011.

102. Bowden, F.P. The brittle fracture of solids by liquid impact, by solid impact, and by shok/ F.P. Dowden, J.E.Field // Proc. R Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.-1964.

103. Sheldon, G.L. The mechanism of material removal in the erosive cutting of brittle materials/ G.L. Sheldon, I.Finnie // ASME Journal of Engineering for Industry.-1966.-P.393-400.

104. Wiederhorn, S.M. Strength degradation of glass resulting from impact

with / S.M. Wiederhorn, B.R. Lawn// J. Am. Ceram. Soc.-1977.-P.451-458.

105. Evans, A.G. Impact damage in brittle materials in the elastic/ A.G.Evans, M.E.Gulden, M.Rosendlatt// Proc. R. Soc. London.-1977.-P.343.

106. Лурье, А.И. Теория упругости / А.И.Лурье.- М.: Наука, 1970.- 940с.

107. Барсуков, Г.В. Разработка технологических рекомендаций по гидроабразивному резанию стеклотекстолита / Г.В. Барсуков, Т.А. Журавлева, О.А. Короткий, В.Б. Сидоров // Радиопромышленность. – 2014. – №4. –С.153-165.

108. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технических процессов/ А.А. Спиридонов.- М.: Машиностроение, 1981.-184с.

109. Дедюхин, В.Г. Прессованные стеклопластики / В.Г. Дедюхин, В.П. Ставров. -М.: Химия, 1976.-272с.

110. Тарнопольский, Ю.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков / Ю.М. Тарнопольский, А.М. Скудра.- Рига: Зинатне, 1966.-260с.

111. Feltner, C.E. On the mechanical behavior and fracture morphology of epoxy resin.- TAM Report, 224, University of Illinois, August,1962.

112. Кириллов, В.Н. Исследование влияния тепло-влажностного воздействия на свойства эпоксидных стеклотекстолитов/ В.Н. Кириллов, Н.С. Кавун, В.П. Ракитина, И.С. Деев // Пластические массы.-№9, 2008г.

113. Барсуков, Г.В. Исследование разрушения многослойных неметаллических материалов под действием сверхзвукового потока абразивных частиц/ Г.В. Барсуков, А.В. Тюхта, Т.А. Журавлева// Конструкторско - технологическое обеспечение качества изделий машиностроения: Материалы региональной заочной научно-практическая конференции, 21-22 ноября 2013г., г. Ливны.- Орел: ООО ИД «Орлик», 2014.- С.43-49.

114. Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Михеев А.В. Повышение эффективности многодетального гидроабразивного резания деталей из стеклопластика // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: Материалы XII

международной научно-практической интернет-конференции, 15 марта - 30 июня 2014г., г. Орел.- Орел: Госуниверситет -УНПК.-2014.-С.87-91.

115. Коржов. Е.Г. Некоторые особенности водоструйной обработки материалов “Waterjet- технология” // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – №3. – С. 373-387.

116. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения/ Б.М. Базров.-М.:Машиностроение,2005.-736с.

117. Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения/ Б.С. Балакшин.-М.:Машиностроение,1969.-358с.

118. Барабанов, М.В. Профильная резка материалов высоконапорной струей воды / М.В. Барабанов, Г.М. Иванов, В.К. Свешников И.И. Шапиро // Вестник машиностроения.-1992.-№4.-С.45-47.

119. Барташев, Л.В. Технолог и экономика / Л.В. Барташев.-М.:Машиностроение,1983.-152с.

120. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести: учебник для вузов/ Н.И. Безухов.-М.: Высшая школа,1965.-320с.

121. Говоров, И.Д. Механизация и автоматизация технологических операций обработки деталей из реактопластов/ И.Д. Говоров. - М.: Машиностроение, 1973.-192с.

122. Демидов, С.П. Теория упругости: учебник для ВУЗов / С.П. Демидов.- М.: Высш. школа, 1979.-432с.

123. Дворецкий, Ф.Г. Пластмассы в машиностроении / Ф.Г. Дворецкий.- М.: Машгиз, 1965.-271с.

124. Князев, В.К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении / В.К. Князев.-М.:Машиностроение,1977.-183с.

125. Контев, Д.В. Обеспылевание процессов обработки малогабаритных изделий из стеклопластиков / Д.В. Контев. - М.: Машиностроение, 1973.- 88с.

126. Косандрова, О.П. Обработка результатов наблюдений / О.П. Косандрова, В.В. Лебедев.-М.:Наука,1970.-104с.

127. Латыпов, Р. Р. Некоторые сведения о гидрорезании материалов / Р.Р. Латыпов, Н.Г. Терегулов, А.И. Харлов// Труды Уфимского ГАТУ, 1999

128. Муслина, Г.Р. Экономический анализ технологических процессов механической обработки заготовок: учеб. пособие / Г.Р. Муслина, Ю.М. Правиков. -Ульяновск: УлГТУ, 1997. - 36 с.

129. Полежаев, Ю.В. Процесс установления эрозионного разрушения преграды при многократном соударении с частицами / Ю.В. Полежаев // Инженерно-физический журнал.-1979.-№3.-С.389.

130. Потапов, В.А. Струйная обработка: состояние и перспективы развития в Европе и мире / В.А. Потапов // Вестник машиностроения. -1996.-№1.-С. 26-30.

131. Рыбка, А.А. Вода камень точит/ А.А. Рыбка // Деньги и Технологии. - 2002. - № 5. - С. 44 - 47.

132. Юдин, Е.Я. Охрана труда в машиностроении: Учебник для машиностроительных вузов / Е. Я. Юдин, С. В. Белов, С. К. Баланцев и др.; Под ред. Е. Я. Юдина, С. В. Белова - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1983.- 432 с.

133. Шпилев, В.В. Повышение эффективности процесса гидроабразивной резки листовых деталей путем оптимизации режимов резания и характеристик струи рабочей жидкости: дис… канд. техн. наук/ Шпилев Василий Владимирович. - Саратов: СГТУ им. Гагарина, 2012.-159с.

134. Яценко, В.Ф. Прочность и ползучесть слоистых пластиков / В.Ф. Яценко.- К.: Наукова думка, 1966.-204с.

Приложение А

(справочное)

Обработка экспериментальных данных величины расслоения материала при гидроабразивном резании, полученных по результатам ПФЭ 2^5 №1

№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Результаты параллельных опытов			$\hat{y}$	S_i^2	Значения коэффициентов уравнения регрессии		%
						$(y_i)_1$	$(y_i)_2$	$(y_i)_3$					
1	+	+	+	+	+	25,14	22,75	29,11	25,667	10,320	b_0	13,957	-
2	-	+	+	+	+	1,15	0	1,23	0,793	0,474	b_1	9,054	67,613
3	+	-	+	+	+	31,43	26,52	26,14	28,030	8,706	b_2	0,825	0,561
4	-	-	+	+	+	0	1,24	0	0,413	0,513	b_{12}	0,656	0,355
5	+	+	-	+	+	32,37	34,72	36,92	34,670	5,178	b_3	-0,819	0,553
6	-	+	-	+	+	0	0	1,62	0,540	0,875	b_{13}	-1,316	1,428
7	+	-	-	+	+	28,63	26,42	33,84	29,630	14,514	b_{23}	-1,082	0,966
8	-	-	-	+	+	1,51	0	0	0,503	0,760	b_{123}	-0,596	0,293
9	+	+	+	-	+	29,37	20,92	23,21	24,500	19,099	b_4	-2,316	4,423
10	-	+	+	-	+	9,73	11,28	12,73	11,247	2,251	b_{14}	2,123	3,716
11	+	-	+	-	+	29,64	21,12	27,82	26,193	20,132	b_{24}	-0,234	0,045
12	-	-	+	-	+	12,41	15,36	9,16	12,310	9,617	b_{34}	-0,195	0,031
13	+	+	-	-	+	37,84	37,12	33,02	35,993	6,760	b_{124}	-0,300	0,074
14	-	+	-	-	+	14,31	11,14	9,87	11,773	5,229	b_{134}	0,216	0,038
15	+	-	-	-	+	31,95	25,22	27,62	28,263	11,634	b_{234}	0,362	0,108
16	-	-	-	-	+	5,16	8,32	6,41	6,630	2,533	b_{1234}	-0,234	0,045
17	+	+	+	+	-	15,32	13,72	14,57	14,537	0,641	b_5	3,365	9,339
18	-	+	+	+	-	1,82	0	1,18	1,000	0,852	b_{15}	3,365	9,339
19	+	-	+	+	-	15,92	14,31	13,53	14,587	1,485	b_{25}	0,001	0,000
20	-	-	+	+	-	0	0	0	0,000	0,000	b_{35}	-0,359	0,107
21	+	+	-	+	-	20,62	18,13	21,81	20,187	3,526	b_{45}	0,024	0,000
22	-	+	-	+	-	0	1,41	0	0,470	0,663	b_{125}	-0,392	0,127
23	+	-	-	+	-	17,51	12,49	15,72	15,240	6,473	b_{135}	-0,527	0,229
24	-	-	-	+	-	0	0	0	0,000	0,000	b_{145}	0,550	0,249
25	+	+	+	-	-	18,28	19,92	15,84	18,013	4,215	b_{235}	-0,336	0,093
26	-	+	+	-	-	6,38	5,72	9,78	7,293	4,747	b_{245}	-0,205	0,035
27	+	-	+	-	-	16,93	15,27	14,26	15,487	1,817	b_{345}	0,068	0,004

28	-	-	+	-	-	7,39	12,41	10,64	10,147	6,483	b_{1235}	-0,089	0,007
29	+	+	-	-	-	21,62	24,43	21,06	22,370	3,261	b_{1245}	0,319	0,084
30	-	+	-	-	-	12,41	7,91	2,07	7,463	26,879	b_{1345}	0,281	0,065
31	+	-	-	-	-	13,81	14,12	16,52	14,817	2,200	b_{2345}	0,174	0,025
32	-	-	-	-	-	6,13	7,62	9,85	7,867	3,505	b_{12345}	-0,049	0,002
									$\sum_{i=1}^{N} S_i^2$	185,341		$\sum$ %	99,954

Примечание:

- коэффициенты уравнения регрессии, отброшенные, как не значимые.

Проверка гипотезы однородности дисперсии опытов:

$$G_{0,05;2;32}^{табл} = 0{,}198\,;\ G^{расч} = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^{N} S_i^2} = \frac{26{,}879}{185{,}341} = 0{,}145\,.$$

Т.к. $G^{расч} < G_{0,05;2;32}^{табл}$, то с доверительной вероятностью 95% и соответствующим числом степеней свободы принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

Дисперсия воспроизводимости опытов (отклика):

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i^2 = \frac{185{,}341}{32} = 5{,}792\,.$$

Величина доверительного интервала для коэффициентов уравнения регрессии:

число степеней свободы, с которыми определяется дисперсия воспроизводимости отклика $f = N \cdot (n-1) = 32 \cdot (3-1) = 64$;

табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{0,05;64} = 2$

$$\Delta b_i = t_{0,05;32}\sqrt{\frac{S_{\bar{y}}^2}{f}} = 2\sqrt{\frac{5{,}795}{64}} = 0{,}6\,.$$

Таким образом, коэффициенты регрессии значимы с доверительной вероятностью 95%, если их абсолютная величина больше величины доверительного интервала.

$$0{,}6 \le |\Delta b_i|\,.$$

Модель является адекватной, если сумма эффектов факторов и их взаимодействий описывает 85% дисперсии отклика. При выполнении дисперсионного анализа необходимости проверять адекватность полученной модели нет, так как суммарный процент дисперсий отклика больше 85%. Следовательно, учтены все факторы и их взаимодействия существенно влияющие на отклик.

Обработка экспериментальных данных величины расслоения материала при гидроабразивном резании, полученных по результатам ПФЭ 2^5 №2

№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Результаты параллельных опытов			$\hat{y}$	S_i^2	Значения коэффициентов уравнения регрессии		%
						$(y_i)_1$	$(y_i)_2$	$(y_i)_3$					
1	+	+	+	+	+	10,36	7,13	12,24	9,910	6,680	b_0	8,013	-
2	-	+	+	+	+	0	0	0	0,000	0,000	b_1	7,780	57,873
3	+	-	+	+	+	2,53	3,12	4,82	3,490	1,414	b_2	0,243	0,057
4	-	-	+	+	+	0	0	0	0,000	0,000	b_{12}	0,125	0,015
5	+	+	-	+	+	11,62	12,29	13,84	12,583	1,297	b_3	-1,258	1,512
6	-	+	-	+	+	0	0	0	0,000	0,000	b_{13}	-1,301	1,618
7	+	-	-	+	+	17,63	11,26	12,74	13,877	11,113	b_{23}	0,169	0,027
8	-	-	-	+	+	0	0	0	0,000	0,000	b_{123}	0,115	0,013
9	+	+	+	-	+	25,14	22,75	29,11	25,667	10,320	b_4	-3,629	12,589
10	-	+	+	-	+	1,15	0	1,23	0,793	0,474	b_{14}	-3,396	11,027
11	+	-	+	-	+	31,43	26,52	26,14	28,030	8,706	b_{24}	-0,348	0,116
12	-	-	+	-	+	0	1,24	0	0,413	0,513	b_{34}	-0,244	0,057
13	+	+	-	-	+	32,37	34,72	36,92	34,670	5,178	b_{124}	-0,230	0,051
14	-	+	-	-	+	0	0	1,62	0,540	0,875	b_{134}	-0,201	0,039
15	+	-	-	-	+	28,63	26,42	33,84	29,630	14,514	b_{234}	0,890	0,757
16	-	-	-	-	+	1,51	0	0	0,503	0,760	b_{1234}	0,944	0,852
17	+	+	+	+	-	4,61	5,42	6,28	5,437	0,697	b_5	1,994	3,800
18	-	+	+	+	-	0	0	0	0,000	0,000	b_{15}	1,994	3,800
19	+	-	+	+	-	4,42	2,31	5,94	4,223	3,323	b_{25}	0,270	0,070
20	-	-	+	+	-	0	0	0	0,000	0,000	b_{35}	-0,211	0,043
21	+	+	-	+	-	4,82	5,17	8,93	6,307	5,192	b_{45}	-1,395	1,862
22	-	+	-	+	-	0	0	0	0,000	0,000	b_{125}	0,336	0,108
23	+	-	-	+	-	12,93	14,85	15,18	14,320	1,476	b_{135}	-0,188	0,034
24	-	-	-	+	-	0	0	0	0,000	0,000	b_{145}	-1,347	1,734
25	+	+	+	-	-	15,32	13,72	14,57	14,537	0,641	b_{235}	-0,128	0,016
26	-	+	+	-	-	1,82	0	1,18	1,000	0,852	b_{245}	0,475	0,216
27	+	-	+	-	-	15,92	14,31	13,53	14,587	1,485	b_{345}	0,080	0,006
28	-	-	+	-	-	0	0	0	0,000	0,000	b_{1235}	-0,117	0,013
29	+	+	-	-	-	20,62	18,13	21,81	20,187	3,526	b_{1245}	0,409	0,160
30	-	+	-	-	-	0	1,41	0	0,470	0,663	b_{1345}	0,057	0,003

31	+	-	-	-	-	17,51	12,49	15,72	15,240	6,473	b_{2345}	0,034	0,001
32	-	-	-	-	-	0	0	0	0,000	0,000	b_{12345}	0,022	0,000
									$\sum_{i=1}^{N} S_i^2$	86,172		$\sum$ %	98,467

Примечание:

- коэффициенты уравнения регрессии, отброшенные, как не значимые.

Проверка гипотезы однородности дисперсии опытов:

$$G_{0,05;2;32}^{табл} = 0{,}198\,;\ G^{расч} = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^{N} S_i^2} = \frac{14{,}514}{86{,}172} = 0{,}168\,.$$

Т.к. $G^{расч} < G_{0,05;2;32}^{табл}$, то с доверительной вероятностью 95% и соответствующим числом степеней свободы принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

Дисперсия воспроизводимости опытов (отклика):

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i^2 = \frac{86{,}172}{32} = 2{,}693\,.$$

Величина доверительного интервала для коэффициентов уравнения регрессии:

$$\Delta b_i = t_{0,05;32}\sqrt{\frac{S_{\bar{y}}^2}{f}} = 2\sqrt{\frac{2{,}693}{64}} = 0{,}41\,.$$

Таким образом, коэффициенты регрессии значимы с доверительной вероятностью 95%, если их абсолютная величина больше величины доверительного интервала.

$$0{,}41 \le |\Delta b_i|\,.$$

При выполнении дисперсионного анализа необходимости проверять адекватность полученной модели нет, так как суммарный процент дисперсий отклика больше 85%. Следовательно, учтены все факторы и их взаимодействия существенно влияющие на отклик.

Обработка экспериментальных данных величины расслоения материала при гидроабразивном резании, полученных по результатам ПФЭ 2^5 №3

№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Результаты параллельных опытов			$\hat{y}$	S_i^2	Значения коэффициентов уравнения регрессии		%
						$(y_i)_1$	$(y_i)_2$	$(y_i)_3$					
1	+	+	+	+	+	47,81	45,24	42,51	45,187	7,025	b_0	23,282	-
2	-	+	+	+	+	7,27	13,62	8,24	9,710	11,701	b_1	14,761	85,219
3	+	-	+	+	+	45,32	46,17	47,39	46,293	1,083	b_2	1,525	0,910
4	-	-	+	+	+	5,12	8,15	10,94	8,070	8,473	b_{12}	1,349	0,712
5	+	+	-	+	+	50,94	55,14	56,02	54,033	7,370	b_3	0,069	0,002
6	-	+	-	+	+	11,38	13,41	10,41	11,733	2,344	b_{13}	-0,462	0,084
7	+	-	-	+	+	34,92	31,13	35,27	33,773	5,271	b_{23}	-1,143	0,511
8	-	-	-	+	+	2,18	11,41	6,22	6,603	21,408	b_{123}	-0,829	0,269
9	+	+	+	-	+	31,61	34,58	33,24	33,143	2,212	b_4	2,255	1,990
10	-	+	+	-	+	7,64	10,32	9,03	8,997	1,796	b_{14}	2,041	1,629
11	+	-	+	-	+	33,71	32,38	34,93	33,673	1,627	b_{24}	1,726	1,165
12	-	-	+	-	+	8,23	13,15	15,08	12,153	12,476	b_{34}	1,190	0,554
13	+	+	-	-	+	38,79	36,46	41,62	38,957	6,677	b_{124}	0,255	0,025
14	-	+	-	-	+	5,14	6,02	9,95	7,037	6,559	b_{134}	1,575	0,971
15	+	-	-	-	+	40,13	35,73	41,86	39,240	9,988	b_{234}	-2,002	1,568
16	-	-	-	-	+	8,16	13,04	13,97	11,723	9,739	b_{1234}	-1,110	0,482
17	+	+	+	+	-	42,27	45,93	43,12	43,773	3,669	b_5	1,738	1,182
18	-	+	+	+	-	8,08	11,02	7,71	8,937	3,289	b_{15}	1,738	1,182
19	+	-	+	+	-	41,95	42,72	46,09	43,587	4,848	b_{25}	-0,446	0,078
20	-	-	+	+	-	9,31	5,78	11,34	8,810	7,916	b_{35}	-0,436	0,074
21	+	+	-	+	-	43,63	47,53	46,18	45,780	3,923	b_{45}	-0,350	0,048
22	-	+	-	+	-	10,87	8,68	13,91	11,153	6,898	b_{125}	-0,136	0,007
23	+	-	-	+	-	29,14	26,97	22,73	26,280	10,629	b_{135}	-0,134	0,007
24	-	-	-	+	-	6,18	4,93	3,51	4,873	1,785	b_{145}	0,339	0,045
25	+	+	+	-	-	34,82	32,11	29,37	32,100	7,426	b_{235}	-0,330	0,043
26	-	+	+	-	-	6,17	7,04	10,84	8,017	6,168	b_{245}	0,435	0,074
27	+	-	+	-	-	20,96	28,84	20,51	23,437	21,948	b_{345}	-0,433	0,073
28	-	-	+	-	-	10,63	5,71	6,84	7,727	6,641	b_{1235}	-0,399	0,062
29	+	+	-	-	-	31,24	37,81	34,03	34,360	10,873	b_{1245}	0,080	0,002
30	-	+	-	-	-	4,01	2,17	5,81	3,997	3,313	b_{1345}	-0,450	0,079

31	+	-	-	-	-	33,66	38,59	32,94	35,063	9,458	b_{2345}	0,368	0,053
32	-	-	-	-	-	5,49	6,18	8,74	6,803	2,932	b_{12345}	0,104	0,004
									$\sum_{i=1}^{N} S_i^2$	227,464		$\sum$ %	99,105

Примечание:

- коэффициенты уравнения регрессии, отброшенные, как не значимые.

Проверка гипотезы однородности дисперсии опытов:

$$G_{0,05;2;32}^{табл} = 0{,}198\,;\; G^{расч} = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^{N} S_i^2} = \frac{21{,}948}{227{,}464} = 0{,}096\,.$$

Т.к. $G^{расч} < G_{0,05;2;32}^{табл}$, то с доверительной вероятностью 95% и соответствующим числом степеней свободы принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

Дисперсия воспроизводимости опытов (отклика):

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i^2 = \frac{227{,}464}{32} = 7{,}11\,.$$

Величина доверительного интервала для коэффициентов уравнения регрессии:

$$\Delta b_i = t_{0,05;32}\sqrt{\frac{S_{\bar{y}}^2}{f}} = 2\sqrt{\frac{7{,}11}{64}} = 0{,}66\,.$$

Таким образом, коэффициенты регрессии значимы с доверительной вероятностью 95%, если их абсолютная величина больше величины доверительного интервала.

$$0{,}66 \le |\Delta b_i|\,.$$

При выполнении дисперсионного анализа необходимости проверять адекватность полученной модели нет, так как суммарный процент дисперсий отклика больше 85%. Следовательно, учтены все факторы и их взаимодействия существенно влияющие на отклик.

Обработка экспериментальных данных величины расслоения материала при гидроабразивном резании, полученных по результатам ПФЭ 2^5 №4

№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Результаты параллельных опытов			$\hat{y}$	S_i^2	Значения коэффициентов уравнения регрессии		%
						$(y_i)_1$	$(y_i)_2$	$(y_i)_3$					
1	+	+	+	+	+	49,73	48,16	50,62	49,503	1,551	b_0	25,689	-
2	-	+	+	+	+	2,41	1,41	3,95	2,590	1,637	b_1	20,196	89,838
3	+	-	+	+	+	57,83	59,13	61,83	59,597	4,163	b_2	0,561	0,069
4	-	-	+	+	+	2,91	0	0	0,970	2,823	b_{12}	-0,286	0,018
5	+	+	-	+	+	41,83	47,65	40,96	43,480	13,231	b_3	1,784	0,701
6	-	+	-	+	+	0	4,74	0	1,580	7,489	b_{13}	1,724	0,655
7	+	-	-	+	+	49,59	49,15	47,82	48,853	0,849	b_{23}	-1,007	0,223
8	-	-	-	+	+	9,05	0	0	3,017	27,301	b_{123}	-0,661	0,096
9	+	+	+	-	+	47,81	45,24	42,51	45,187	7,025	b_4	0,152	0,005
10	-	+	+	-	+	7,27	13,62	8,24	9,710	11,701	b_{14}	3,395	2,539
11	+	-	+	-	+	45,32	46,17	47,39	46,293	1,083	b_{24}	-2,690	1,594
12	-	-	+	-	+	5,12	8,15	10,94	8,070	8,473	b_{34}	0,526	0,061
13	+	+	-	-	+	50,94	55,14	56,02	54,033	7,370	b_{124}	-1,890	0,787
14	-	+	-	-	+	11,38	13,41	10,41	11,733	2,344	b_{134}	0,611	0,082
15	+	-	-	-	+	34,92	31,13	35,27	33,773	5,271	b_{234}	2,138	1,007
16	-	-	-	-	+	2,18	11,41	6,22	6,603	21,408	b_{1234}	1,279	0,360
17	+	+	+	+	-	53,62	52,31	54,68	53,537	1,409	b_5	0,873	0,168
18	-	+	+	+	-	0	7,32	1,63	2,983	14,769	b_{15}	0,873	0,168
19	+	-	+	+	-	55,14	52,03	53,84	53,670	2,440	b_{25}	0,104	0,002
20	-	-	+	+	-	4,94	0	2,13	2,357	6,139	b_{35}	-0,606	0,081
21	+	+	-	+	-	35,07	32,51	34,38	33,987	1,754	b_{45}	-0,515	0,058
22	-	+	-	+	-	2,94	0	3,17	2,037	3,124	b_{125}	0,082	0,001
23	+	-	-	+	-	51,73	52,15	54,61	52,830	2,420	b_{135}	-0,347	0,026
24	-	-	-	+	-	4,86	2,53	0	2,463	5,908	b_{145}	-0,263	0,015
25	+	+	+	-	-	42,27	45,93	43,12	43,773	3,669	b_{235}	-0,651	0,093
26	-	+	+	-	-	8,08	11,02	7,71	8,937	3,289	b_{245}	0,114	0,003
27	+	-	+	-	-	41,95	42,72	46,09	43,587	4,848	b_{345}	0,263	0,015
28	-	-	+	-	-	9,31	5,78	11,34	8,810	7,916	b_{1235}	-0,942	0,196
29	+	+	-	-	-	43,63	47,53	46,18	45,780	3,923	b_{1245}	0,138	0,004
30	-	+	-	-	-	10,87	8,68	13,91	11,153	6,898	b_{1345}	0,238	0,012

31	+	-	-	-	-	29,14	26,97	22,73	26,280	10,629	b_{2345}	-0,689	0,104
32	-	-	-	-	-	6,18	4,93	3,51	4,873	1,785	b_{12345}	-0,647	0,092
									$\sum_{i=1}^{N} S_i^2$	204,64		$\sum$ %	99,076

Примечание:

[redacted] - коэффициенты уравнения регрессии, отброшенные, как не значимые.

Проверка гипотезы однородности дисперсии опытов:

$$G_{0,05;2;32}^{табл} = 0{,}198\,;\; G^{расч} = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^{N} S_i^2} = \frac{27{,}301}{204{,}642} = 0{,}133\,.$$

Т.к. $G^{расч} < G_{0,05;2;32}^{табл}$, то с доверительной вероятностью 95% и соответствующим числом степеней свободы принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

Дисперсия воспроизводимости опытов (отклика):

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i^2 = \frac{204{,}642}{32} = 6{,}4\,.$$

Величина доверительного интервала для коэффициентов уравнения регрессии:

$$\Delta b_i = t_{0,05;32}\sqrt{\frac{S_{\bar{y}}^2}{f}} = 2\sqrt{\frac{6{,}4}{64}} = 0{,}63\,.$$

Таким образом, коэффициенты регрессии значимы с доверительной вероятностью 95%, если их абсолютная величина больше величины доверительного интервала.

$$0{,}63 \le |\Delta b_i|\,.$$

При выполнении дисперсионного анализа необходимости проверять адекватность полученной модели нет, так как суммарный процент дисперсий отклика больше 85%. Следовательно, учтены все факторы и их взаимодействия существенно влияющие на отклик.

Открытое акционерное общество
Научно-производственное предприятие
«КАЛУЖСКИЙ
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
ЗАВОД «ТАЙФУН»

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер –
Первый заместитель
Генерального директора
_____ А.А. Петраков
«04» 10 2013г.

АКТ

от 02.10.2013 № 324-10/В
г. Калуга

О внедрении результатов
научного исследования

Настоящий Акт удостоверяет, что научно-обоснованные рекомендации, полученные на основе проведенных многофакторных экспериментов по резанию гидроабразивной струей листовых стеклотекстолитов различных толщин, разработанные ведущим инженером-технологом ОГТ, аспирантом третьего года обучения ФГОУ ВПО «Госунивеситет-УНПК», г.Орел Журавлевой Т.А. используются при раскрое листовых стеклотекстолитов, применяемых в производстве радиоэлектронных систем, серийно выпускаемых ОАО «Тайфун».

Внедрение методики резания листовых стеклотекстолитов гидроабразивной струей позволило:

- достигнуть существенного, до 4,5...4,8 раз, снижения трудоемкости изготовления деталей из листовых стеклотекстолитов;
- сократить производственный цикл изготовления сборочных единиц и изделий основной номенклатуры на 20..22%;
- снизить себестоимость изготовления деталей сложного профиля на 40…50%;
- существенно повысить точность изготовления деталей (достижимая точность изготовления до ± 0,1мм, точность взаимного расположения поверхностей ±0,05мм);
- устранить недостатки обработки листовых стеклотекстолитов механическими методами, производить обработку листовых стеклотекстолитов без образования пыли, негативно влияющей на здоровье оператора.

Годовой экономический эффект составил 1580000 рублей.

Исполнительный директор
по основному производству _____ А.А. Каратаев

Главный технолог _____ В.В. Семес

Начальник бюро
инновационной деятельности _____ О.А. Короткий

Открытое акционерное общество
«КАЛУЖСКИЙ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ
ЗАВОД»

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
Дорчинец М.М.
_____
"___"_____2014г.

АКТ
от 20.04.14 № 22
г. Калуга

О внедрении результатов
научно-исследовательской
работы

Комиссия в составе главного технолога Шестернева С.И., начальника цеха №5 Косолапова В.И., начальника техбюро цеха №5 Ефимовой Л.В. подтверждают, что технологические режимы и методика обработки листовых слоистых стеклопластиков методом гидроабразивной резки, разработанная аспираном ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел Журавлевой Т.А. используется при обработке листовых стеклотекстолитов, применяемых в производстве деталей «Плата» (РИВУ.757.534.187), выпускаемых ОАО «КЭМЗ».

Внедрение методики обработки листовых слоистых стеклопластиков позволило:

- снизить себестоимость изготовления деталей на 12…15%;
- снизить трудоемкость изготовления деталей в среднем в 2…2,5 раза;
- повысить точность изготовления деталей;
- улучшить экологию рабочего места.

Годовой экономический эффект составил 127 000 рублей.

Главный технолог Шестернев С.И.

Начальник цеха №5 Косолапов В.И.

Начальник техбюро цеха №5 Ефимова Л.В.

Открытое акционерное общество
«КАЛУЖСКИЙ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ
ЗАВОД»

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
Дорчинец М.М.
_____
"____"_____2014г.

АКТ

от 20.04.14 № 21

г. Калуга

О внедрении результатов
научно-исследовательской
работы

Комиссия в составе главного технолога Шестернева С.И., начальника цеха №5 Косолапова В.И., начальника техбюро цеха №5 Ефимовой Л.В. подтверждают, что технологические режимы и методика обработки листовых слоистых стеклопластиков методом гидроабразивной резки, разработанная аспираном ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел Журавлевой Т.А. используется при обработке листовых стеклотекстолитов, применяемых в производстве деталей «Прокладка» (РИВУ.757.534.062), выпускаемых ОАО «КЭМЗ».

Внедрение методики обработки листовых слоистых стеклопластиков позволило:

- снизить себестоимость изготовления деталей на 15…18%;
- снизить трудоемкость изготовления деталей в среднем в 2,5…3 раза;
- повысить точность изготовления деталей;
- улучшить экологию рабочего места.

Годовой экономический эффект составил 238 000 рублей.

Главный технолог Шестернев С.И.

Начальник цеха №5 Косолапов В.И.

Начальник техбюро цеха №5 Ефимова Л.В.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ГРУППА
АВТОКОМ

КЗАЭ

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
КАЛУЖСКИЙ ЗАВОД
АВТОМОБИЛЬНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

248631 г. Калуга, ул. Азаровская, 18
тел./факс(0842) 55-06-79, телетайп 183184 РЕЛЕ
для телеграмм Калуга 17 КЗАЭ ОКПО 00232383

ИНН 4028000015/КПП402801001
р/с 40702810900010000053
в ф-ле АКБ «Фора-Банк» (ЗАО) в г.Калуге
к/с 30101810000000000770
БИК 042908770
ovs@kzae.kaluga.ru
www.kzae.ru

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
ОАО «КЗАЭ»
_____ Вихорев В. В.
«03» _____ 2014 г.

АКТ
выполнения опытных работ от 03.04. 2014 г.

Комиссия в составе зам. директора по подготовке производства Заломова А.Е., начальника ОТК Хромова В.В. и инженера технолога ТО Алешиной Н.С. подтверждают, что детали для выпуска опытно-промышленной партии нового изделия Траверза № МЭ 236-3730.321-10 в количестве 100 шт. из материала стеклотекстолит СТЭФ-1 ГОСТ 12652-74 толщиной 1,5 мм., изготовленные на ОАО «Калужский приборостроительный завод «Тайфун» методом гидроабразивной резки по методике обработки листовых слоистых стеклопластиков, разработанной аспирантом ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г.Орел Журавлевой Т.А., выполнены качественно в соответствии с конструкторской документацией. Расслоения на поверхности материала отсутствуют.

Выполнение данной работы позволило на этапе освоения нового изделия сэкономить 240,000 тыс. рублей для изготовления штамповой оснастки и сократить сроки подготовки партии опытных образцов на 3 месяца.

Зам. директора по подготовке производства: Заломов А.Е.

Начальник ОТК: Хромов В.В.

Инженер технолог ТО: Алешина Н.С.