

## **ОБОБЩАЮЩИЙ ОТЧЕТ**

**«Внедрение технологии низкоповреждающей механической обработки изделий из ПКМ в производство методических и конструктивно-подобных образцов для специальной квалификации импортозамещающего ПКМ в проекте МС-21»**

Представляется на конкурс «Авиастроитель года»  
в номинации: «За лучший инновационный проект», 2024 год

Авторы: Титов С.А., Захаржевский П.А., Болсуновский С.А., Калинин А.Г.,  
Корнилов Г.А.,

Жуковский, ФАУ «ЦАГИ» им. Н.Е. Жуковского  
2025 год

## Реферат

Отчет стр. 71, рис. 45, табл. 6, список материалов по теме 15

Тематические и конструктивно-подобные образцы из ПКМ, специальная квалификация импортозамещающего ПКМ для проекта МС-21, низкоповреждающая лезвийная обработка, (фрезерование и сверление) ПКМ, повышение качества обработки для экспериментальной оценки характеристик ПКМ на образцах, повышение прочности деталей авиационных конструкций, подлежащих при низкоповреждающей механической обработке

**Объект исследования:** низкоповреждающая механическая лезвийная обработка полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе на оборудовании с ЧПУ.

**Цель работы:** разработка и внедрение технологии низкоповреждающей механической обработки с применением современного лезвийного инструмента и отечественного инструмента с абразивной поверхностью для чистовой доработки кромок в деталях из ПКМ; исследование влияния параметров обработки (скорость резания, подача, способ охлаждения) на прочностные характеристики изготавливаемых деталей, изготовление методических и конструктивно-подобных образцов деталей из импортозамещающего ПКМ в проекте МС-21.

**Методическая основа:** исследования обработанных кромок композиционного материала с применением компьютерной томографии, оптической, электронной ультразвуковой микроскопии, испытания образцов на статическую прочность при сжатии и усталостную долговечность.

**Результаты работы:** внедрение технологии в 2024 году сопровождалось получением следующих результатов:

*В работе получены следующие результаты:*

- выполнена экспериментальная оценка влияния типа и технологических параметров механической обработки на повреждаемость обработанных кромок в деталях из ПКМ;
- подготовлена расчетная модель ПКМ, учитывающая образующиеся в процессе механической обработки межслоевые расслоения микро- и макро-масштаба;
- подтверждена сходимость результатов расчета по сопоставлению с экспериментальными данными (на примере диаграммы напряжение-деформация);

- показано, что использование технологии низкоповреждающей лезвийной обработки ПКМ позволяет повысить статическую прочность образцов при сжатии на 15%, а усталостную долговечность по традиционному критерию разрушения (разрушение на 2 части) не менее чем в 4 раза.

Внедрение в 2024 г. в производство ФАУ «ЦАГИ» разработанной технологии низкоповреждающей механической обработки деталей из ПКМ, обеспечила получение реальных прочностных и ресурсных характеристик исследуемых импортозамещающих ПКМ при снижении в ~ 3 раза разброса их характеристик в эксперименте.

К концу 2024 г. в разработанной технологии было изготовлено более 10,0 тысяч методических и конструктивно-подобных образцов для проведения специальной квалификации импортозамещающего ПКМ в проекте МС-21.

Данные работы выполнялись по договорам с ПАО «Иркут» и «Яковлев», договорам с Институтом конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН), в рамках совместных работ с Российским государственным университетом путей сообщения (РГУПС), а также при выполнении научно-исследовательской работы «Исследование в обеспечение совершенствования конструкций больших дозвуковых АДТ в соответствии с новыми задачами экспериментальной базы ФАУ «ЦАГИ» в рамках государственного задания от 25.12.2024 г. № 020-00008-25-00 ФАУ «ЦАГИ» и Государственным контрактом № 20411.1770290019.18.011 от 03.02.2020г. «Цифровое управление производством аэродинамических моделей и изготовление демонстраторов модельных технологий» (Шифр ««Цифра - 2»).

**Область применения:**

Производство динамически-подобных свободнолетающих аэродинамических моделей из ПКМ и демонстраторов БПЛА; изготовление методических и конструктивно-подобных образцов в обеспечение конструирования и изготовления деталей ЛА из ПКМ; изготовление деталей композитных и металло-композитных конструкций ЛА различного назначения.

## Оглавление

Введение.....	5
1. Особенности механической обработки ПКМ .....	8
2. Разработка технологии изготовления проемов и отверстий в отформованных деталях из ПКМ с минимизацией повреждения кромок .....	13
2.1 Технологические рекомендации для проведения фрезерования полостей и карманов в деталях из ПКМ.....	28
2.2 Разработка технологии сверления отверстий в ПКМ.....	29
2.3 Технологические рекомендации для изготовления отверстий в деталях из ПКМ .....	34
3 Экспериментальная апробация технологии низкоповреждающей обработки ПКМ .....	35
3.1 Испытания на прочность .....	39
4. Технология финишной обработки деталей в критических зонах концентрации напряжения .....	41
4.1 Выбор параметров инструмента с абразивным покрытием инструмента и технологических режимов обработки.....	44
4.1.1 - Предварительные экспериментальные исследования влияния применения инструмента с абразивным покрытием на усталостную долговечность образцов с отверстием.....	46
5. Исследование структуры внутренних повреждений после сверления в образце из ПКМ.....	49
5.1 Результаты компьютерной томографии.....	49
5.2 Результаты акустической микроскопии.....	55
6. Разработка математической модели повреждений после сверления в деталях из ПКМ.....	58
Заключение .....	68
Список использованной литературы.....	70

## Введение

Повышение технического уровня изделий авиационной техники, наряду с другими факторами, связано с внедрением перспективных конструкционных материалов, к которым относятся полимерные композиционные материалы (ПКМ), в частности углепластики, обеспечивающие сочетание повышенной прочности и ресурса, а также существенно малый вес конструкций по сравнению с традиционными металлическими материалами. При этом для обеспечения внедрения ПКМ в авиационные конструкции предварительно необходимо проводить большое количество прочностных испытаний для выполнения специальной и общей квалификации материалов. Такие исследования выполняются в комплексе прочности ЦАГИ. Для их проведения в Научно-производственном комплексе ЦАГИ проводится вырезка методических и конструктивно-подобных образцов как плоских технологических панелей, панелей спутников, так и из деталей реальных агрегатов летательных аппаратов [1].

Физические процессы при механической обработке изделий из ПКМ существенно отличаются от обработки металлических материалов. Сложности при обработке ПКМ связаны с их анизотропной, неоднородной структурой и абразивным воздействием на инструмент, а также низкой теплопроводностью. Изделия из ПКМ необходимо обрабатывать без снижения качества обработки обуславливаемой преждевременным износом инструмента, расслоение обрабатываемой заготовки и отдельных волокон, повышенной шероховатости поверхности, обрыв волокон и неразрезанные волокна [2,3]. Образующиеся повреждения приводят к снижению усталостных и других характеристик материала, а также к существенному увеличению рассеяния их значений. Причинами образования дефектов могут быть неоптимальные режимы обработки, качество режущего инструмента, хрупкость связующего, др.

В этой связи в научно-техническом центре ЦАГИ выполнена расчетно-экспериментальная работа по выбору рациональных параметров обработки деталей из ПКМ, обеспечивающих минимизацию повреждений.

В настоящей работе рассмотрено влияние основных технологических параметров обработки и типа используемого режущего инструмента, а также применение смазывающей охлаждающей жидкости на образование микро- и макромасштабных повреждений в деталях из ПКМ, включая межслоевые расслоения, сколы связующего, вырывы волокон армирующего наполнителя. Представлена зависимость между масштабом повреждений и прочностью, долговечностью изготовленных методических образцов, испытываемых для специальной квалификации импортозамещающего материала в рамках проекта МС-21. Проведено исследование структуры образующихся

повреждений в ПКМ с применением компьютерной томографии, а также новой технологии акустической микроскопии. Разработана расчетная модель с применением метода конечных элементов, позволяющая оценить снижение значений прочностных характеристик ПКМ в зависимости от размеров внешних и внутренних повреждений.

Также предложена новая технология финишной, локальной обработки зон концентрации напряжений в деталях из ПКМ на основе применения импортозамещающего абразивного инструмента. Обеспечивающая незначительное увеличение трудоемкости при подготовке образцов к проведению испытаний на прочность. Выполнено экспериментальное исследование влияния предложенной технологии на усталостную долговечность образцов. Представлены сравнительные кривые усталости для всех предложенных технологий обработки.

При проведении экспериментальных исследований по выбору способов и режимов изготовления отверстий в ПКМ, повышающих их качество, большое значение имеют разрешающая способность и чувствительность методов неразрушающих исследований и контроля (НМК), применяемых для обнаружения и описания вносимых технологических дефектов.

При оценке качества механической обработки ПКМ и исследовании структуры внутренних повреждений в ПКМ использованы две технологии: компьютерная томография и ультразвуковая микроскопия с оперативным контролем с ультразвуковым сигналом высокой частоты  $\sim 100$  МГц. Представлены результаты исследований структуры внутренних повреждений в слоистых ПКМ в зависимости от разных режимов обработки. Данные исследования использованы для разработки расчетной модели ПКМ, учитывающей образующиеся в процессе механической обработки межслоевые расслоения микро- и макро-масштаба. Результаты моделирования сопоставлены с полученными в эксперименте.

На основе выполненного расчетно-экспериментального исследования сформирована и внедрена в производство ФАУ «ЦАГИ» технология низкоповреждающей лезвийной обработки, включающая методику выбора рациональных параметров обработки деталей из ПКМ, обеспечивших, по сравнению с традиционной обработкой, повышение прочностных характеристик образцов и кратное снижение разброса их значений (оформлена заявка на изобретение № 2024136402 от 4.12.2024 «Способ определения оптимальных режимов резания полимерного композиционного материала»). Данная технология низкоповреждающей обработки используется в совместных работах с ПАО «Яковлев» для вырезки методических образцов, а также финишной обработки образцов, изготовленных в заводских условиях и

конструктивно-подобных образцов (КПО) перед их испытаниями на прочность в рамках проекта МС-21. В 2024 году число изготовленных образцов для общей квалификации импортозамещающих ПКМ в Проекте МС-21 достигло 10 000 единиц.

Практические результаты разработки технологии и ее внедрения в производство ФАУ «ЦАГИ» рассматриваются в данном отчете.

## 1. Особенности механической обработки ПКМ

Качество механической обработки ПКМ становится особенно важным при изготовлении методических образцов, предназначенных для определения расчетных характеристик материала.

Её повышение является актуальной проблемой, которой посвящено множество исследований, нацеленных на выявление технологических параметров, прежде всего влияющих на качество изготовления контрольных отверстий в образцах, поиск, создание и применение методов и средств, позволяющих существенно повысить качество изготовления отверстий в различных типах ПКМ [4, 5, 6, 7, 8], др.

Расслоения являются наиболее опасным дефектом при изготовлении отверстий и обработки зон концентрации напряжений в деталях из ПКМ, так как они могут критически влиять на механические характеристики изделия [3].

Например, ф. Tuncaу Bilge и др. [4] установили, что при сверлении слоистых композитов на станке с ЧПУ, технологические параметры (скорость резания, скорость подачи, тип привода) оказывают различное влияние на коэффициент расслоения при использовании новых и изношенных режущих инструментов из карбида вольфрама с плоской кромкой.

Wentai Ouyang и др. [5] для изготовления отверстий предложили технологию резки пикосекундным лазером «с двойным вращением», при которой точность обработки составляет 60 мкм, отсутствуют межслойные разрывы, трещины и заусенцы, а поверхность излома углеродных волокон ровная, без разрывов. Кроме того, механические свойства образцов из ПКМ (прочность на растяжение, усталостные характеристики) после обработки пикосекундным лазером улучшаются по сравнению с образцами, обработанными методом механического сверления.

Для сверления толстых углепластиков Sharizal A. Sobri и др. [6] предложили последовательное лазерно-механическое сверление. Для предварительного сверления (начальной стадии) – сверление с помощью 1 kW волоконного лазера, а механическое сверление – как финальная стадия. Последовательный метод сверления уменьшил общую осевую подачу и вращающий момент в среднем на 61%, что значительно повысило продуктивность и снизило механическое давление на режущий инструмент, увеличив срок службы резца. Способ последовательного лазерно-механического сверления 8 мм сверлами с 2- и 3-стружечными канавками (2- и 3-перовые сверла) без износостойкого покрытия карбидом вольфрама продемонстрировал высочайшие соотношения фактора расслоения ( $S_{FDSR}$ ).

Fei Su и др. [7] был предложен новый комбинированный процесс сверления-фрезерования для устранения влияния осевой силы на образование технологических дефектов. Результаты теоретического и экспериментального анализа режущих сил сверления-фрезерования и эксплуатационных показателей нового инструмента показали, что параметры спирального фрезерования значительно влияют на поперечные участки недеформированной стружки, а также режущие силы. При фазе сверления на выходе могут образовываться разрывы/царапины и расслоения, но во время фазы спирального фрезерования повреждения, внесенные при сверлении, могут быть уменьшены или даже полностью удалены.

Haifeng Ninh и др. [8] провели изучение стратегий многоходового фрезерования ПКМ, которые повсеместно используются для минимизации повреждений во время обработки ПКМ. Результаты подтвердили точность модели МКЭ при многоходовом процессе фрезерования углепластика. При одинаковой общей глубине радиального среза повреждение от расслоения углепластика может быть уменьшено более чем на 30% при использовании стратегии многоходового фрезерования по сравнению с процессом одноходового фрезерования.

Выполненный нами анализ повреждений, образующихся на обработанных механически (фрезерованием, сверлением) кромках деталей из ПКМ, показал, что характерная средняя глубина этих повреждений около 0.1мм (рисунок 1.1).

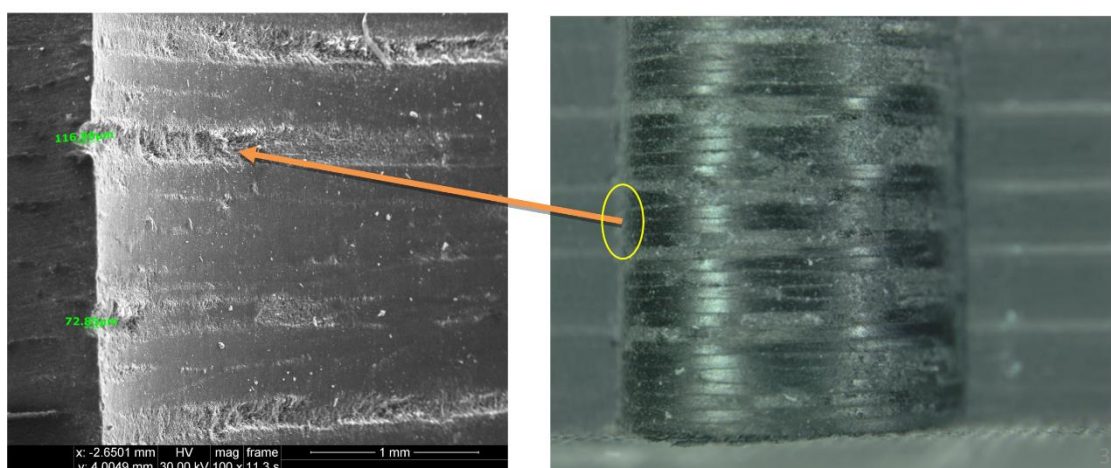


Рисунок 1.1 - Глубина повреждений на обработанных сверлом кромках отверстий (характерная глубина повреждений 0.1мм)

Также вследствие воздействия режущего инструмента на волокна армирующего наполнителя происходит разрушение их связи (адгезии) с

полимерной матрицей. Это приводит к образованию микрорасслоений в слоистом материале на некоторую глубину в прикромочной зоне (рисунок 1.2).

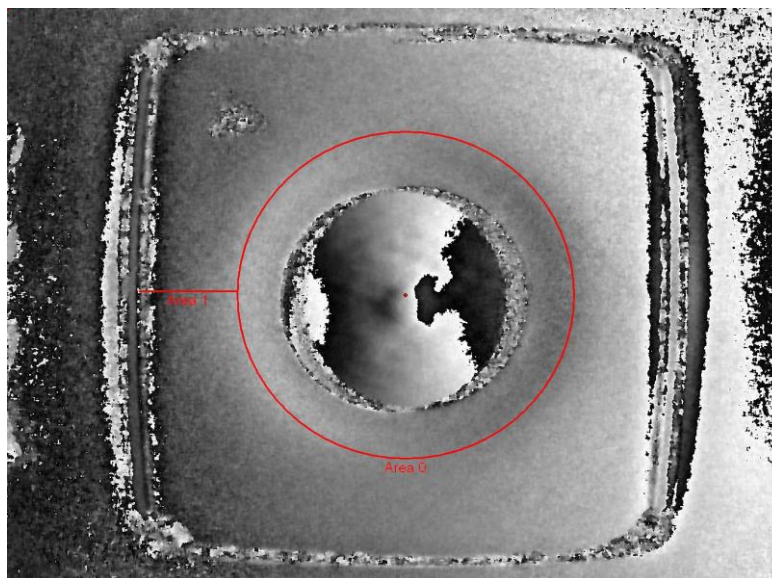


Рисунок 1.2 – Обнаруженная внутренняя поврежденная зона в образце из ПКМ после механической обработки (метод шерографии)

Дефекты образуются как за счет частичного отслоения ПКМ в детали затупленным инструментом, так и сколов полимерного связующего [2] наряду с ограниченным вытягиванием волокон наполнителя из матрицы до их разрушения, при операции фрезерования (рисунок 1.3), при сверлении (рисунок 1.4).

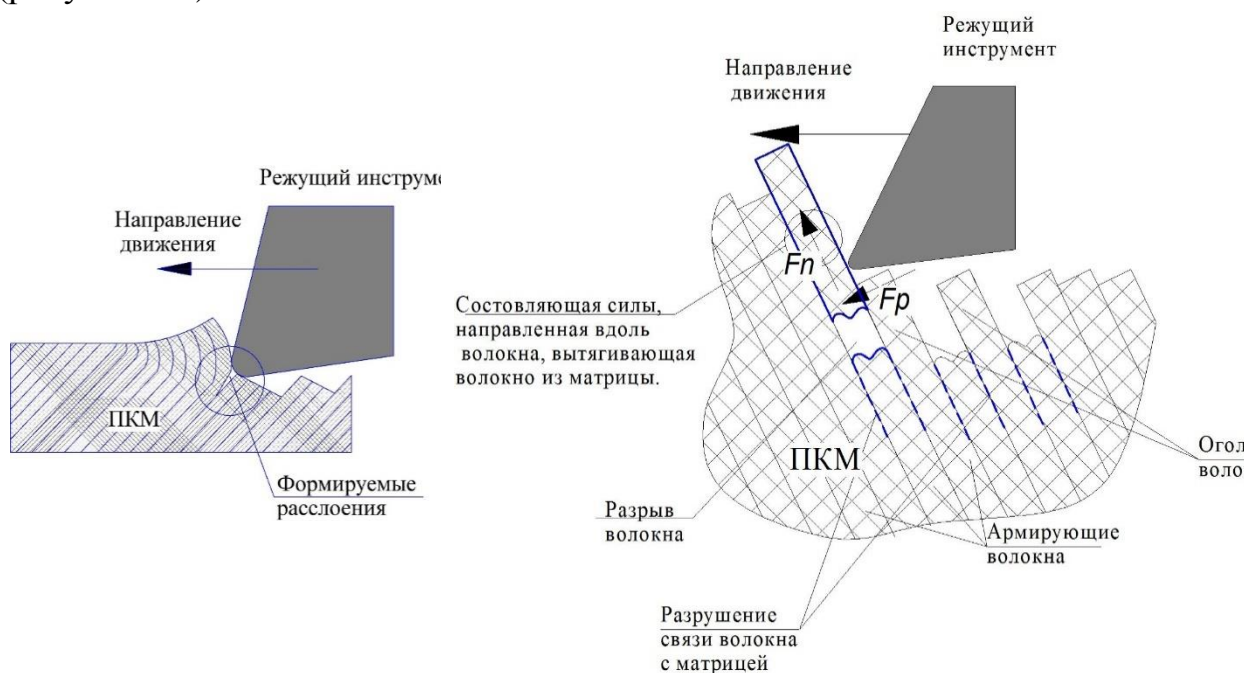


Рисунок 1.3 – Формирование внутренних повреждений в ПКМ при фрезеровании



Рисунок 1.4 – Формирование внутренних расслоений в ПКМ при сверлении

Их наличие обуславливает ускоренное разрушение деталей при статических и циклических нагрузках. Разрушение происходит в виде расслоения от обработанных кромок отверстий (рисунок 1.5).

На рисунке 1.6 в динамике показан процесс расслоения образца во время усталостного нагружения.



Рисунок 1.5.

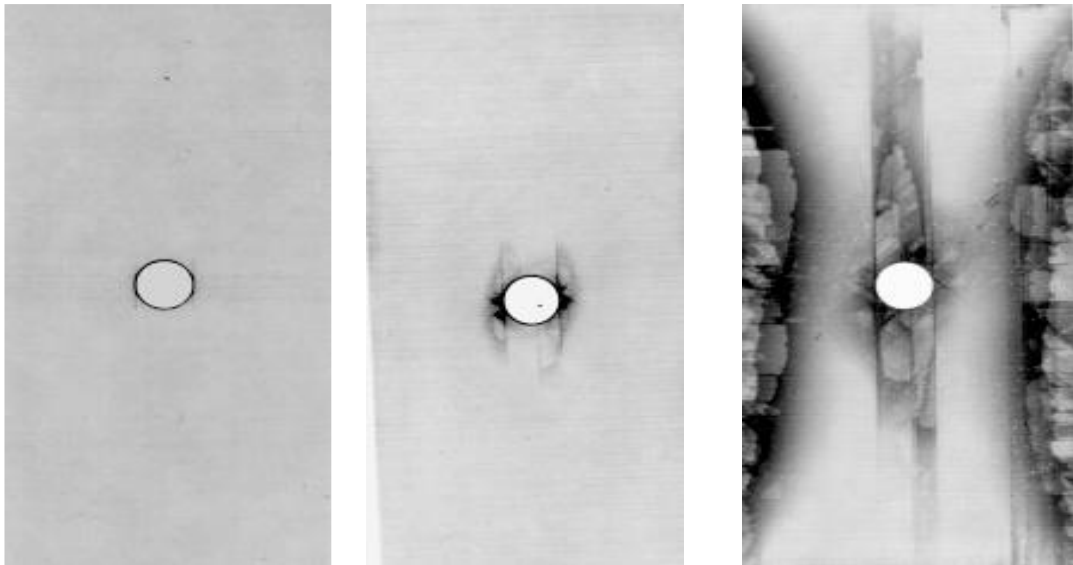


Рисунок 1.6. – Развитие отслоения слоев ПКМ при знакопеременном нагружении

Обеспечить снижение повреждаемости кромок деталей и, как следствие, повысить их прочностные характеристики можно добиться за счет выбора рациональных технологических параметров сверления. Такие работы в ЦАГИ ведутся на протяжении ряда лет. В работе [9] сформулированы технологические рекомендации для изготовления отверстий с минимизацией повреждения кромок.

Однако применение современного инструмента и выбор параметром обработки не позволяют полностью избавиться от повреждений на обработанных кромках.

В этой связи, целесообразна разработка технологического процесса обработки зон с концентраторами напряжений включающий финишную обработку с применением абразивного инструмента, при использовании которого происходит шлифование поверхности детали из ПКМ при низких образующихся температурах и усилий, действующих на слоистый материал.

## **2. Разработка технологии изготовления проемов и отверстий в отформованных деталях из ПКМ с минимизацией повреждения кромок**

Для исследования влияния основных технологических параметров механической лезвийной обработки карманов или проемов в деталях из ПКМ на масштаб повреждений на обработанных кромках, возникающие силы резания и температуру в зоне обработки предложены и проведены следующие экспериментальные исследования:

### **План эксперимента по оценке сил резания и масштабов повреждений на поверхности в результате механической обработки элемента конструкции типа карман в образцах из ПКМ**

#### Оборудование и инструмент

Станок: обрабатывающий центр с ЧПУ ARES 3618 PX5

Инструмент- концевая фреза по углепластику D6R0, z=4 (ф. Karnasch)

Измерительная платформа с пьезоэлектрическими динамометрами, профилометр для измерения шероховатости и инфракрасная камера Flir 7700.

Образцы: Углепластиковые панели с направлением волокон +-0/45/90

#### Измеряемые параметры

Силы резания вдоль осей FX, FY, FZ, масштаб повреждений на обработанных кромках, температура в зоне обработки T<sup>0</sup>C,.

#### Параметры обработки:

Обрабатываемый элемент- круглый карман D=20мм

Глубина резания: 1мм, 2.5мм, 5мм

Ширина резания: 2 мм, 4мм

Подача: 100мм/мин, 350мм/мин, 800мм/мин

Обороты шпинделя: 3000 об/мин

Направление резания- попутное или встречное из центра к периферии.

Общее количество карманов 44.

Для оценки повреждаемости в зависимости от направления укладки волокон наполнителя фрезерование производилось по специальным спиральным траекториям (Рис. 2.1).

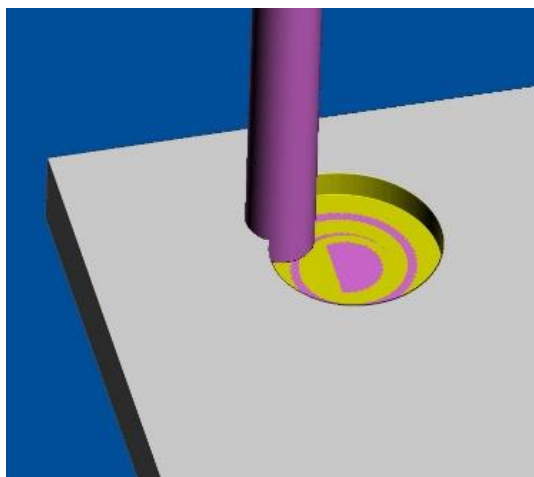


Рисунок 2.1 – Спиральная траектория движения инструмента при обработке карманов

Специализированный комплекс оборудования для измерения усилий резания при фрезеровании на обрабатывающих центрах с ЧПУ и исследуемый образец из ПКМ, установленные при проведении эксперимента в рабочей зоне станка с ЧПУ, показаны на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Кварцевый многокомпонентный динамометр тип 9257BA с опытным образцом

Типовая циклограмма усилий резания представлена на рисунке 2.3. В процессе обработки карманов проводился замер трех составляющих сил резания – по осям X, Y и Z (синий, красный и розовый цвета соответственно).

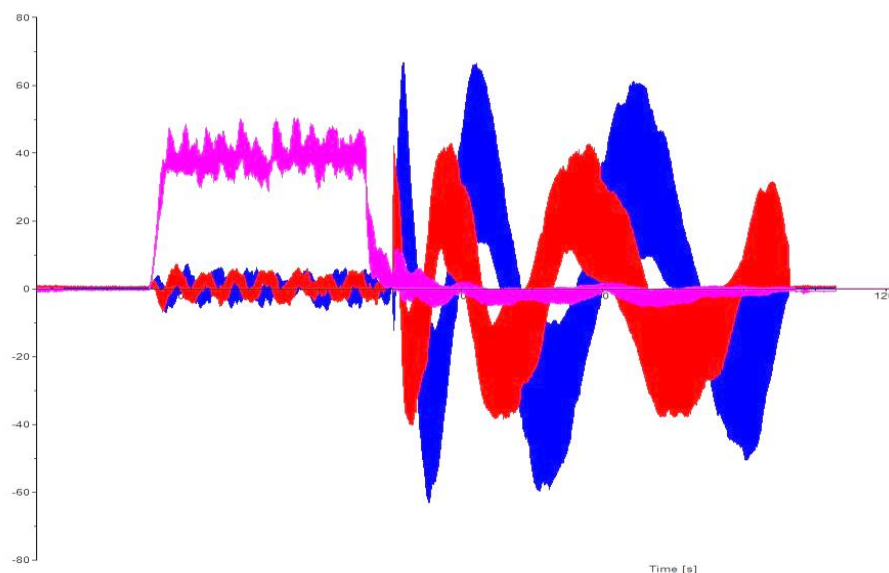


Рисунок 2.3 – общий вид усилий одного из экспериментов

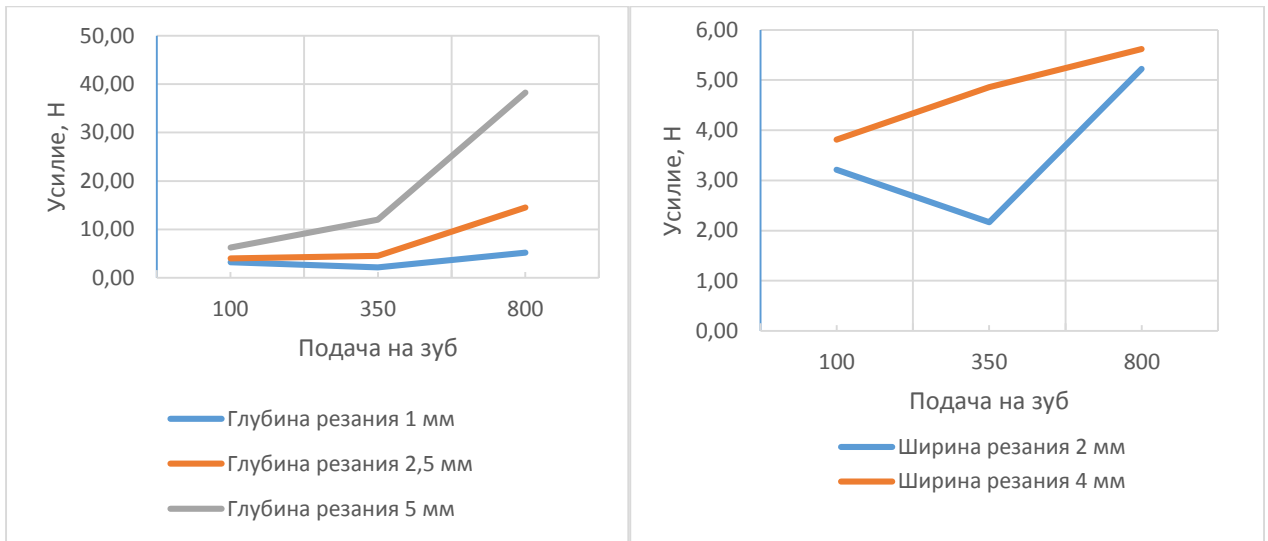
На представленной циклограмме отчетливо видно, что усилия по осям X и Y (синий и красный цвета соответственно) отличаются. Это можно объяснить особенностью структуры материала композитной пластины. В момент врезания фрезы в пластину большое усилие происходит по вертикальной оси Z (розовый цвет). В дальнейшем вертикальная составляющая усилия минимальна по сравнению с усилиями в других плоскостях, в том числе за счет небольшого угла спирали.

На рисунке 2.4 приведены сводные данные со всех 44 экспериментов, проведенных с использованием измерительного оборудования Kistler и ЧПУ CMS ARES. На основании полученных значений и наклонов кривых можно сделать заключение о зависимостях возникновения усилий в каждой из 3х плоскостей (X, Y, Z) при изменении параметров режима обработки испытуемого материала, таких как: ширина резания, скорость подачи режущего инструмента, глубина резания, количество оборотов в минуту фрезы, а также направление фрезерования. Зависимости усилий при фрезеровании от основных технологических параметров представлены на соответствующих диаграммах, рисунок 2.4.

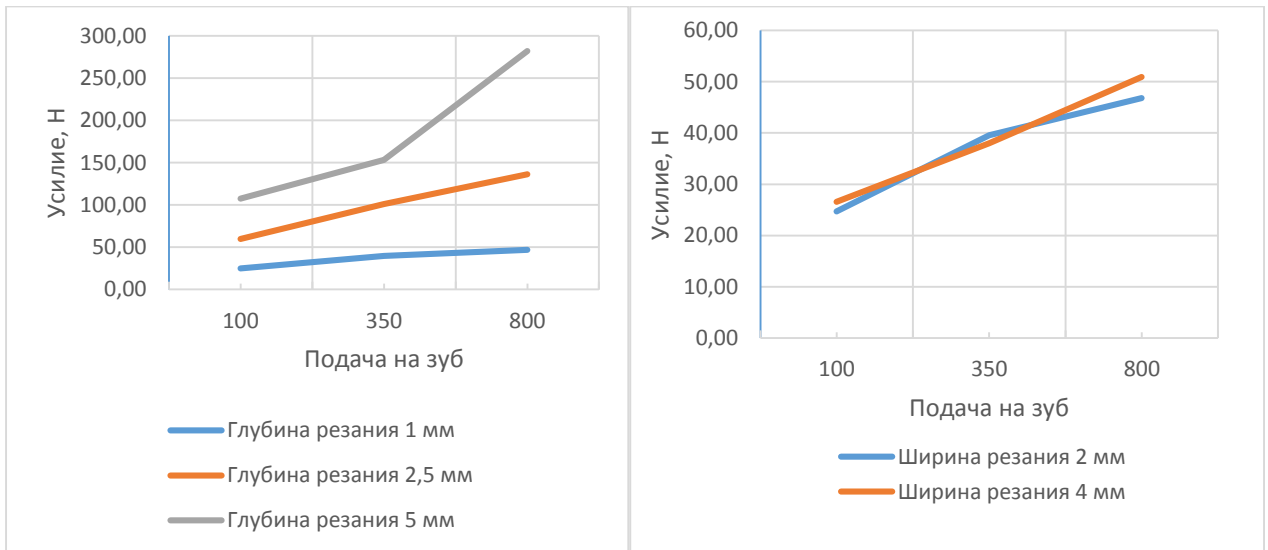
При анализе необходимо учесть, что динамометрическая платформа и АЦП не обладают идеальными точностными характеристиками и вносят погрешность в полученные результаты. Таким образом, в случаях противоречия экспериментальных данных с теорией, необходимо провести серию новых замеров для исключения случайных погрешностей.

Ниже представлены диаграммы зависимости силы резания, возникающей при проведении выборки несквозных карманов, от каждого из изменяемых технологических параметров обработки. Чтобы избежать влияние износа

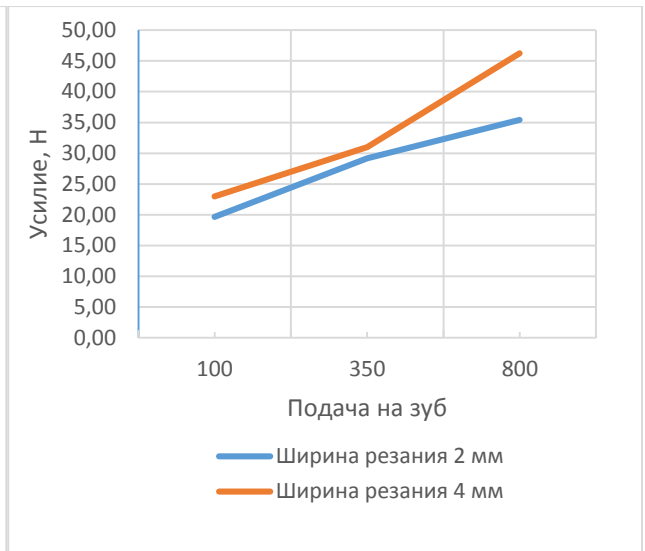
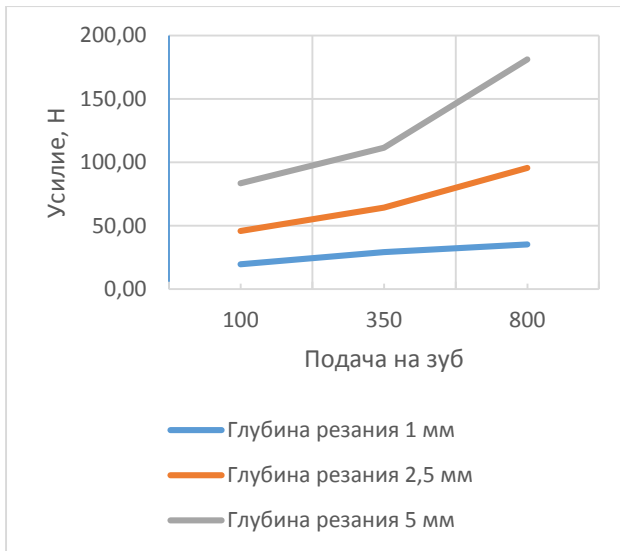
режущей кромки во время проведения эксперимента постоянно проводилась замена режущего инструмента на новый без износа.



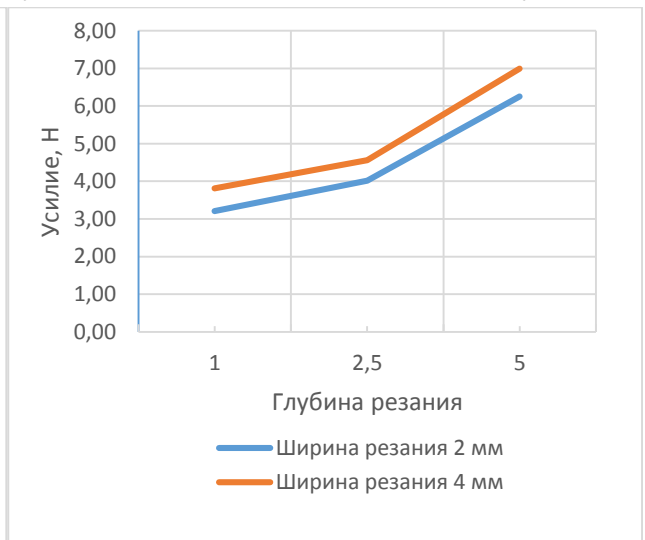
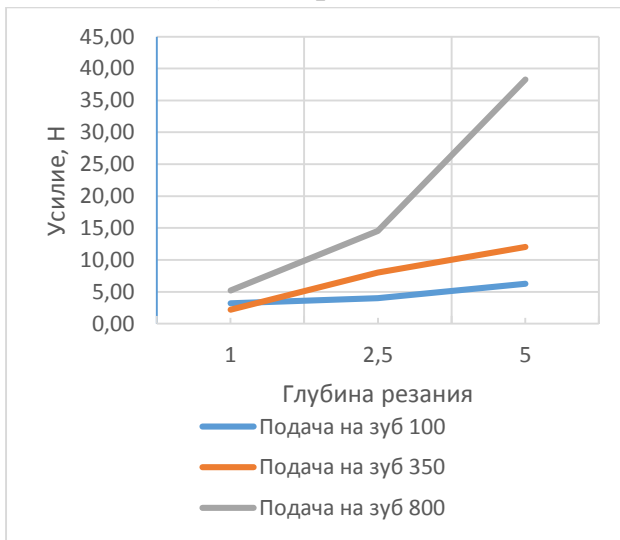
А) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от подачи на зуб



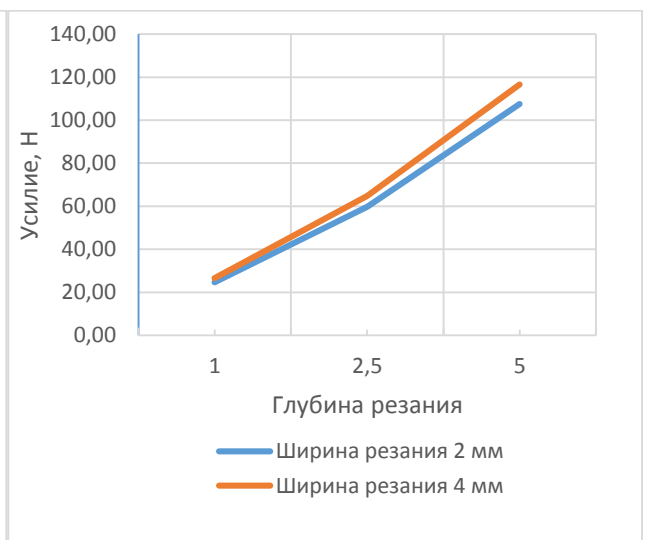
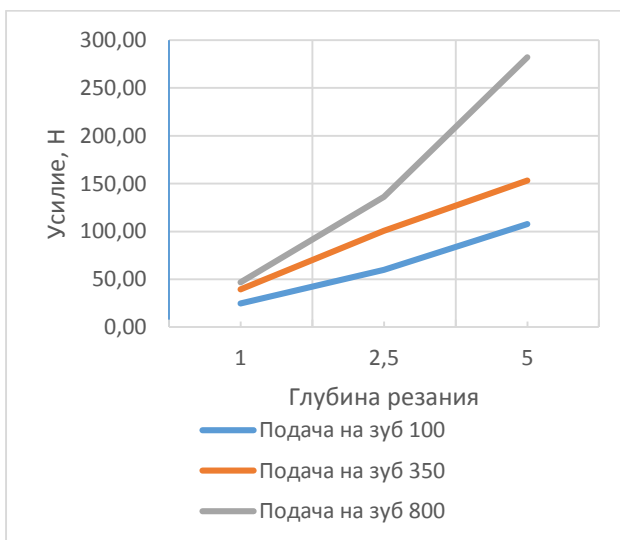
Б) Диаграммы зависимости усилий по оси X от подачи на зуб



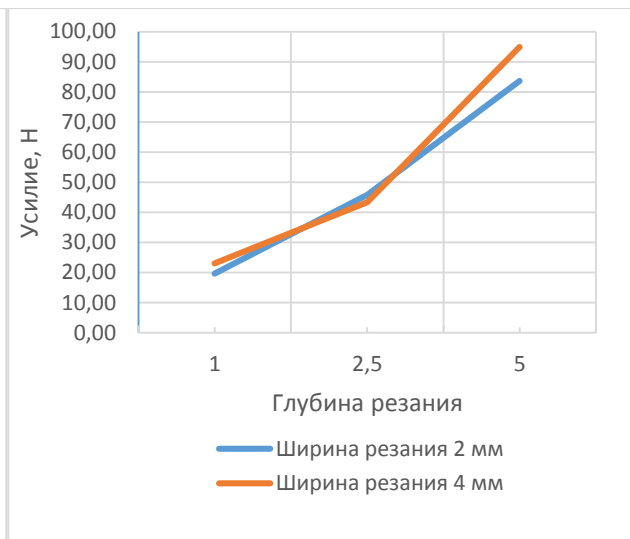
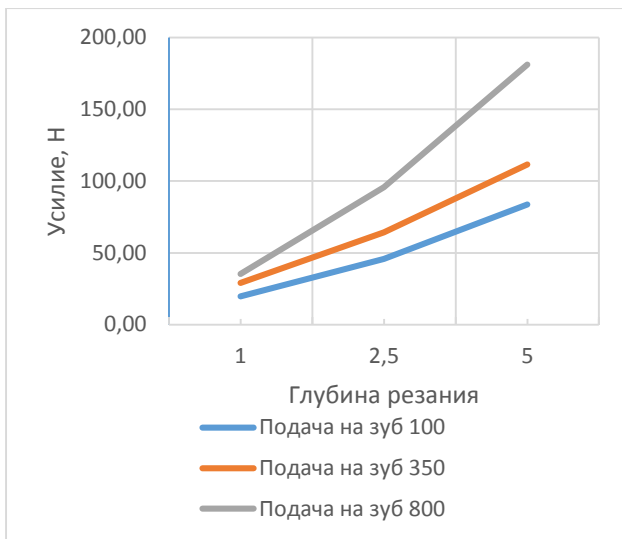
**В) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от подачи на зуб**



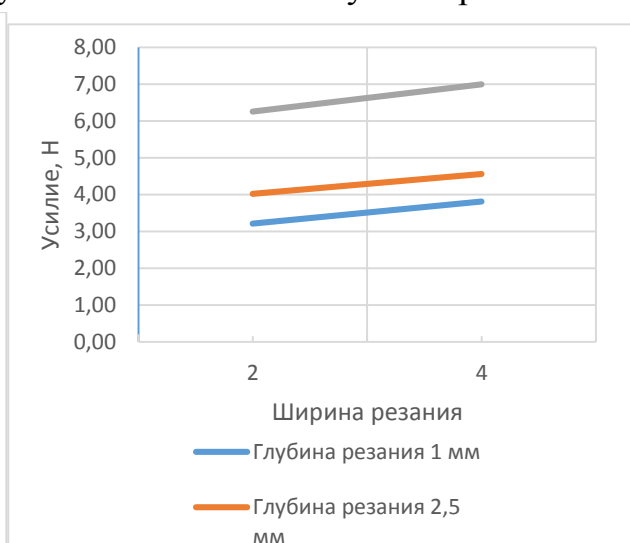
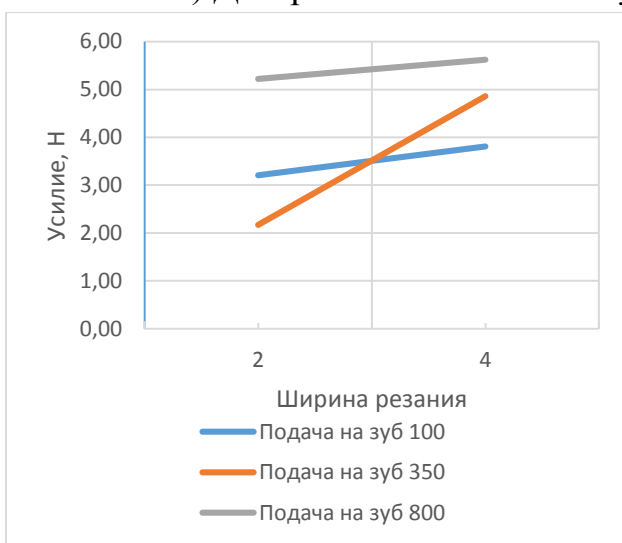
**Г) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от глубины резания**



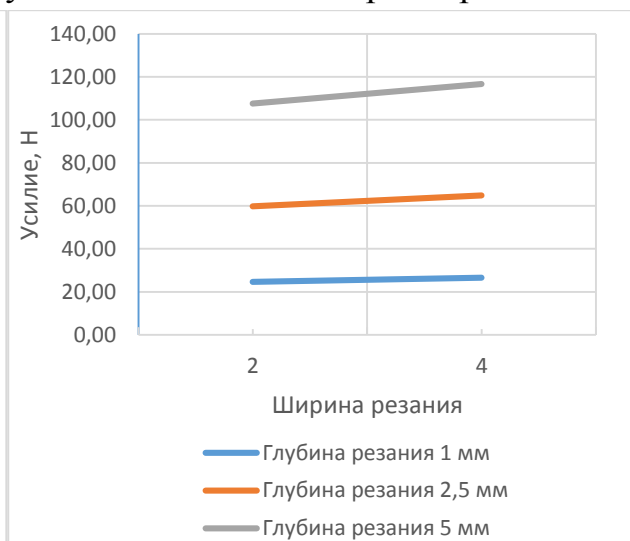
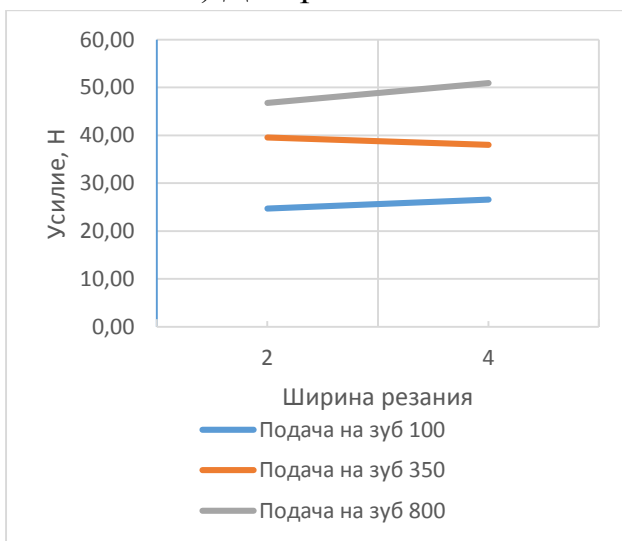
**Д) Диаграммы зависимости усилий по оси X от глубины резания**



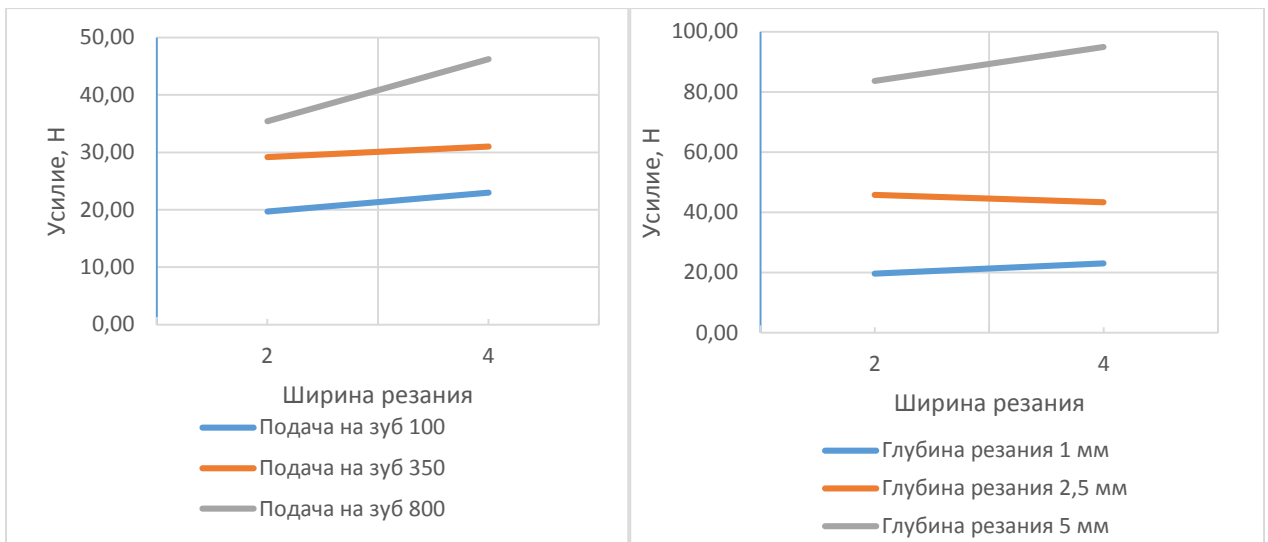
Е) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от глубины резания



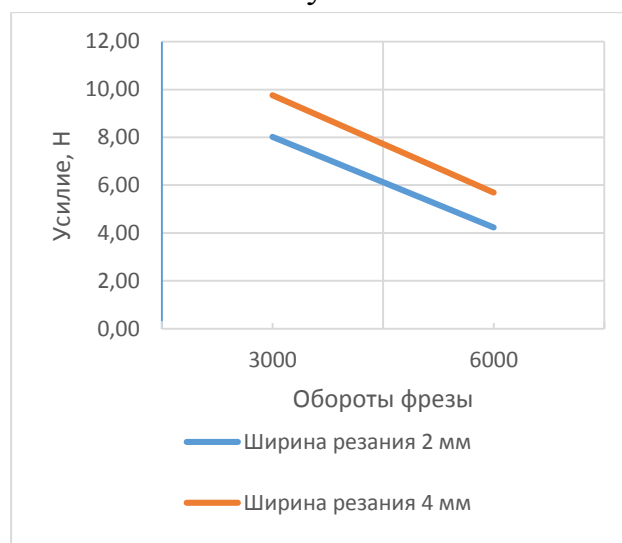
Ж) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от ширины резания



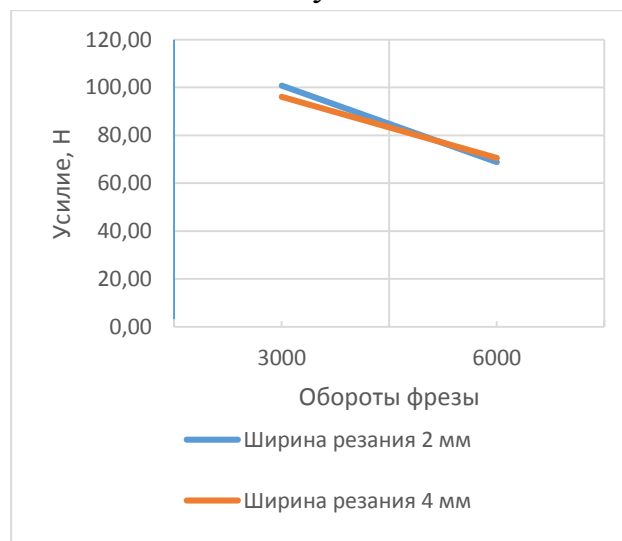
З) Диаграммы зависимости усилий по оси X от ширины резания



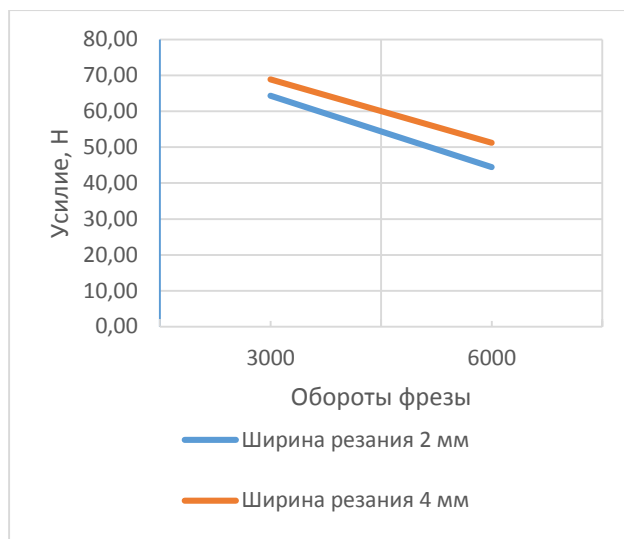
И) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от ширины резания



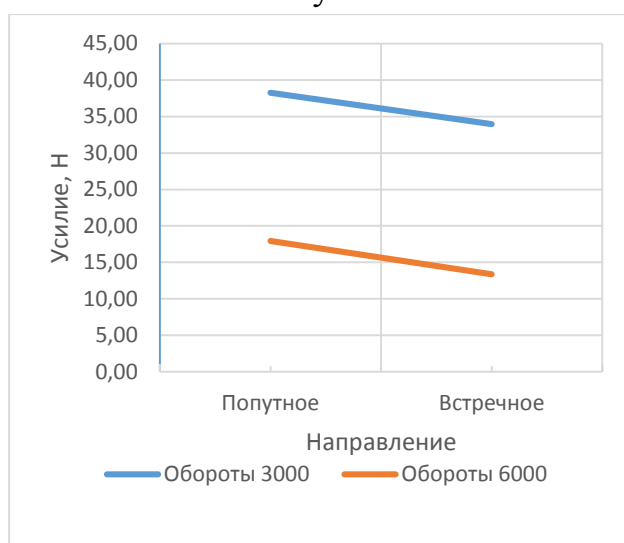
К) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от оборотов фрезы



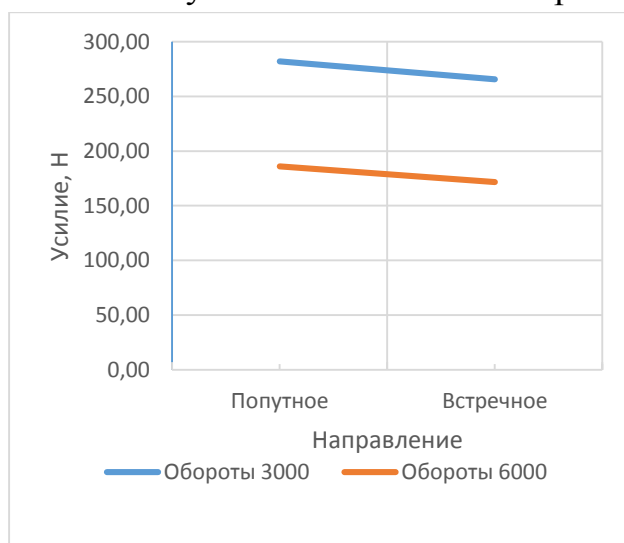
Л) Диаграммы зависимости усилий по оси X от оборотов фрезы



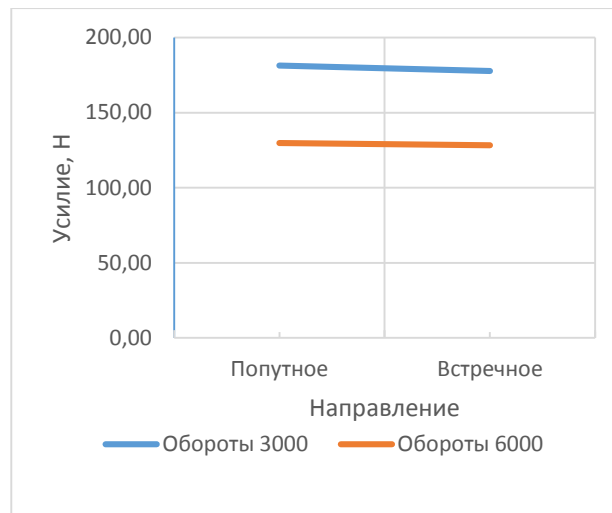
М) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от оборотов фрезы



Н) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от направления фрезерования



О) Диаграммы зависимости усилий по оси X от направления фрезерования



П) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от направления фрезерования  
 Рисунок 2.4 – Диаграммы зависимости силы резания от каждого из  
 изменяемых технологических параметров обработки

#### **Анализ усилий в зависимости от направления фрезерования**

Результаты измерения сил резания в зависимости от направления фрезерования встречного или попутного представлены на рисунках 2.4 Н-О-П.

Как видно из графиков выигрыш в уменьшении усилий от выбора встречного или попутного режима составляет в среднем 10-12%. Следовательно, при выборе режима обработки материала следует использовать встречное фрезерование.

#### **Анализ усилий в зависимости от ширины резания**

Результаты измерения сил резания в зависимости от ширины фрезерования представлены на рисунках 2.4 Ж-З-И.

Полученные результаты показывают, что на обрабатываемом образце из углепластиковой панели с направлением волокон  $+0/45/90$  изменение ширины резания практически не влияет на изменение силового воздействия обрабатывающим инструментом.

#### **Анализ усилий в зависимости от глубины резания**

Результаты измерения сил резания в зависимости от глубины фрезерования представлены на рисунках 2.4 Г-Д-Е.

Как и предполагалось, изменение глубины резания очень сильно влияет на усилия, передаваемые режущим инструментом на обрабатываемую деталь. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость возникающих сил в различных плоскостях от глубины обработки поверхности. Однако стоит отметить, что данная зависимость не всегда работает. На графиках (рисунки 2.4 Г-Д-Е) можно заметить выбросы/падения (эксперименты 28, 20, 15, 25, 33,

35), которые выделяются из общей картины испытаний. Эти явления можно объяснить неточностью измерительной платформы, плохим креплением обрабатываемой поверхности, вибрациями управляющих систем станка с ЧПУ ARES, которые передаются через жесткое крепление на измерительные элементы динамометрической платформы. При увеличении глубины обработки усилия начинают очень сильно изменяться в зависимости от заданного режима.

Для выбора оптимальных режимов обработки детали следует учесть влияние выбора глубины обработки детали на усилия, воздействующие на деталь, так как превышение этого параметра может значительно повлиять на качество обработки детали и срок службы фрез.

Вертикальная составляющая силы резания напрямую влияет на зону расслоения внешних слоев наполнителя. Для повышения производительности обработки целесообразно увеличивать ширину фрезерования, которая в меньшей степени влияет на вертикальную составляющую силы резания.

#### **Анализ усилий в зависимости от подачи на зуб.**

Результаты измерения сил резания в зависимости от подачи на зуб при фрезерования представлены на рисунках 2.4 А-Б-В.

Проанализировав полученные данные можно увидеть, как сильно влияет скорость подачи на зуб на прикладываемые усилия инструмента к обрабатываемой поверхности. Влияние подачи существенное, но не такое значительное как при увеличении глубины обработки детали. При увеличении скорости подачи наблюдается непрямая зависимость приращения силы. Таким образом, увеличение скорости подачи предпочтительнее увеличения глубины с точки зрения приложенных сил на обрабатываемую деталь и производительности обработки. Усредняя полученные результаты, можно сделать вывод, что увеличение скорости подачи в 8 раз приводит к увеличению усилий в 2 раза.

#### **Анализ усилий в зависимости от частоты вращения фрезы.**

Результаты измерения сил резания в зависимости от частоты вращения фрезы представлены на рисунках 2.4 К-Л-М.

На диаграммах видно, что увеличение частоты вращения фрезы приводит к незначительному снижению усилий резания в плоскости обработки. Наибольшее влияние частота вращения фрезы имеет на вертикальную составляющую силы резания. Предположительно увеличение количества оборотов в 2 раз приводит к уменьшению усилий в  $\sqrt{2}$  раз по осям X и Y, и по оси Z в 2 раз.

## Измерение температуры в зоне обработки

Превышение температуры стеклования связующего в зоне резания при фрезеровании может привести к его охрупчиванию и, как следствие, снизить прочностные характеристики изготовленной детали. Поэтому контроль температуры в зоне резания является необходимым при разработке рекомендаций для проведения обработки высоконагруженных деталей из ПКМ.

Лабораторные измерения температур в зоне механической обработки образцов из ПКМ проводились с помощью ИК камеры FLIR SC325 (рисунок 2.5), функционирующей в длинноволновом поддиапазоне длин волн (8÷14 мкм) и позволяющий при съемке получать поля яркости.



Рисунок 2.5 – Тепловизор FLIR SC325

Полученные экспериментальные данные обрабатывались в типовом интерфейсе ПО ThermoCAM Researcher Pro, в результате поля яркости излучения преобразовывались в термограммы.

### Методика эксперимента.

Задачей эксперимента с использованием тепловизора заключалась в определении температуры в зоне обработки детали из ПКМ и выделяемой раздробленной и содержащей пыль стружке, образующейся при механической обработке отверстия.

Тепловизионной съемке подвергался ряд карманов, отличающихся технологическими параметрами резания - ширина резания, скорость подачи режущего инструмента, глубина. Тепловизор, установленный в рабочей зоне станка с ЧПУ, показан на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Тепловизор установленный в рабочей зоне станка с ЧПУ

Карманы формировались в процессе обработки образца материала за счет обработки режущим лезвийным инструментом. Съемка осуществлялась в реальном масштабе времени с частотой 60 Гц. С использованием типового интерфейса определялись температурные поля каждого кармана. Полученные термограммы в дальнейшем использовались для оценки влияния на них изменения технологических параметров механической обработки неполых карманов в деталях из ПКМ.

### **Результаты эксперимента**

Типовая термограмма и распределение температур обрабатываемого участка одного из карманов №34, особенностью которого является наибольшая, применяемая в эксперименте подача на зуб и средние значения ширины и глубины фрезерования, представлена на рисунке 2.7. Обращает внимание, что максимальная температура находится в точке, совпадающей с осью отверстия. При этом близлежащее к оси светящееся пространство обусловлено излучением пылевой стружки, образующейся при механической обработке отверстия.

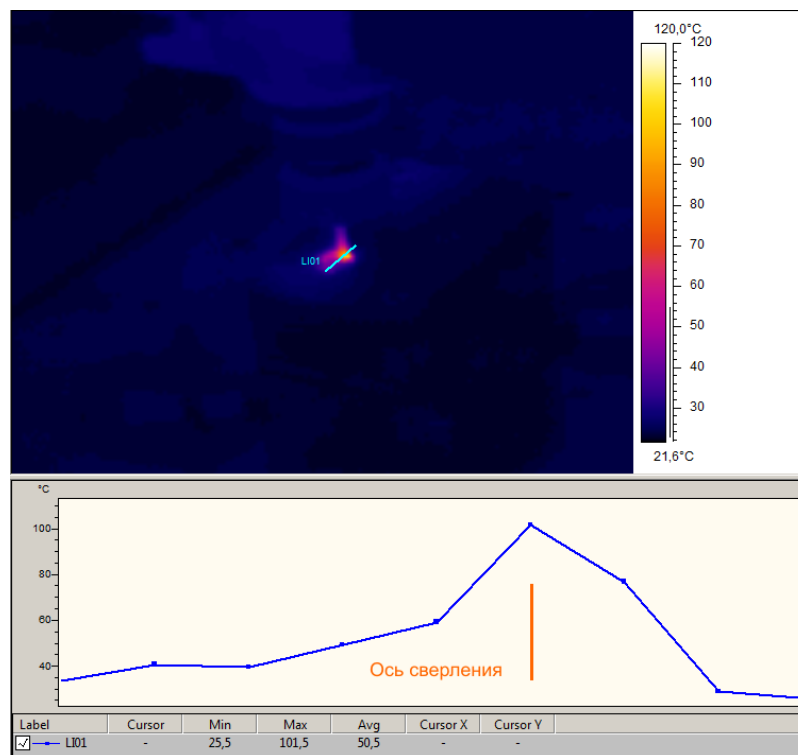


Рисунок 2.7 – Термограмма и кармана №34

На рисунке 2.8 представлена аналогичная информация относительно кармана №40. Отличие от выше рассмотренного кармана заключается в величине максимальной температуры, что обусловлено увеличенными в 2 раза оборотами.

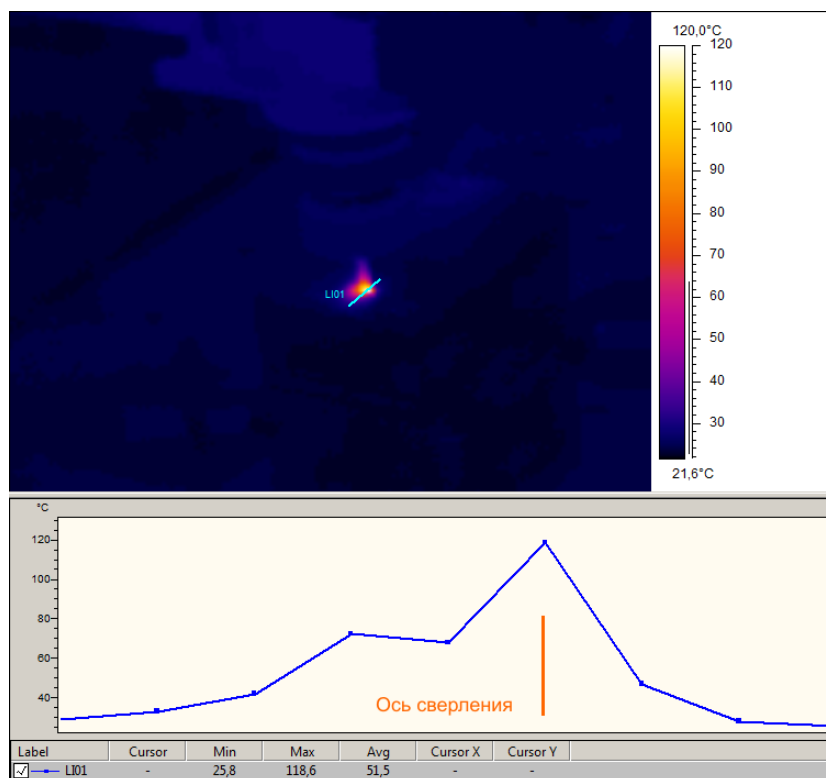


Рисунок 2.8 – Термограмма кармана №40

Результаты измерений остальных карманов представлены на рисунке 2.9.

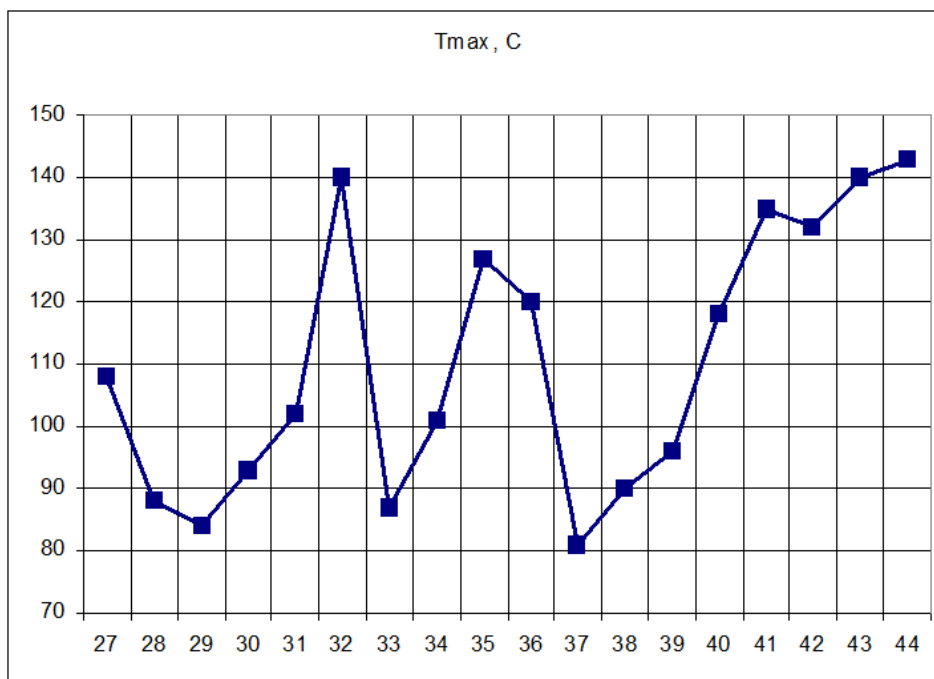


Рисунок 2.9 – Диаграмма максимальных значений температур для карманов №№ 27-44

Анализ результатов измерений показал, что разброс значений температур находится в диапазоне 80-140 °С. Большим значениям соответствуют карманы №№ 32, 41-44, а малым значениям карманы №№ 37, 29, 28. При выборе технологических параметров обработки стоит учитывать, что тепловизор позволяет получить картину распределения температур снаружи на поверхности инструмента и обрабатываемой детали. Непосредственно в зоне обработки, с учетом низкой теплопроводности углепластика, температура может быть незначительно выше на 10-15°С. В связи с этим используемые при обработке карманов №№ 32, 41-44 технологические параметры приводят к повышению температуры в зоне обработки ~160°С, что не допустимо для ряда связующих. Эксперименты 41-44 соответствуют обработке при повышенной частоте вращения фрезы 6000 об/мин. Эксперимент №32 соответствует средним значениям глубины и подачи при частоте вращения фрезы 3000 об/мин. Предположительно, определенная высокая температура в зоне обработки связана с ошибкой при анализе данных, полученных с тепловизора. Наибольшее влияние на температуру в зоне обработки осуществляет глубина фрезерования и частота вращения фрезы. При разработке технологических параметров фрезерования для достижения максимальной производительности стоит повышать в первую очередь ширину фрезерования и подачу.

Далее были построены зависимости усилий резания от изменения основных параметров резания ширины фрезерования, глубины фрезерования,

подачи на зуб, определяют тангенс угла наклона зависимостей определяющий влияние каждого параметра на результирующую силу резания, это позволило сформулировать эмпирическую зависимость:

$$F_z = C_z + C_{ae} * a_e + C_{ap} * a_p + C_{vf} * v_f$$

$$F_{xy} = C_{xy} + C_{xyae} * a_e + C_{xyap} * a_p + C_{xyvf} * v_f$$

где  $F_z$  - составляющая усилия резания по оси z,  $F_{xy}$  - составляющая усилия резания в плоскости xy,  $a_e$  - ширина резания,  $a_p$  - глубина резания,  $v_f$  - подача, коэффициенты  $C_{ae}$  - константа, соответствующая тангенсу угла наклона зависимости производительности обработки от усилия резания при изменении ширины фрезерования ( $C_{ae}$  по оси z нормали к тестовому образцу,  $C_{xyae}$  - в плоскости xy),  $C_{ap}$  - константа, соответствующая тангенсу угла наклона зависимости производительности обработки от усилия резания при изменении глубины фрезерования ( $C_{ap}$  по оси z нормали к тестовому образцу,  $C_{xyap}$  - в плоскости xy),  $C_{vf}$  - константа, соответствующая тангенсу угла наклона зависимости производительности обработки от усилия резания при изменении подачи ( $C_{vf}$  по оси z нормали к тестовому образцу,  $C_{xyvf}$  - в плоскости xy), получаемые при построении эмпирических кривых, рисунок 2.10.

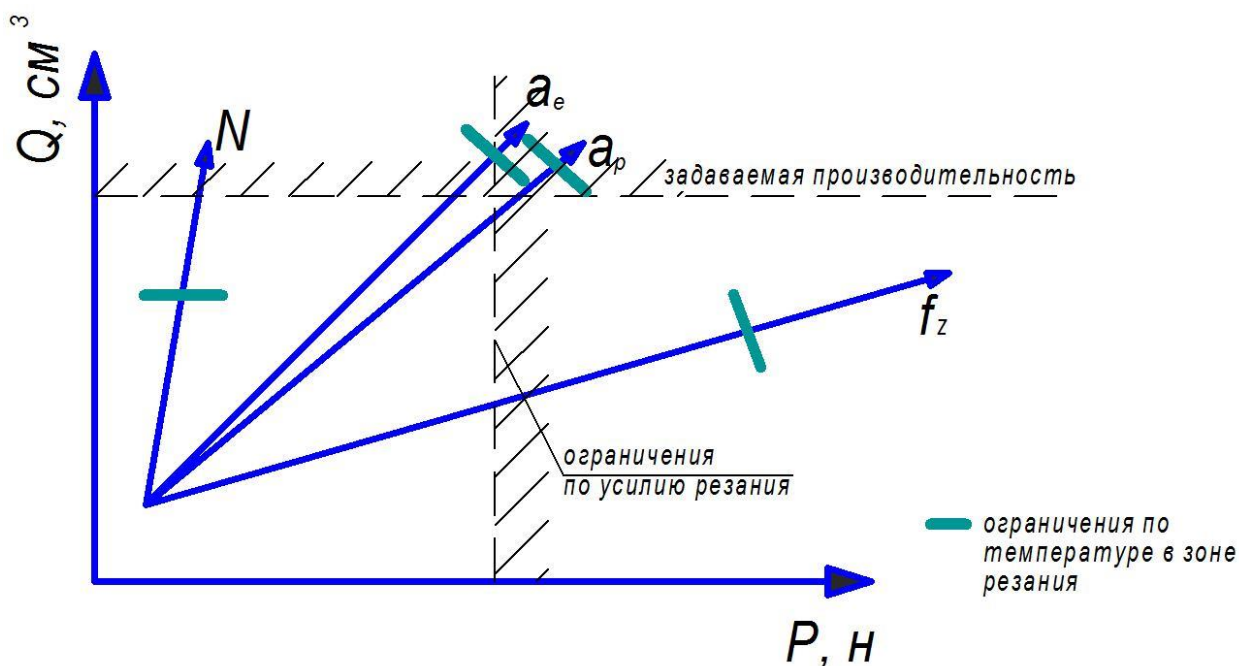


Рисунок 2.10 - Характерная зависимость усилий резания  $F_z$  и производительности обработки  $Q$  от глубины резания  $a_p$  и подачи на зуб  $f_z$

## **2.1 Технологические рекомендации для проведения фрезерования полостей и карманов в деталях из ПКМ**

Приведенные выше материалы исследований и экспериментальная обработка деталей из ПКМ, а также анализ ее результатов, создают основу для разработки рекомендаций фрезерования и сверления деталей из ПКМ.

Анализ состояния кромок деталей из ПКМ после механической обработки, а также усилий, возникающих при обработке, показывают, что основным нарушением их целостности становятся растрескивание связующего и вытягивание волокон наполнителя, при применении инструмента, наиболее острого из имеющегося, не приводит к снижению повреждаемости и усилий резания. По-видимому, усилия, возникающие при давлении волокон наполнителя на заднюю поверхность инструмента превышают снижение усилий, которое получено за счет повышенной остроты режущей кромки. Необходимо использовать инструмент с алмазоподобным защитным покрытием, которое позволяет существенно снизить силы трения, возникающие при обработке, при этом также снижается температура в зоне резания и микрорасслоения в материале.

При обработке стоит учитывать, что повреждения слоистого полимерного композиционного материала имеются не только на поверхности обработанных кромок, но и распространяются на некоторую глубину внутрь. Данные повреждения существенно влияют на прочностные свойства детали, в особой степени при усталостном нагружении – приводят к преждевременному расслоению в зоне обработки. В этой связи представляется целесообразным контролировать износ инструмента не только по износу режущей кромки и увеличению масштабов внешних повреждений на обрабатываемой поверхности, но и по возрастающим нагрузкам при обработке. Это можно определить, проводя предварительную оценку износа инструмента на тестовом образце с применением устройства для измерения усилий резания. Для ответственных, высоконагруженных деталей из ПКМ, при возрастании усилий резания на 40% и более, необходимо производить замену режущего инструмента независимо от качества обработанных кромок с точки зрения внешних дефектов.

Для повышения качества обработанных поверхностей (уменьшения шероховатости и площади с вырывами волокон) необходимо применять встречное направление фрезерования.

Для обеспечения достаточного охлаждения инструмента и зоны обработки глубину фрезерования нужно задавать не более 0.5 от диаметра

фрезы, ширину фрезерования в зависимости от необходимости задавать не более 0.6 от диаметра фрезы. При этом:

1. Охлаждение выполнять воздухом со сдувом и высасыванием опилок. Скорость резания (по частоте вращения шпинделя) ограничить по возникающей температуре в зоне резания (не должна происходить деградация связующего), при невозможности контролировать температуру в зоне резания уточнить из отсутствия перегрева, определяемого дымлением, а также видимым оплавлением и поджогом связующего.
2. При необходимости повышения производительности обработки (повышение скорости резанья), а также обработки в глубоких карманах, в каналах и углах применять для охлаждения смазывающую охлаждающую жидкость (СОЖ) без масляных фракций.
3. Для предотвращения проникновения СОЖ в обработанные поверхности деталей из ПКМ по завершении обработки проводится сдувание струей сжатого воздуха и дополнительный прогрев воздушным феном при температуре до 50°C.

Для увеличения производительности обработки увеличивать технологические параметры в следующей последовательности ширина фрезерования, частота вращения шпинделя, подача (определено по их влиянию на силы резания). При этом не допускать превышения этих параметров (на примере фрезы диаметром 6.0мм)- ширины резания более 0.8 от диаметра фрезы, обороты не более 6000 об/мин, подача не более 800 мм/мин для инструмента диаметром 6мм, при других диаметрах параметры выбираются пропорционально для обеспечения сопоставимой скорости резания. Максимальная глубина фрезерования не должна превышать диаметра фрезы.

## **2.2 Разработка технологии сверления отверстий в ПКМ**

В случае соединения деталей из ПКМ между собой или с другими деталями в конструкциях в них необходимо изготавливать отверстия. Сверление отверстий, так же, как и рассмотренное выше фрезерование, связано с повреждением кромок деталей. Образующиеся дефекты типа микротрещин, ворсистости, сколов связующего, расслоений обуславливают снижение как прочности, так и долговечности конструкций. При сверлении необходимо контролировать полученные повреждения, температуры в зоне обработки, а также возникающие осевые усилия. При этом наибольшее разрушающее воздействие на слоистый материал оказывает вертикальная составляющая силы резания.

### 2.2.1 Применение СОЖ при сверлении деталей из ПКМ

Применение СОЖ необходимо при совместном изготовлении отверстий в металло-композитных пакетах. В них для обеспечения соосности отверстий и плотной посадки крепежного элемента (болт, заклепка) отверстия необходимо изготавливать совместно за один проход.

С целью определения влияния применения СОЖ на качество получаемых отверстий в деталях из ПКМ выполнена контрольная обработка отверстий на типовом фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ без применения СОЖ, с применением СОЖ высокого давления и непосредственно в среде СОЖ (СОЖ подавалось при атмосферном давлении непосредственно в зону обработки, заполняя ее) в углепластиковых пластинах. СОЖ высокого давления используется при сверлении металлических материалов. СОЖ низкого давления соответствует обработке с применением ручных машинок для сверления, используемого в заводских условиях, а также этапу сверления металл-композитных пакетов при отключении подачи СОЖ на этапе обработки слоя из ПКМ.

Сравнение обработки отверстий производилось по следующим параметрам:

1. Размер повреждений на обрабатываемых кромках как со стороны входа инструмента, так и со стороны выхода;
2. Возникающие силы резания;
3. Температуры в зоне резания (измерения температуры в зоне резания производились с использованием инфракрасной камеры Flir 7700);
4. Шероховатости поверхности отверстий при обработке с СОЖ и без;
5. Испытания на статическую прочность при растяжении и усталостную долговечность образцов с концентратором напряжения в виде отверстия, изготовленного с применением СОЖ и без.

В результате исследования установлено, что качество обработки кромок отверстий в присутствии СОЖ и без неё близко по визуальной оценке. Однако используемое высокое давление СОЖ (характерное для обработки титановых сплавов) привело к растрескиванию деталей по кромкам отверстий. По-видимому, снижение давления обеспечит целостность углепластика на кромках. При обработке применялись режимы, характерные при применении ручных машинок для сверления отверстий с изменением частоты вращения сверла от 500 до 2000 об/мин.

Для всех обработок наблюдается повышение усилий резания при использовании СОЖ на 20-30%. Кроме того, при использовании СОЖ чётко

прослеживается постепенное нарастание усилий резания при последовательном выполнении нескольких отверстий, чего не наблюдается при отсутствии СОЖ, рисунок 2.11, 2.12. Это позволяет предположить, что с СОЖ износ инструмента протекает интенсивнее. Во всех случаях применение СОЖ устраняет перегрев углепластика в зоне резания, что позволяет повысить производительность обработки, не допуская термическую деградацию связующего в зоне резания.

При испытании образцов с концентратором напряжений в виде отверстий на ресурс установлено, что все образцы в процессе циклического нагружения расслаиваются, теряя структурную целостность. Расслоения инициируются как в зоне отверстия, так и на обработанных отрезным алмазным диском боковых поверхностях, рисунок 2.13. На окончательный вид разрушений и количество циклов до разрушения, фрезерование отверстий с применением СОЖ или без не влияет. Результаты прочностных испытаний образцов с концентратором напряжений в виде отверстий не выявил влияния сверления с СОЖ на статическую прочность и ресурс образцов. Разрушенные после проведения прочностных испытаний образцы показаны на рисунке 2.14.

При визуальном осмотре испытываемых на ресурс образцов обнаружено, что на образцах, обработанных с применением СОЖ, расслоение в отверстиях проявляется через  $\sim 1000$  циклов нагружения, в то время как в образцах, просверленных без применения СОЖ, расслоения проявляется, как правило, при количестве циклов нагружения около 4000. Принимая во внимание высокие скорости резания и несжимаемость СОЖ, можно предположить, что по сравнению с обработкой без СОЖ, увеличение внутренней зоны повреждения за счет гидроудара.

Для окончательного определения влияния обработки с СОЖ и без на ресурс конструкций из ПКМ целесообразно повторить ресурсные испытания на образцах в виде проушины, где через металлический крепежный элемент нагрузка будет приложена непосредственно к обработанной поверхности отверстия.

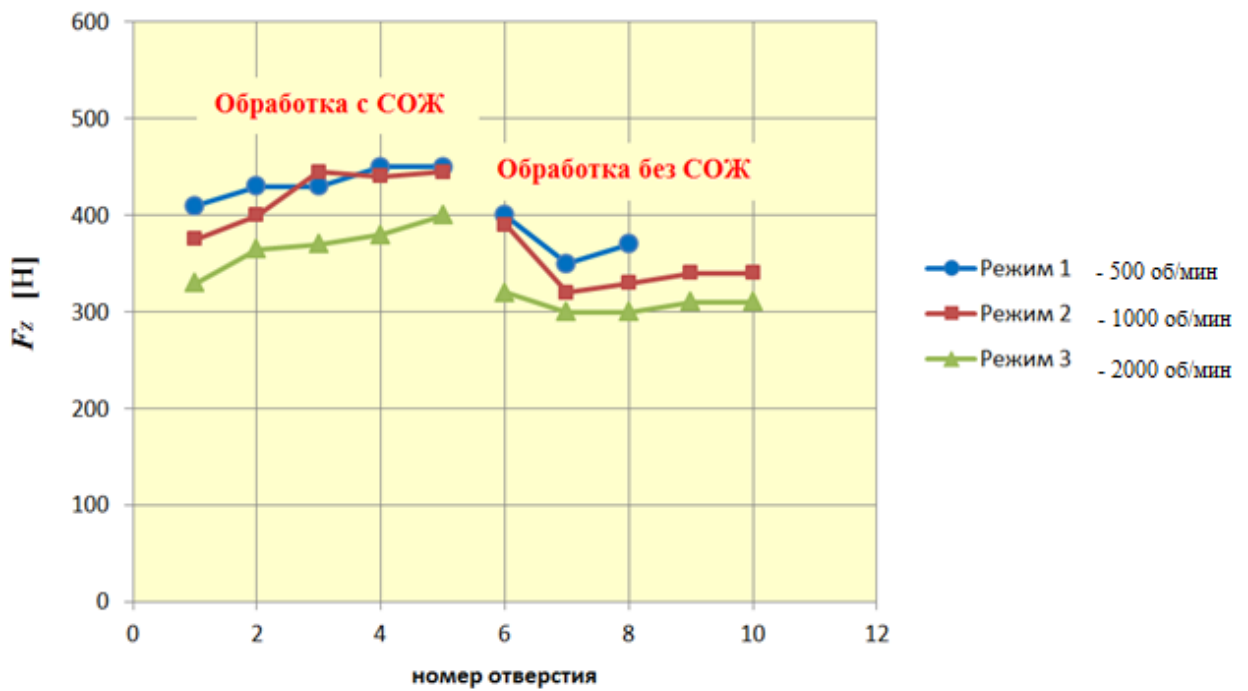


Рисунок 2.11 – Усилия резания при различных условиях обработки для каждого отверстия

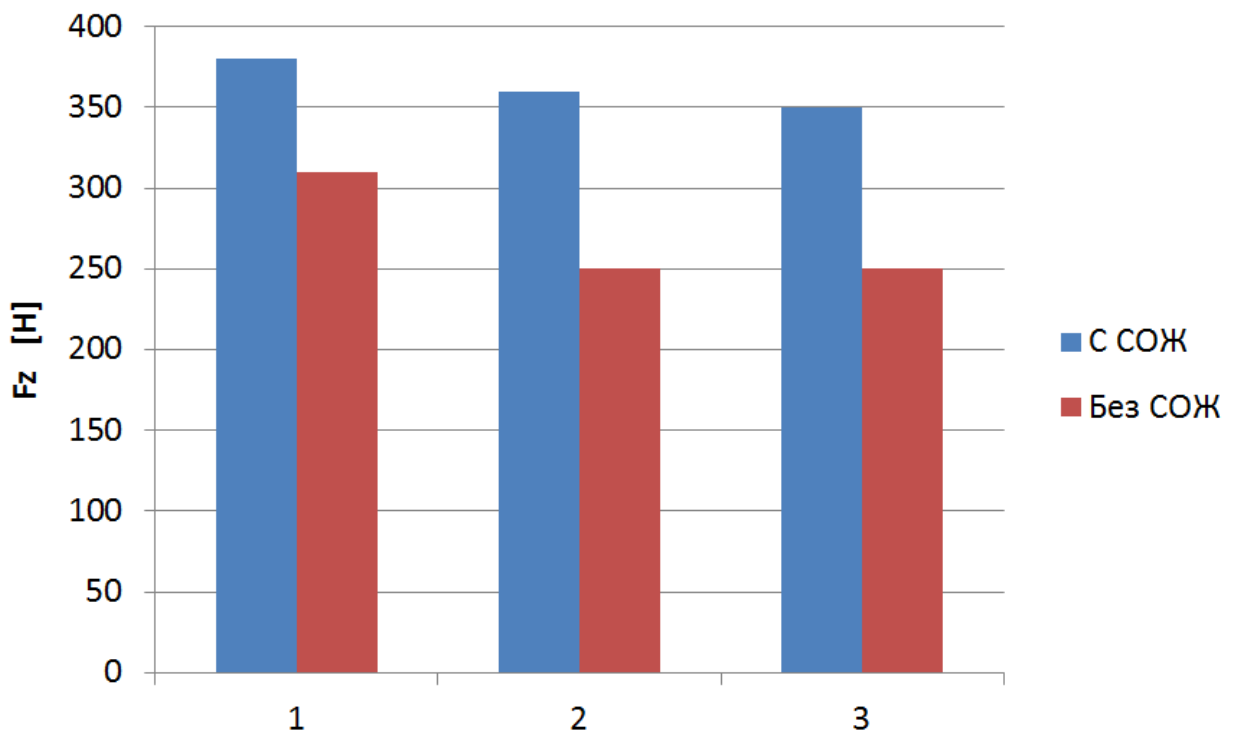


Рисунок 2.12 – Усилия резания при различных условиях обработки

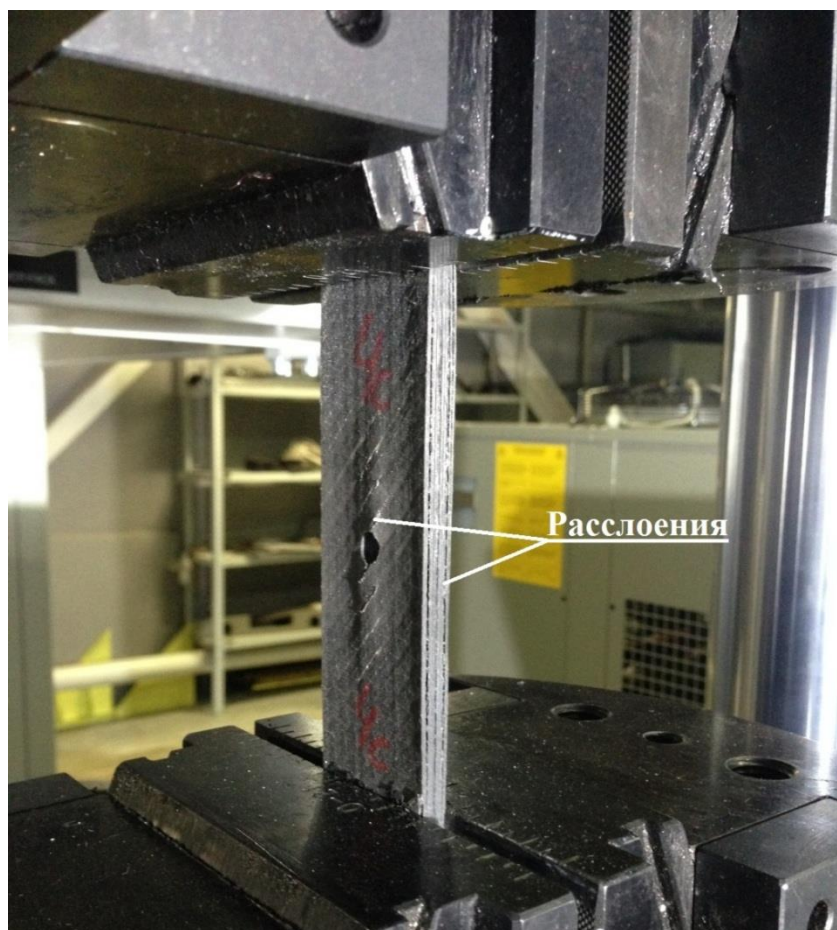


Рисунок 2.13 – Характерное расслоение образца в процессе циклического нагружения

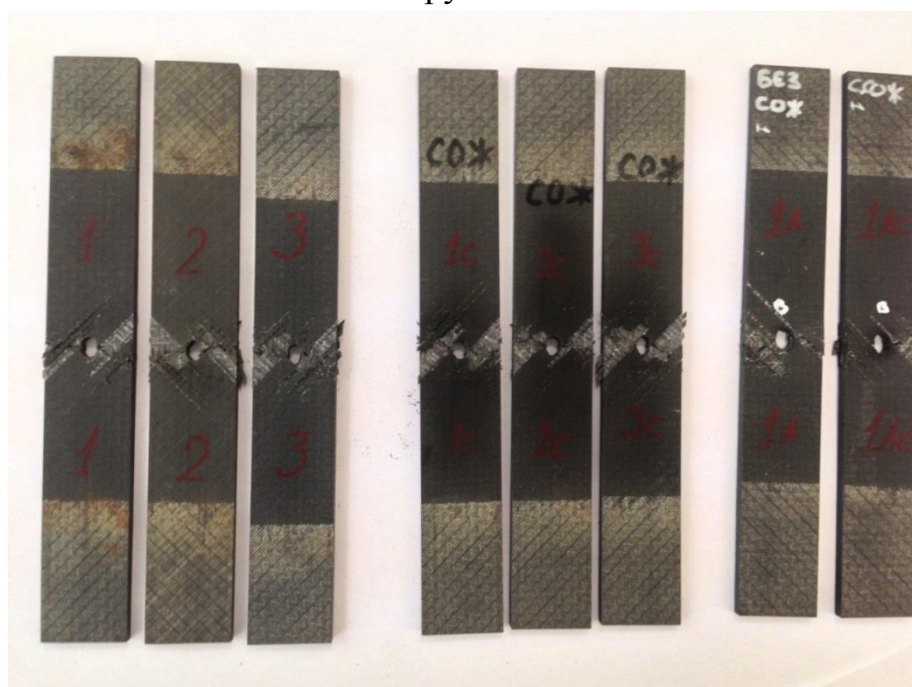


Рисунок 2.14 – Пример разрушенных образцов после проведения статических испытаний

### **2.2.2 Охлаждение зоны обработки при изготовлении отверстий в деталях из ПКМ**

1. Охлаждение выполнять воздухом со сдувом и высасыванием опилок. Скорость резания (по частоте вращения шпинделя) ограничить по возникающей температуре в зоне резания (не должна происходить деградация связующего), при невозможности контролировать температуру в зоне резания уточнить по отсутствию перегрева, определяемого дымлением, а также видимым оплавлением и поджогом связующего.
2. При необходимости повышения производительности обработки (повышение скорости резания), а также обработки в глубоких карманах, в каналах и углах применять для охлаждения смазывающую охлаждающую жидкость (СОЖ) без масляных фракций.
3. Для предотвращения проникновения СОЖ в обработанные поверхности деталей из ПКМ по завершению обработки выполнять сдувание остатков СОЖ струей сжатого воздуха с дополнительным прогревом воздушным феном при температуре до 50°C.

### **2.3 Технологические рекомендации для изготовления отверстий в деталях из ПКМ**

Поскольку обработка инструментом с алмазным напылением дает большую шероховатость на обработанных кромках по сравнению с обработкой быстрорежущей сталью можно рекомендовать следующую операционный выбор инструмента в технологическом процессе:

1. Для деталей малонагруженных – обработку (сверление) выполнять инструментом с алмазным напылением;
2. Для деталей высоконагруженных – обработку выполнять двумя инструментами:

- предварительная обработка инструментом с режущими частями с алмазным напылением (черновой проход);

- финишная обработка сверлом с максимально заостренной режущей кромкой; при этом, для снижения вероятности деламинации внешних слоев со стороны выхода инструмента, на последних 1.5-2.0мм обработки уменьшать подачу на 30-40%;

- возможно выполнение отверстий в один этап без предварительной черновой обработки.

Также необходимо обеспечить плотное прилегание обрабатываемой детали к подложке.

### **3 Экспериментальная апробация технологии низкоповреждающей обработки ПКМ**

Сформулированные рекомендации по обработке ПКМ были применены для изготовления тестовой серии элементарных образцов для проведения сравнительных прочностных испытаний с образцами, подготовленными в заводских условиях.

Объектом исследования были стандартные образцы типа «полоса с отверстием», изготовленные методом вакуумного формования слоистого углепластика толщиной 4,56 мм, с укладкой армирующих волокон [ $45^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ] в процентном соотношении 25%; 25%; 25%; 25%, соответственно. На рисунке 1 приведена фотография исследуемого типа образцов.

В образцах были изготовлены отверстия диаметром 6 мм. В одной партии образцов, (серия «З»), отверстия были выполнены по серийной заводской технологии, а в другой (серия «К») - по технологии, разработанной в ФАУ ЦАГИ, которая должна обеспечить низкий уровень повреждения поверхности отверстия в ПКМ, что позволит получать более достоверные прочностные характеристики материала и уменьшить их рассеяние.

Образец имеет минимальную геометрическую концентрацию напряжений и соотношение ширины к диаметру отверстия  $b/d=6.0$ , схема образцов представлена на рисунке 3.1. Фотоизображение изготовленных образцов для проведения статических и усталостных испытаний показан на рисунке 3.2. Образцы были разделены на две партии, которые отличались методом обработки отверстий. Серия образцов «Заводская» (серия «З») - применение современного режущего инструмента с выбранными рациональными параметрами обработки; «Абразив» (серия «К»)- метод обработки отверстия в два этапа, удаление основного объема материала при помощи сверла и доработка отверстия с применением специализированного инструмента с абразивной поверхностью.

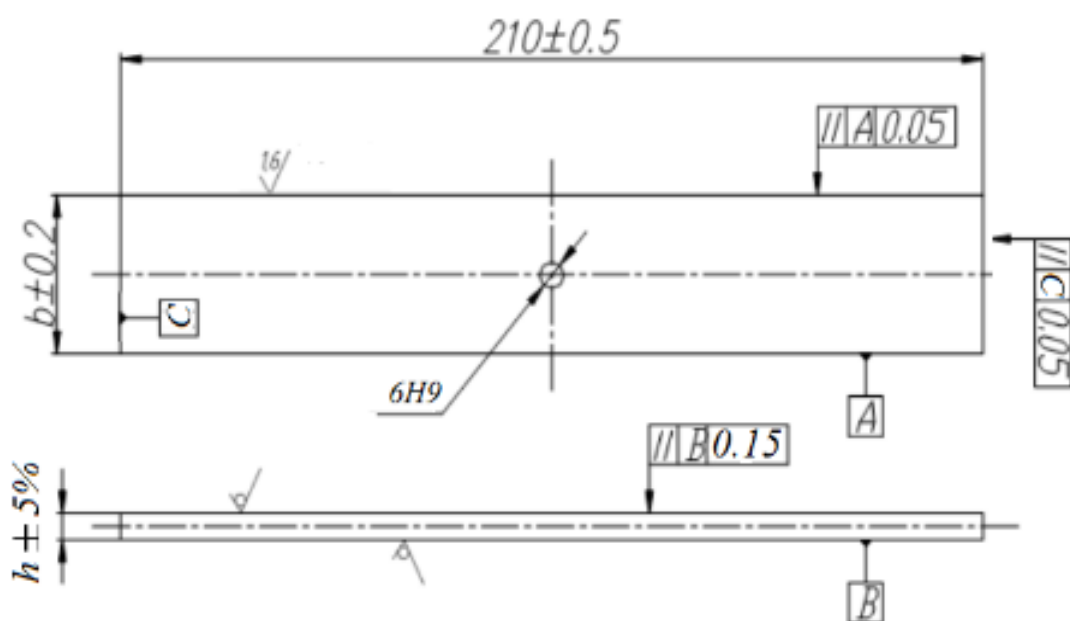


Рис.3.1. Эскиз образца со свободным отверстием

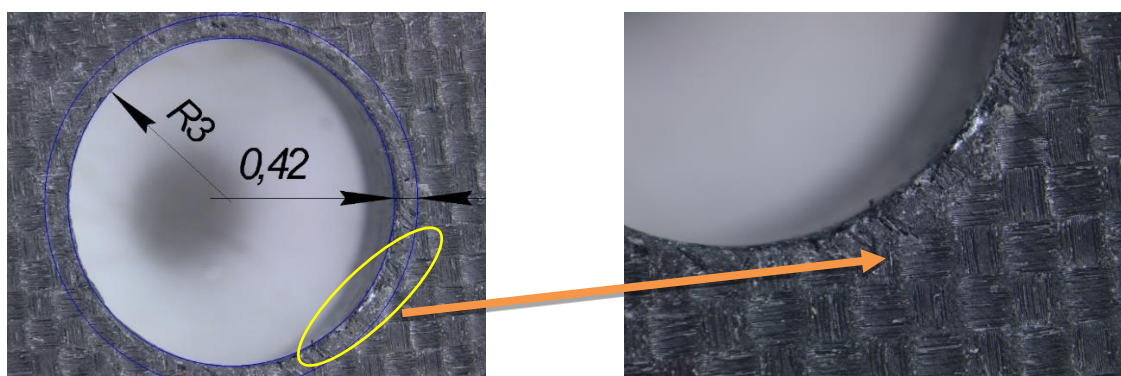


Рисунок 3.2. Фотоизображения методических образцов с концентратором напряжений в виде отверстий

Полученные отверстия во всех образцах исследовались с применением оптического микроскопа «Olimpus 100». Проводилось сравнение размеров, образующихся при сверлении, повреждений, как в осевом направлении сверления, так и на торцевых поверхностях отверстий. На рисунках 3.3-3.6 представлена фотография отверстий в образцах серий «З» и «К» со стороны входа и выхода инструмента (сверла). Синими окружностями обозначены

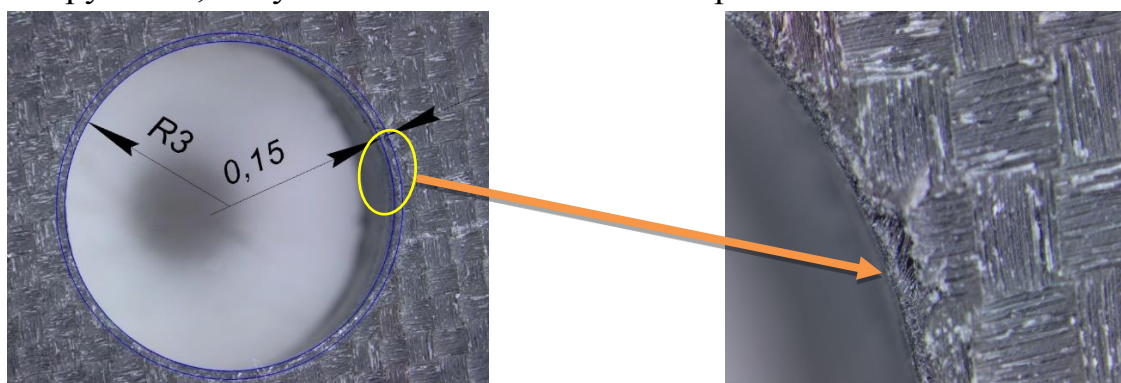
контур отверстия D6 и окружность касательная к обнаруженным повреждениям с определением разности в диаметрах, которая соответствует размеру внешних повреждений.

В образцах на кромках отверстий и торцевых поверхностях обнаружены характерные для механической обработки повреждения в виде сколов связующего, расслоений, вырывов волокон наполнителя и др. При этом размер повреждений отличается для обеих серий образцов и в среднем для выборки из 6 образцов составляет со стороны входа инструмента - 0.4мм и 0.05мм для образцов серии «З» и «К» соответственно, со стороны выхода инструмента для серии «З» - 0.15мм, для образцов серии «К» с применением имеющегося оптического микроскопа повреждений не обнаружено.



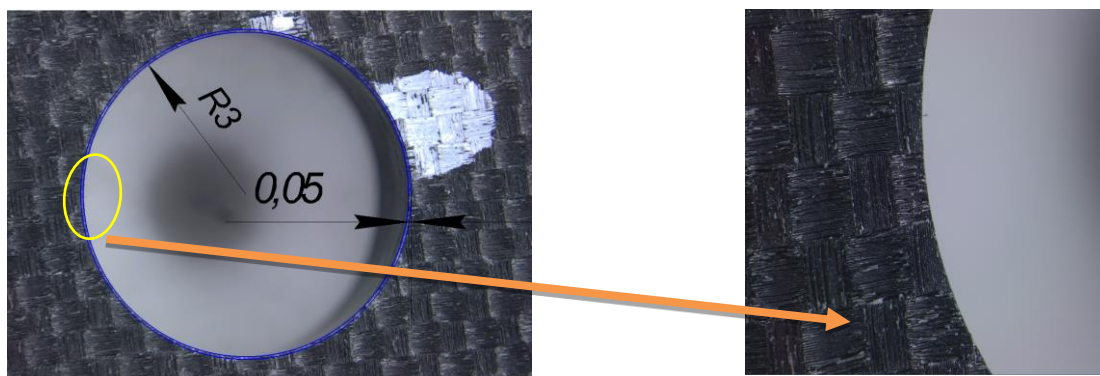
А) образец серии «З», максимальный размер повреждений 0.42мм      Б) Характерное повреждение при большем увеличении

Рисунок 3.3 – Изображение отверстия в образце серии «З» со стороны входа инструмента, полученное на оптическом микроскопе



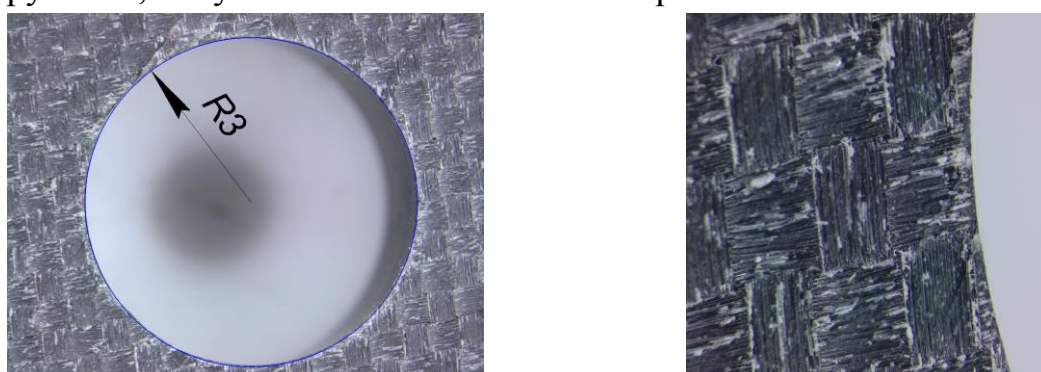
А) образец серии «З», максимальный размер повреждений 0.15мм      Б) Характерное повреждение при большем увеличении

Рисунок 3.4 – Изображение отверстия в образце серии «З» со стороны выхода инструмента, полученное на оптическом микроскопе



А) образец серии «К», максимальный размер повреждений 0.05мм  
 Б) Характерное повреждение при большем увеличении

Рисунок 3.5 – Изображение отверстия в образце серии «К» со стороны входа инструмента, полученное на оптическом микроскопе



А) образец серии «З», максимальный размер повреждений 0.15мм  
 Б) Повреждений со стороны выхода инструмента не обнаружено

Рисунок 3.6 – Изображение отверстия в образце серии «К» со стороны выхода инструмента, полученное на оптическом микроскопе

В таблице 3.1 представлены обобщенные результаты замеров, образующихся при изготовлении отверстий повреждений.

Таблица 3.1 - Размеры обнаруженных повреждений на исследуемых образцах

Серия образцов	Исследуемая поверхность	Средний размер повреждений
«З»	Со стороны входа инструмента	0.4
	Со стороны выхода инструмента	0.15
«К»	Со стороны входа инструмента	0.05
	Со стороны выхода инструмента	Не обнаружены

### 3.1 Испытания на прочность

Образцы, после входного контроля методами микроскопии, были испытаны на прочность при сжатии и на усталостную долговечность. Испытания проводились по ГОСТ Р 57569-2017 «Композиты полимерные. Метод испытания на усталость образцов с открытым отверстием» (соответствует ASTM 7615) на поверенной испытательной машине «Instron-25».

При испытании на сжатие скорость нагружения составляла 110 кг/сек. Испытания на усталостную долговечность проводили по знакопеременному циклу с коэффициентом асимметрии  $R=1$ , частотой 2.5 Гц на двух уровнях максимального напряжения для построения кривой усталости.

Результаты статических испытаний представлены в Таблице 3.2. Получено относительно низкое значение разброса характеристик для обоих типов образцов, которое соответствует коэффициенту вариации 1.9% и 0.7% для образцов серии «З» и «К» соответственно. Разница в предельной прочности при сжатии составила 14.8%.

Таблица 3.2 – Результаты статических испытаний

Метод изготовления отверстия	$\sigma$ , МПа	Коэф. вариации $C_v$	Изм. знач., %
<b>Заводская</b>	<b>281.7</b>	<b>1,9%</b>	
<b>ЦАГИ</b>	<b>330.3</b>	<b>0,7%</b>	<b>+14,8%</b>

Усталостные испытания проводились при уровне нагружения, соответствующем порядка 80% и 70% (231 МПа и 217 МПа) от предела прочности при сжатии образцов изготовленных по заводской технологии. Результаты усталостных испытаний и их обработки представлены на рисунке 3.7.

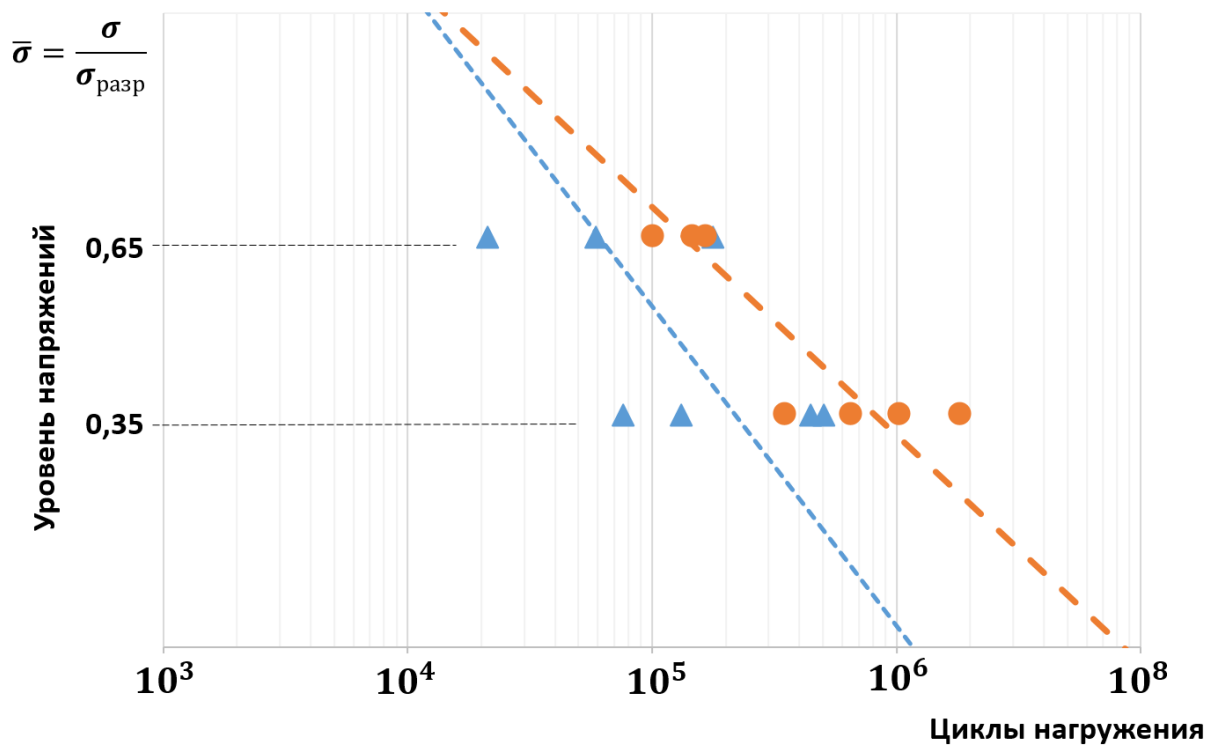


Рисунок 3.7 – Кривые усталости, полученные по результатам испытания образцов серии «З» и «К» на двух уровнях нагрузки (- образцы серии «З», - образцы серии «К»)

#### 4. Технология финишной обработки деталей в критических зонах концентрации напряжения

Выполненное исследование в главе 2 позволило существенно снизить размеры повреждений на обработанных кромках деталей из ПКМ, однако даже применение современного инструмента и выбор параметров обработки не позволяют полностью избавиться от повреждений на обработанных кромках.

В этой связи, целесообразна разработка технологического процесса обработки зон с концентраторами напряжений включающий финишную обработку с применением абразивного инструмента, при использовании которого происходит шлифование поверхности детали из ПКМ при низких образующихся температурах и усилий, действующих на слоистый материал.

Повреждения, образующиеся на обработанных кромках деталей из ПКМ глубиной, как правило 0.1-0.15мм, удаётся удалить при помощи шарошки или наждачной бумаги (размерная характеристика зерна 200 мкм) и получить шероховатость поверхности не ниже Ra 1.6 (рисунок 4.1, 4.2), при этом, за счет снижения усилий, действующих на волокна наполнителя, не увеличивается размер внутренних повреждений. Однако, такой способ связан с применением дополнительного ручного труда при котором образуется мелкодисперсная угольная пыль, для защиты от которой необходимо применять средства защиты для обслуживающего персонала. Также ручная доработка не обеспечивает необходимую точность обработки деталей.

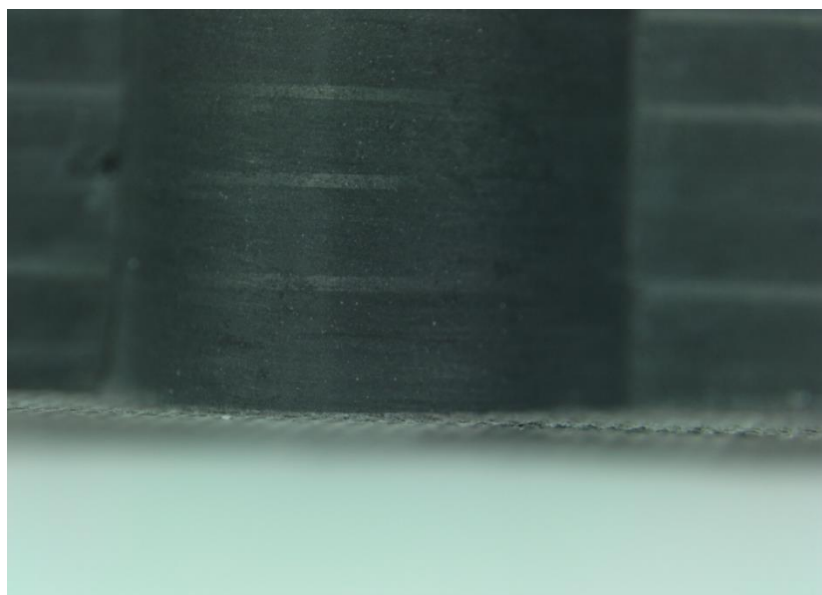


Рисунок 4.1 - Поверхность кромки после обработки шкуркой

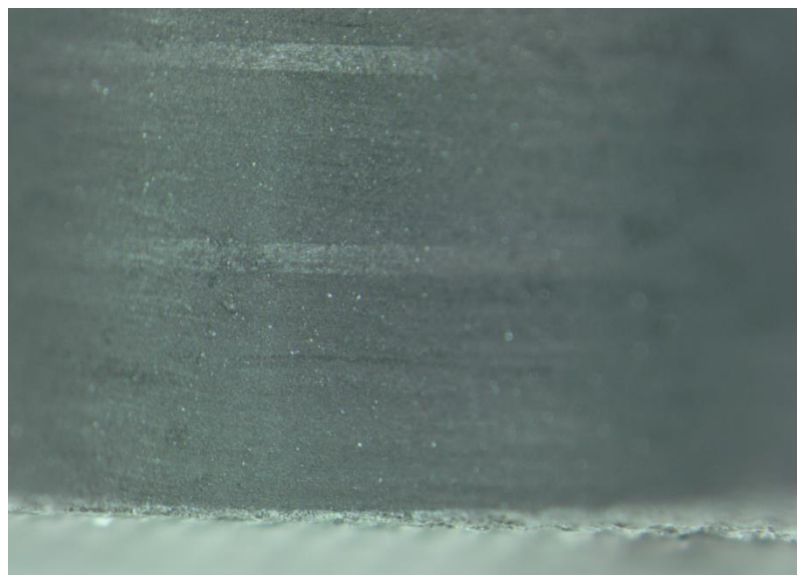


Рисунок 4.2 - Поверхность кромки после обработки шлифовальной бумагой

В этой связи представляется целесообразным изготовление отверстий в деталях из ПКМ с применением автоматизированных операций на оборудовании с ЧПУ в два этапа:

- изготовление отверстия с припуском не менее 0.2мм сверлом с острой режущей кромкой и с технологическими параметрами обработки позволяющие минимизировать внутренние повреждения в детали, в том числе с применением отечественного инструмента;

- проведение чистовой обработки отверстия инструментом с абразивной поверхностью (размерная характеристика зерна не более 200 мкм).

Исследование результатов применения при изготовлении отверстий в ПКМ инструментом с абразивной поверхностью разбито на следующие этапы:

- 1 этап, обработка тестовых отверстий в детали из ПКМ инструментом с различной геометрической формой рабочей части, определение рационального диапазона технологических параметров обработки (скорость вращения инструмента, подача);

- 2 этап, исследование поверхности обработанных тестовых образцов с применением оптического (с увеличением до 200 крат) и электронного сканирующего микроскопов, сопоставление полученных результатов с результатом сверления лезвийным инструментом;

- 3 этап, определения влияния технологии изготовления отверстий на прочность при сжатии и усталостную долговечность методических образцов;

- 4 этап, формирование рекомендаций для определения рациональной формы инструмента и величины зернистости на поверхности абразивного

инструмента, а также технологических параметров финишной доработки поверхностей деталей из ПКМ.

#### **4.1 Выбор параметров инструмента с абразивным покрытием инструмента и технологических режимов обработки**

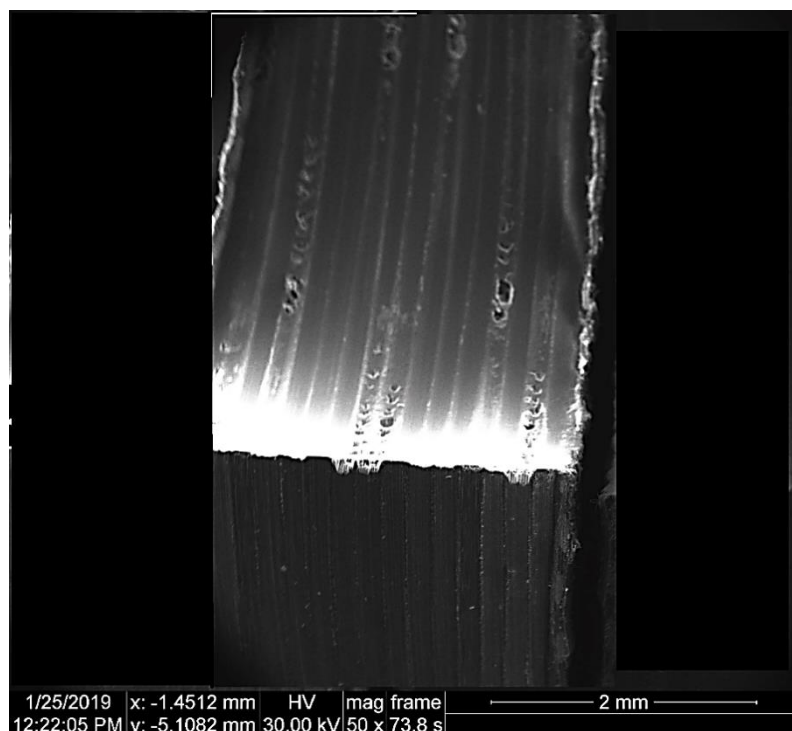
Предлагаемое решение с применением инструмента с абразивным покрытием при финишной обработке ПКМ является новым. В этой связи одной из задач является определение рациональной формы и величины абразива опытного образца инструмента. Ниже представлены результаты экспериментальных исследований влияния формы инструмента с абразивным покрытием и размера абразива.

В этой связи в данной разделе работе мы выполнили три серии образцов: первая – изготовление отверстий с применением стандартного инструмента (сверла) используемого при применении ручного инструмента для изготовления отверстий в процессе сборки конструкций с режимами обработки используемыми в заводских условиях ( $n=1000$ об/мин, ручная подача  $\sim 50$ мм/мин) – образцы серии «Р»; вторая - изготовление отверстий с применением рекомендаций представленных в разделе 2] с использованием современного инструмента производства ф. «Karnasch» (Германия), который позволяет минимизировать внешние повреждения на обрабатываемых кромках, а также снизить усилия резанья при сверлении – образцы серии «М»; третий - обработка отверстия в два этапа, удаление основного объема материала при помощи сверла и доработка отверстия с применением отечественного специализированного инструмента с абразивной поверхностью с режимами обработки, определенными выше ( $n=6000$ об/мин, подача  $\sim 50$ мм/мин) – образцы серии «М».

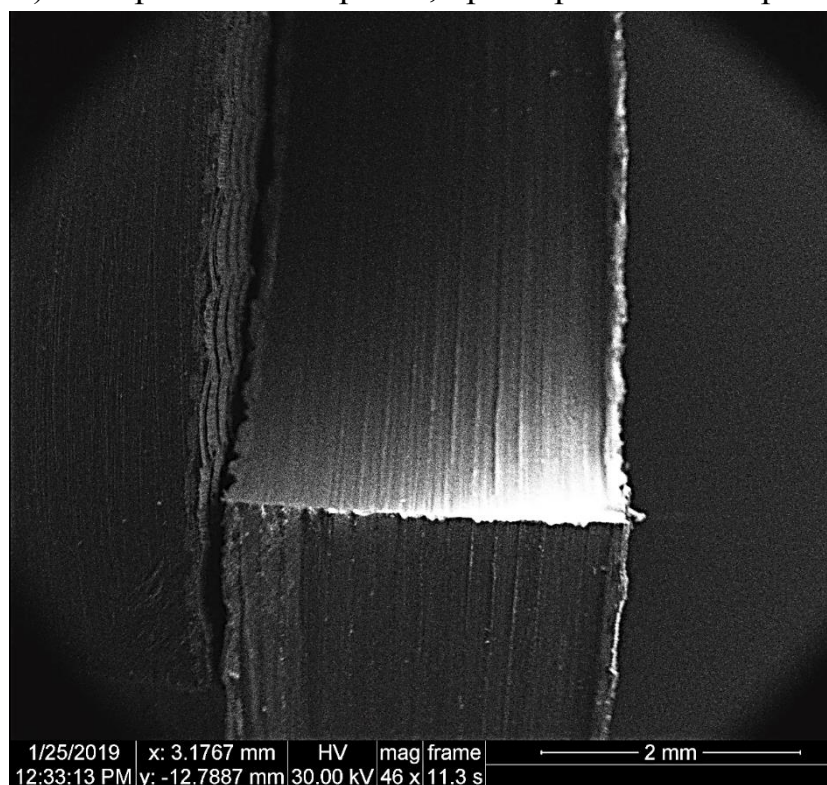
##### **Электронный сканирующий микроскоп**

Изготовленные срезы были исследованы также с применением электронного сканирующего микроскопа (ЭСМ), который дает более контрастное изображение поверхности и позволяет обнаружить микроповреждения, а также при схожем увеличении обладает большей глубиной резкости, что позволяет видеть всю исследуемую поверхность.

На рисунке 4.3 представлены полученные изображения кромок изготовленных отверстий.



А) Поверхность отверстия, просверленного сверлом



б) Поверхность отверстия, обработанного алмазно-абразивный инструмент «МонАлиТ»

Рисунок 4.3 - Изображения поверхности кромок изготовленных тестовых отверстий, полученных в электронном сканирующем микроскопе

Результаты исследований с применением ЭСМ совпадают с описанными ранее при применении оптического микроскопа. На рисунке 4.3а представлена

поверхность отверстия после сверления. Видны характерные вырывы волокон. На поверхности отверстия обработанного алмазно-абразивным инструментом повреждений в виде сколов связующего, вырывов волокон наполнителя не обнаружено (рисунок 4.3б).

#### **4.1.1 - Предварительные экспериментальные исследования влияния применения инструмента с абразивным покрытием на усталостную долговечность образцов с отверстием**

Прочностные испытания проводились на образцах аналогичных использованных в разделе 3, рисунок 3.1-3.2.

Изготовлено по 10 образцов каждой серии, общее число – 30 штук.

Испытания проводились в 2 этапа:

1 этап – определение статической прочности при сжатии, испытание по 3 образца каждой серии;

1. этап – определение усталостной долговечности образцов на нескольких уровнях нагружения;

1- этап – построение кривой усталости.

Прочностные испытания проводились в ЦАГИ, испытательный центр «ПРОЧНОСТЬ» Лаборатория 18-03, на испытательной машине Instron 8002. Результаты статических испытаний представлены в таблице 4.1 и на рисунке 4.4.

Образцы разбиты на 3 серии, включая:

- серия «З» отверстия были выполнены по серийной заводской технологии;

- серия «К» отверстия были выполнены с применением низкоповреждающей обработки «ЦАГИ»;

- серия «М» отверстия были выполнены по серийной заводской технологии с дополнительной обработкой абразивным инструментом.

Таблица 4.1 – Результаты определения прочности при сжатии

Тип образцов	Предел прочности при сжатии, $\sigma_{в сж}$ , кН	Коэфф. Вариации, $C_v$ %
«З»	281,7	1,9
«М»	315,9	0,6
«К»	330,3	0,7

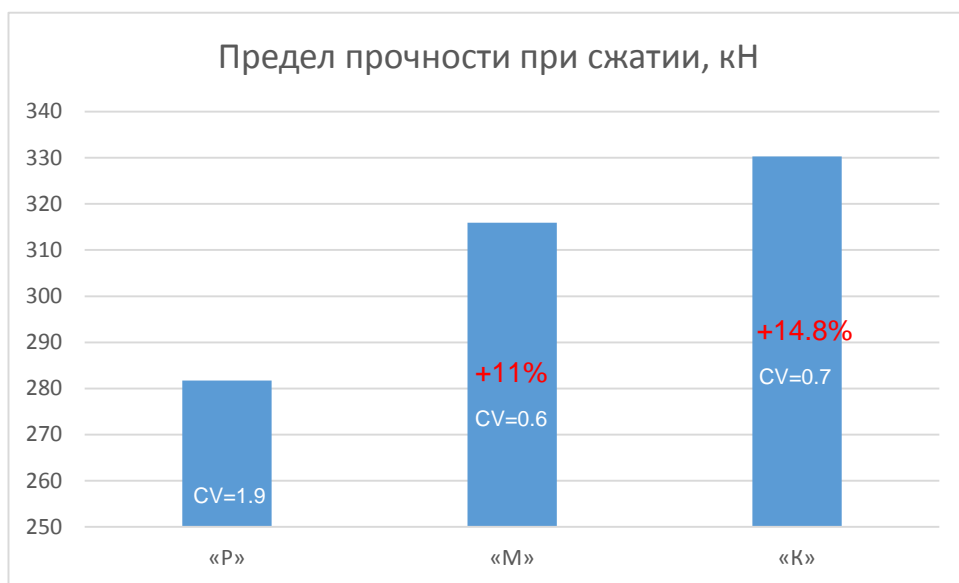


Рисунок 4.4 – Результаты испытаний образцов при сжатии

По результатам экспериментальных показано, что технология изготовления отверстий существенно влияет на прочностные характеристики, изготавливаемых в ФГУП «ЦАГИ», методических образцов. В зависимости от типа инструмента и режимов обработки отверстий их прочность при сжатии может отличаться на 15%, при этом прочность образцов изготовленного с применением отечественно инструмента с абразивным покрытием позволяет достичь прочности при сжатии образцов с отверстием практически сопоставимую с образцами изготовленными с применением дорогостоящего импортного инструмента, а также обеспечивает снижению разброса прочностных характеристик в 2 раза по сравнению с образцами изготовленными с применением ручного инструмента.

Усталостные испытания проводились синусоидальным нагружением с асимметрией цикла  $R=-1$ .  $R$  – это отношение минимального к максимальному напряжению цикла.

Уровни нагружения выбирались таким образом, чтобы полученные значения наработки лежали в диапазоне  $10^4 \div 10^6$  циклов.

На рисунке 4.5 представлена сравнительная диаграмма результатов исследования образцов.

Кривые усталости построены на основании результатов, полученных при испытании до полного разрушения образцов. Все кривые усталости аппроксимированы уравнением степенного вида. Можно отметить, что на каждом уровне нагружения технология изготовления отверстия оказывает влияние на долговечность и на рассеяние по-разному. Рассеяние имеет решающее значение, так как в соответствии с существующей процедурой [10]

величина  $S_{lgN}$  является определяющей при назначении коэффициентов надёжности при определении ресурсных характеристик авиационной конструкции и от её величины зависит продолжительность ресурсных испытаний, необходимых для сертификации конструкции.

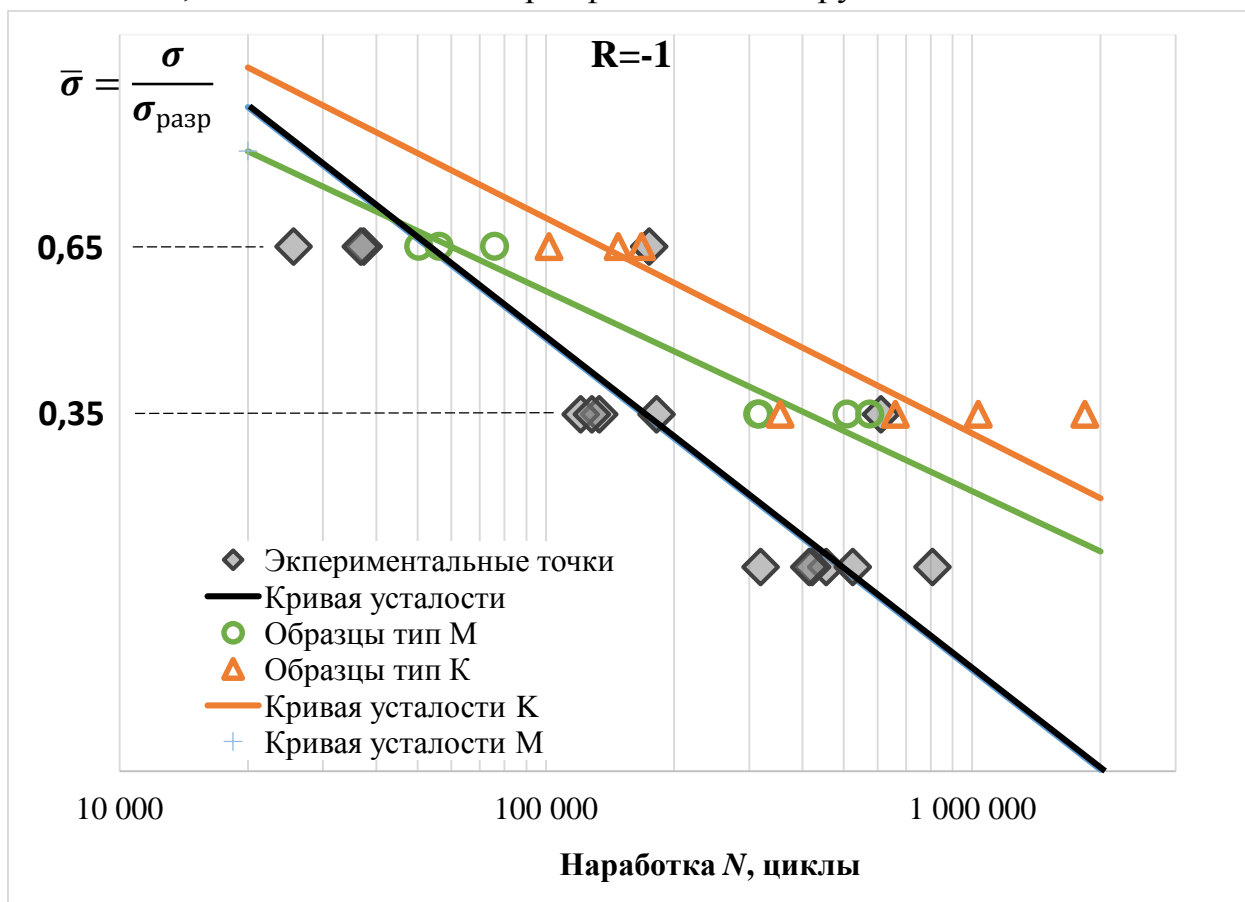


Рисунок 4.5 – Кривые усталости, полученные по результатам испытания образцов серии «З», «К» и «М» на двух уровнях нагрузки (- образцы серии «З», - образцы серии «К», - образцы серии «М»)

При анализе экспериментальных данных, полученных на образцах за базовые характеристики будут взяты значения рассеяния и средней долговечности на каждом уровне нагружения для заводской технологии.

Усталостная долговечность по традиционному критерию разрушения (разрушение на 2 части) для образцов, обработанных абразивным инструментом по сравнению с традиционным сверлением увеличилась до 2.5 раз, для низкоповреждающей обработки не менее чем в 4 раза. При этом обеспечено существенное снижение разброса значений.

## 5. Исследование структуры внутренних повреждений после сверления в образце из ПКМ

Для исследования микроповреждений, возникающих вследствие механической обработки лезвийным инструментом, рассмотрены различные способы неразрушающего контроля. Образующиеся в процессе сверления и фрезерования ПКМ межслоевые расслоения штатными методами входного ультразвукового контроля обнаружить не удастся, в следствии достаточно большой длины звуковой волны при частоте сигнала до 10МГц.

С этой целью нами были проведены исследования образцов с изготовленными отверстиями с применением компьютерной томографии и портативного устройства, обеспечивающее оперативное исследование структуры ПКМ – ультразвуковая микроскопия.

В качестве исследуемых образцов использовались две серии:

- серия «З» изготовлена по традиционной технологии сверления в заводских условиях;
- серия «К» в которой отверстия изготавливались с применением низкоповреждающей обработки ЦАГИ.

### 5.1 Результаты компьютерной томографии

Наиболее высоким качеством разрешения обладает метод компьютерной томографии. В исследованиях применена настольная прецизионная система компьютерной микротомографии nanoVoxel-1000 с разрешением до 300 нм, представленная на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 - Настольная прецизионная система компьютерной микротомографии nanoVoxel-1000

Методом компьютерной микротомографии были изучены образцы отверстий в углепластике после механической обработки режимами двух типов – заводском «З» и ЦАГИ «К». Полученные картины межслоевых повреждений в зоне отверстия образца из углепластика, представлены на рисунках 5.2-5.5.

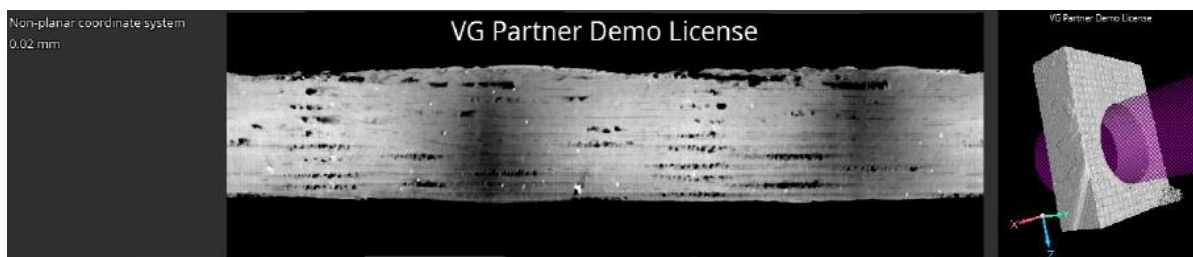


Рисунок 5.2 – Образец З – сечение разворот по цилиндрической на глубине 0.02 мм от стенок отверстий



Рисунок 5.3 – Образец К – сечение разворот по цилиндрической на глубине 0.02 мм от стенок отверстий

Как видно из рисунка 5.2, в образце «З» обнаружены углубления, образованные в ходе сверления, что позиционируется как неравномерно выкрошенный материал. В свою очередь стенки отверстия образца «К», представленные на рисунке 5.3, ровные.

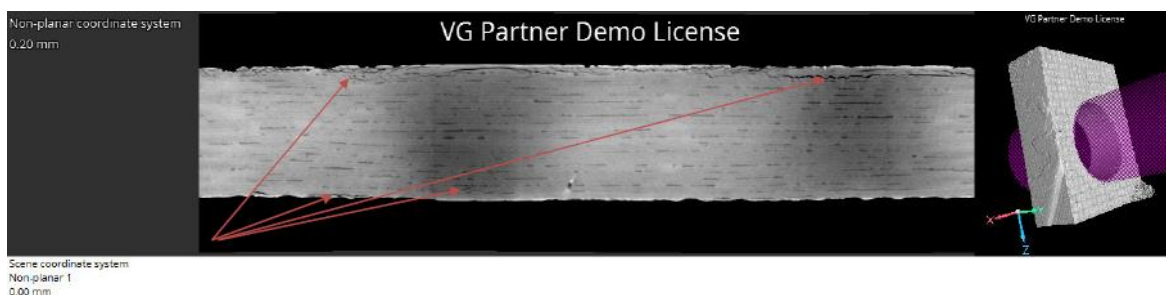


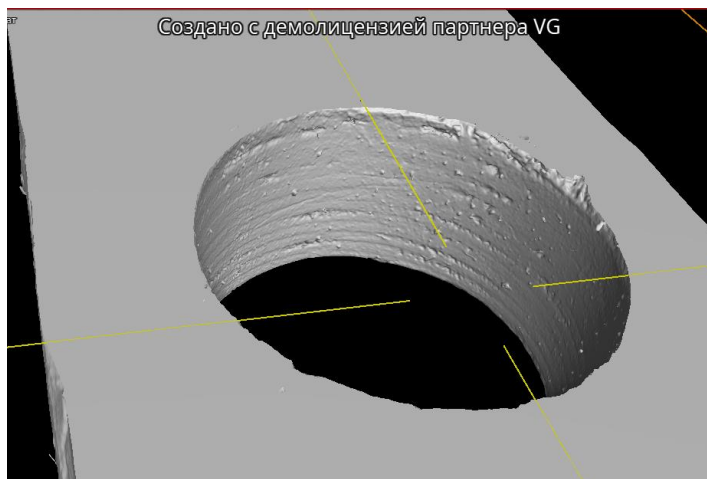
Рисунок 5.4 – Образец З – сечение разворот по цилиндрической на глубине 0.2 мм от стенок отверстий



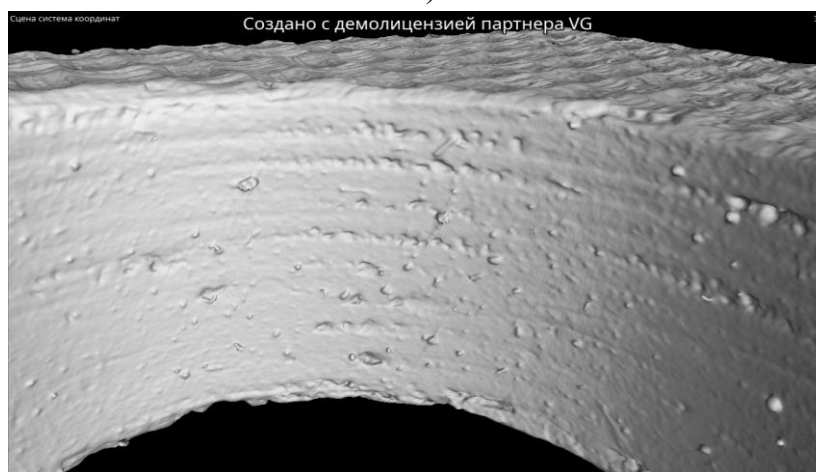
Рисунок 5.5 – Образец К – сечение разворот по цилиндрической на глубине 0.2 мм от стенок отверстий

На образце «З» (рисунок 5.4) обнаружены трещины на разной глубине как со стороны входа инструмента, так и со стороны выхода, в то время как на образце «К» данные дефекты локализованы в малых количествах и только с одной стороны. Данные трещины не предоставляется обнаружить в оптическом диапазоне из-за недостаточной подготовленности поверхностей.

Характерная поверхность отверстия в образцах серии «З» представлена на рисунке 5.6.



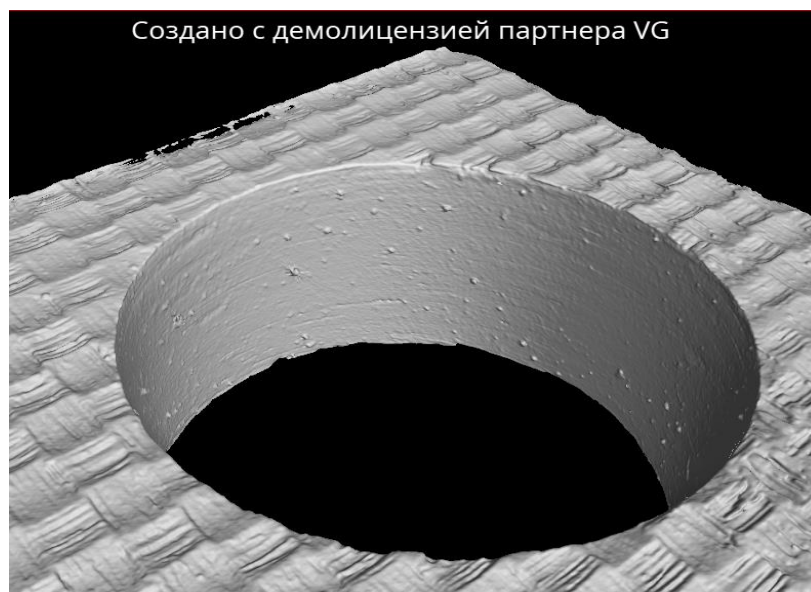
А)



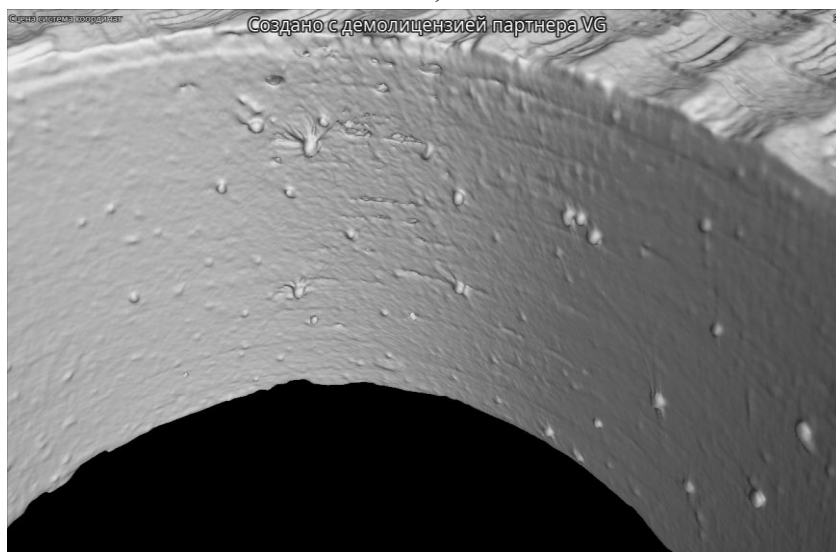
Б) при увеличении

Рисунок 5.6 – Поверхность образца серии «З», результат компьютерной томографии

На рисунке 5.7 показаны межслоевые расслоения на разной глубине образца серии «К».



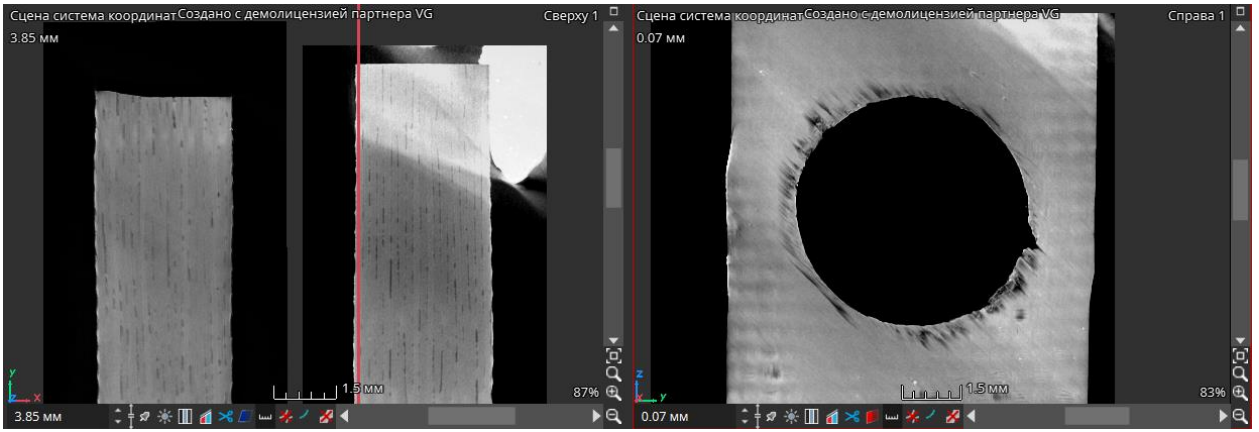
А)



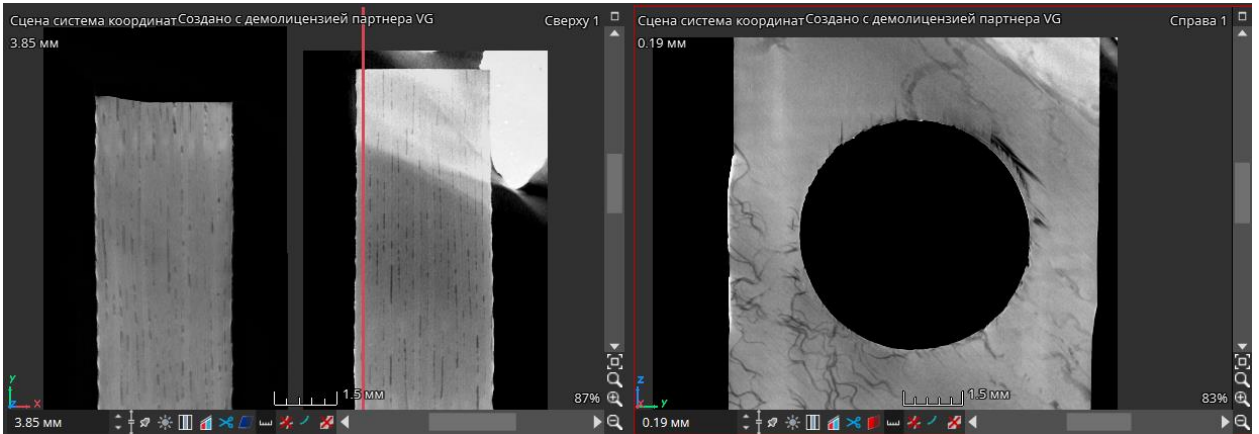
Б) при увеличении

Рисунок 5.7- Поверхность образца серии «К», результат компьютерной томографии

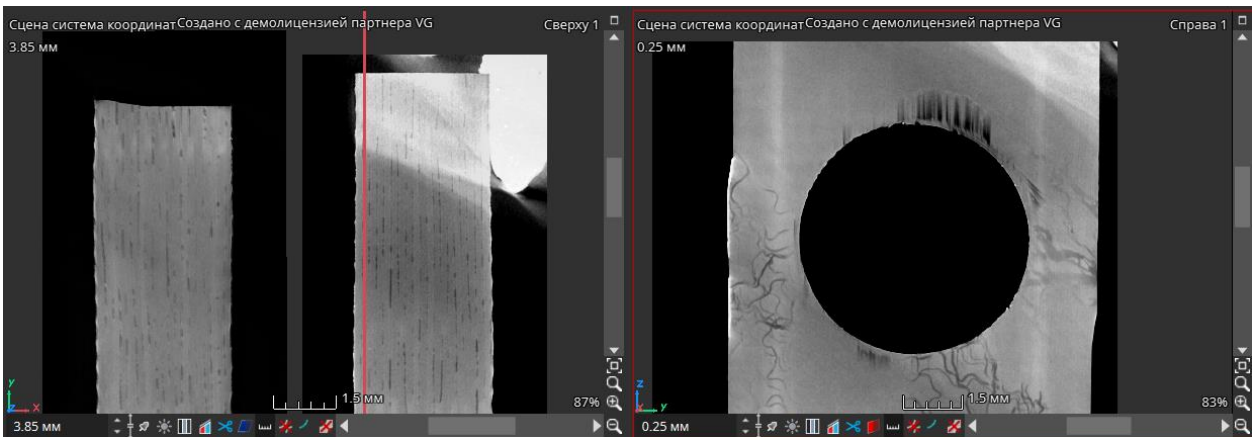
На рисунках 5.8-5.9 показаны межслоевые расслоения на разной глубине образцов серий «З» и «К».



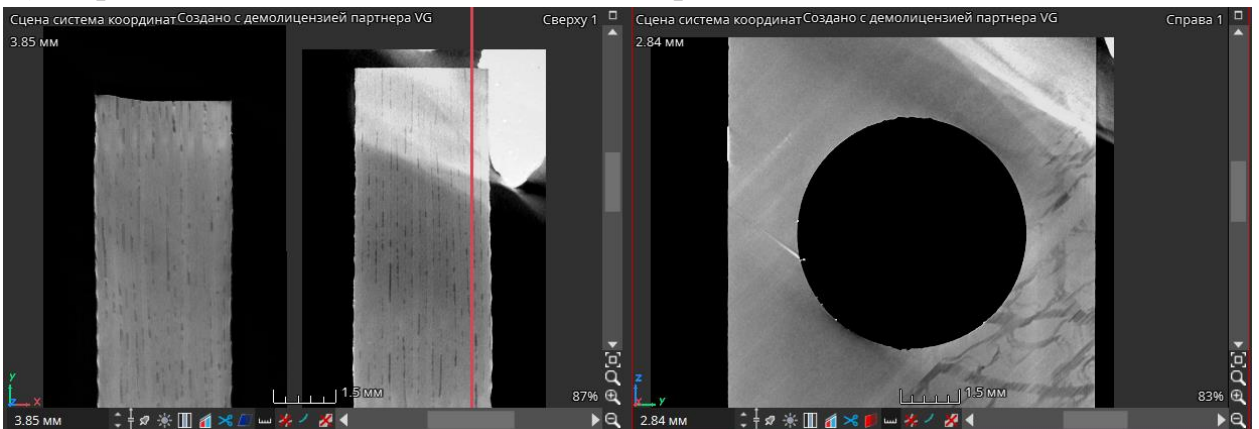
А) на расстоянии 0.07мм от внешней поверхности



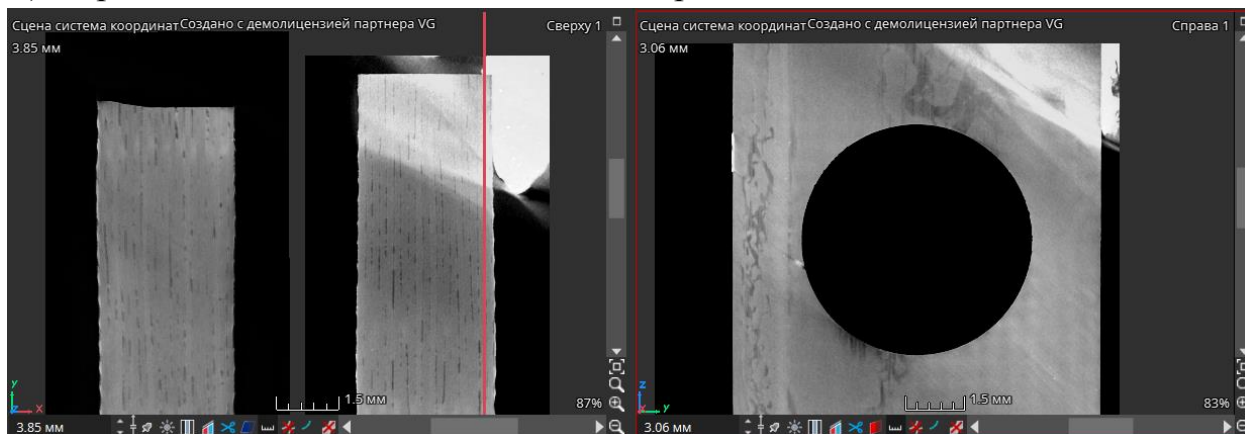
Б) на расстоянии 0.19мм от внешней поверхности



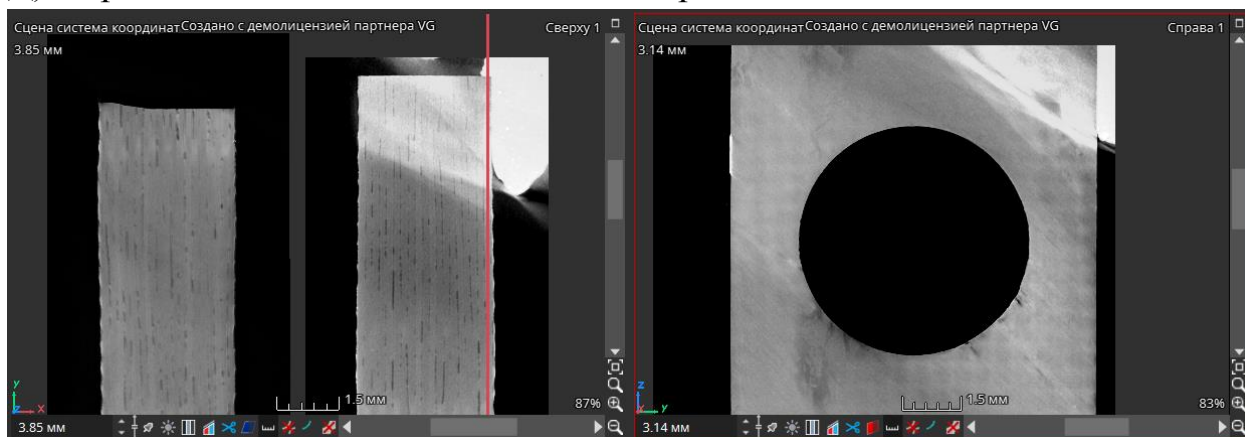
В) на расстоянии 0.25мм от внешней поверхности



Г) на расстоянии 2.84мм от внешней поверхности

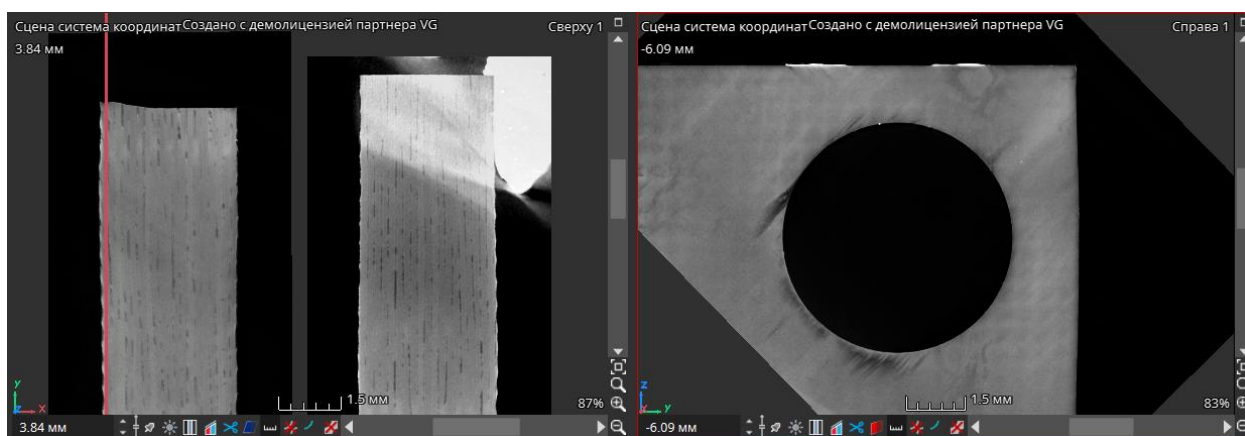


Д) на расстоянии 3.06мм от внешней поверхности

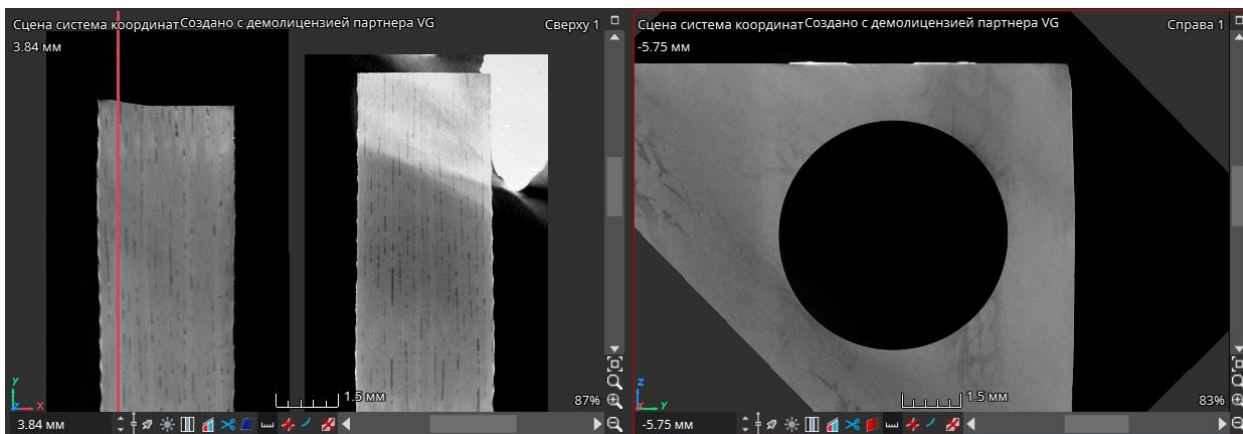


Е) на расстоянии 3.14мм от внешней поверхности

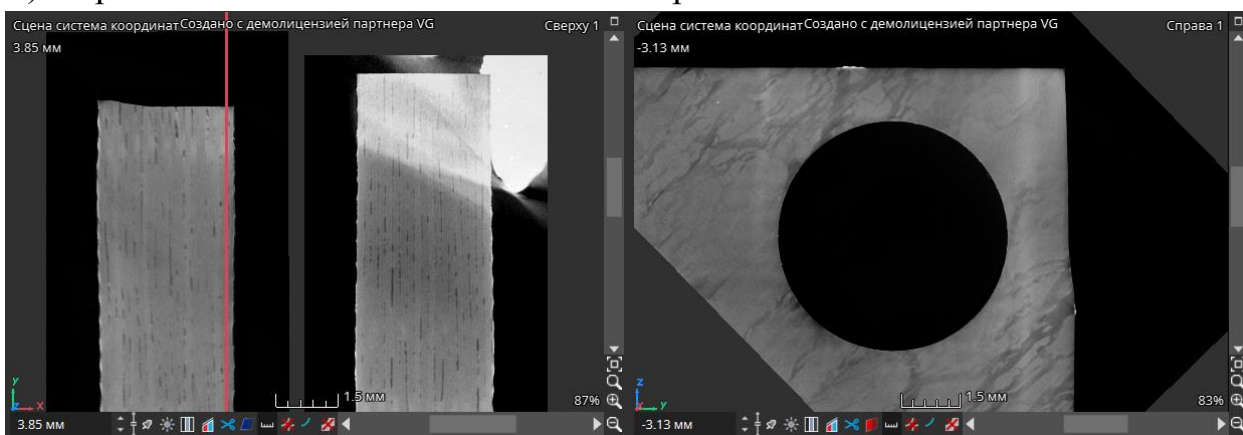
Рисунок 5.8 – характерные расслоения в образце серии «З»



А) на расстоянии 0.09мм от внешней поверхности



Б) на расстоянии 0.35мм от внешней поверхности



В) на расстоянии 3.10мм от внешней поверхности

Рисунок 5.9 – характерные расслоения в образце серии «К»

Результаты послойной компьютерной томографии показали, что в заводской технологии сверления в 79% слоев пакета присутствуют зоны расслоения, которые отличны от номинального диаметра отверстия, в то время как в технологии механической обработки, разработанной ЦАГИ, данный показатель составляет 31%.

Максимальный диаметр зоны расслоения в образцах «З» составил 9,1 мм, а в образцах «К» - 7,9 мм.

При анализе данных было отмечено, что в образцах «З» разброс значений максимальных диаметров зоны расслоения в слоях хаотичен. В образцах «К» данные значения отличны от номинального диаметра только в первых, средних и последних двух слоях пакета.

## 5.2 Результаты акустической микроскопии

В дополнение к КТ, для их валидации с помощью акустического микроскопа были получены послойные акустические изображения (С-сканы),

с помощью которых были описаны и измерены внесенные технологические дефекты по кромкам отверстий внутри материала образцов.

Основы метода акустической микроскопии (АМ) изложены в работах [11, 12, 13] и др. По сравнению с широко применяемыми на практике различными методами микроскопии (оптической, сканирующей электронной, атомно-силовой, др.), которые позволяют проводить исследования с высоким разрешением на поверхности материала и в некоторых случаях в тонком подповерхностном слое [14], акустическая микроскопия является более универсальным инструментом, позволяющим исследовать структуру как на поверхности, так и в объеме материала.

Импульсная акустическая микроскопия основана на применении высокочастотного сфокусированного ультразвука. Короткий зондирующий импульс проникает в исследуемый материал и отражается от его структурных элементов внутри фокусной зоны (15-100 мкм). Данные по амплитуде эхо-сигнала в области сканирования сохраняются по точкам и отображаются в формате В и С-сканов - акустических изображений в поперечном сечении и в плоскости, соответственно. Глубина контроля зависит от используемой частоты и свойств материала. Для задач исследования объемной микроструктуры ПКМ используются частоты 50-100 МГц.

В данной работе исследование качества изготовления отверстий в углепластиках проводили на акустическом микроскопе СИАМ (Сканирующем Импульсном Акустическом Микроскопе), разработанном и изготовленном в Институте Биохимической физики РАН (ИБХФ РАН, г. Москва).

На Рисунке 5.10 представлен общий вид акустического микроскопа СИАМ, работающего в диапазоне частот 50-200 МГц с длительностью зондирующего импульса 20-40 нс и диаметром фокального пятна 30-60 мкм, а также схематические изображения сфокусированного ультразвукового пучка и получения послойной визуализации внутренней структуры материала. Данные контроля хранятся в виде трехмерной базы данных  $A(t, x, y)$ . Для отображения и оптимизации объемных 3D-изображений можно использовать инструмент анализа данных (MATLAB).

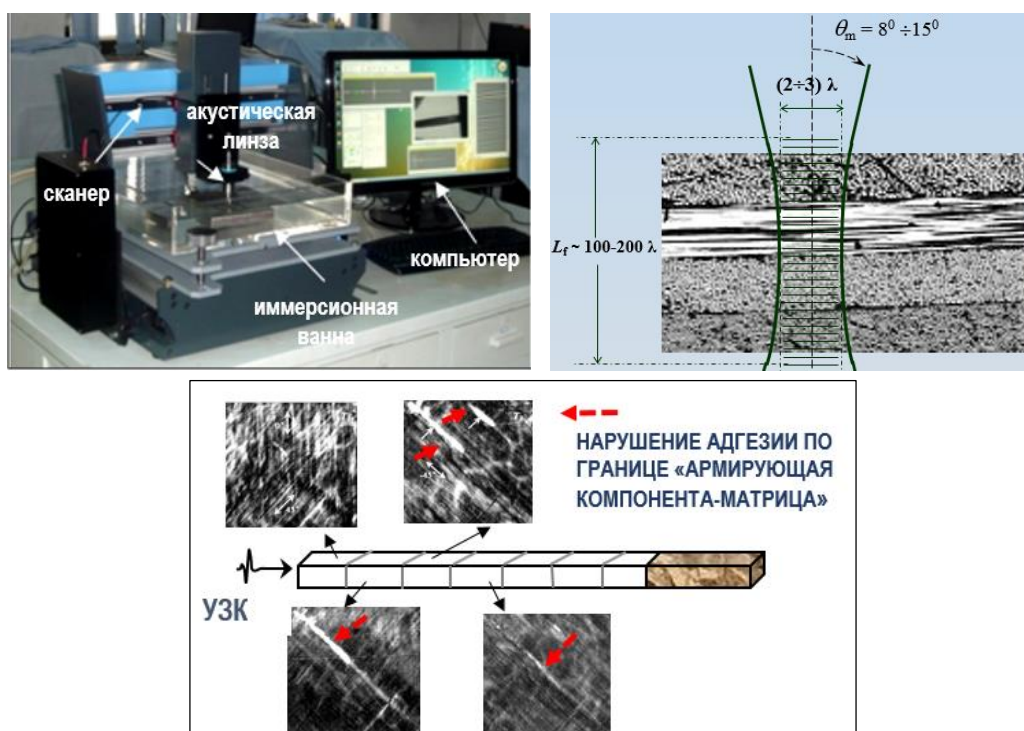


Рисунок 5.10 - Вверху: общий вид акустического микроскопа СИАМ (слева); схематическое изображение сфокусированного пучка высокочастотного ультразвука в слоистом материале (справа). Внизу: схематическое изображение послойной визуализации внутренней структуры ламината.

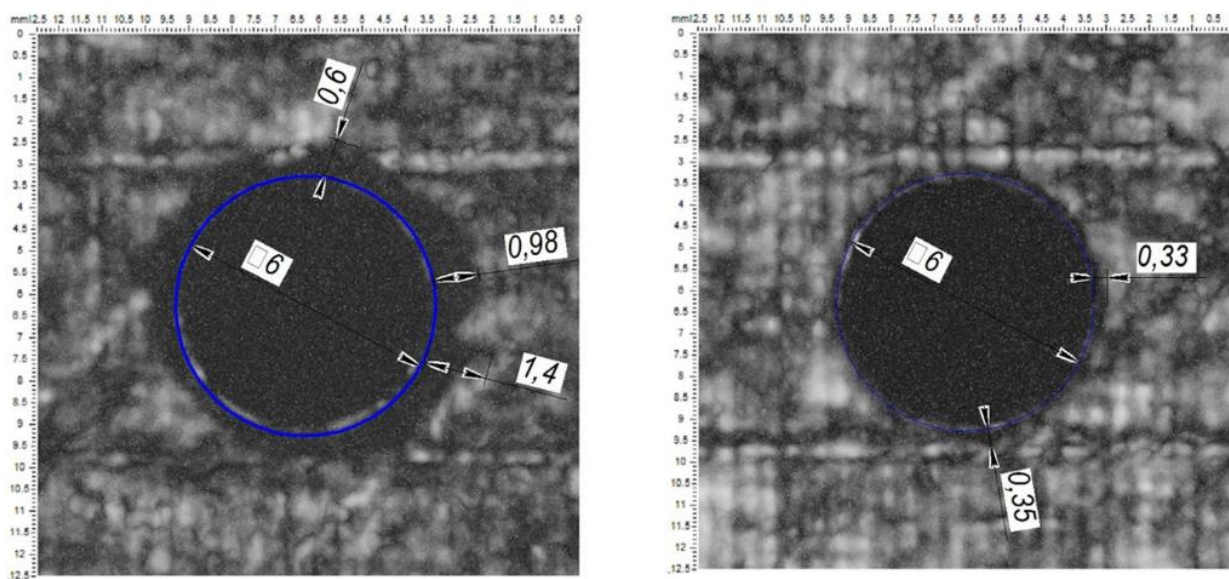
Контроль качества отверстий в образцах из слоистого углепластика проводили на частоте ультразвука 50 МГц, с шагом сканирования в иммерсионной ванне 25 мкм и углом апертуры акустической линзы  $11^\circ$ .

В предварительных исследованиях была определена глубина зоны надежного контроля методом акустической микроскопии (АМ) качества изготовления отверстия в исследуемом слоистом углепластике. При одностороннем доступе к образцу глубина составила  $\sim 2$  мм, что соответствует 11 слоям армирующего тканного наполнителя и включает все ориентации его укладки. При двухстороннем доступе реализуется 100% контроль качества материала в зоне отверстия.

Результаты контроля качества внутренней поверхности отверстий, изготовленных по различным технологиям, представлены на [Рисунке 5.11](#) в виде акустических изображений в плоскости (С-сканы). Контур отверстия обозначен синим цветом. Темные зоны, находящиеся за контуром отверстия, это технологические дефекты, внесенные в материал при сверлении.

Максимальные размеры обнаруженных дефектов сверления составили  $\sim 1.4$  мм для технологии сверления с маркировкой «З» и  $\sim 0.35$  мм для

технологии сверления с маркировка «К». При этом исследование, выполненное на 6 образцах, дает среднее значение внутренних расслоений для образцов серии «З» 1.05мм с коэффициентом вариации 6.73%



а) серия «З»

б) серия «К»

Рисунок 5.11 – Интегральные акустические изображения кромки отверстий в плоскости (С-сканы) на глубине до 2 мм для отверстий, изготовленных в образце слоистого углепластика по двум технологиям: крупносерийной заводской технологии (маркировка «З») и разработанной в ФАУ ЦАГИ (маркировка «К»). Размеры обнаруженных повреждений поверхности отверстий, указаны на С-сканах. □ 6 – класс чистоты обработки поверхности. Частота ультразвука 50 МГц, шаг сканирования 25 мкм, разрешение 50 мкм.

## 6. Разработка математической модели повреждений после сверления в деталях из ПКМ

С целью повышения прочности авиационных деталей из полимерных композиционных материалов после проведения механической обработки лезвийным инструментом предлагается разработка математической модели слоистого ПКМ, учитывающей повреждения после инструментального воздействия.

В расчетной модели учитываются характерные размеры, формы и глубины образующихся повреждений, выявленных в разделе 4. При этом нами вводится коэффициент расслоения, определяющийся отношением максимального диаметра зоны повреждения к диаметру отверстия, графически представленные на рисунке 6.1.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$$

Где  $D_{max}$  – максимальный диаметр зоны расслоения,  
 $D_{nom}$  – номинальный диаметр отверстия.

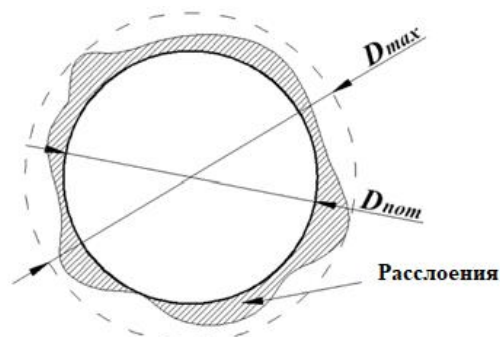


Рисунок 6.1 – Размеры зоны повреждений

На основе вышеприведенных данных была сформирована математическая модель слоистого ПКМ в системе Abaqus, представленная на рисунке 6.2.

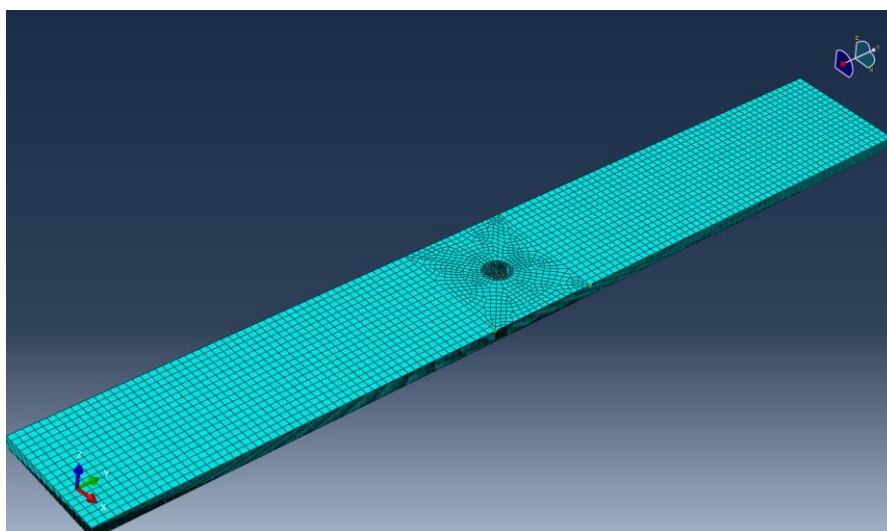


Рисунок 6.2 – Математическая модель ПКМ

В качестве основного механизма верификации математической модели с результатами экспериментальных данных, проведенных в ЦАГИ, положен критерий Нуизмера. Согласно этому критерию, разрушение образца происходит в момент, когда напряжение в образце достигает величины предела прочности ПКМ в заданном направлении материала  $\sigma_b$  на некотором характеристическом расстоянии  $d_0$  от контура отверстия, определенном экспериментально как  $d_0 \sim 1$  мм [15].

Величина разрушающих напряжений  $\sigma_p$ , действующая вдали от отверстия, определяется соотношением

$$\sigma_p = \frac{\sigma_b}{K_d},$$

где  $K_d = \frac{\sigma_x}{\sigma_p}$  – коэффициент концентрации напряжений на границе зоны растрескивания композита, в котором  $\sigma_p$  – напряжение в брутто-сечении вдали от отверстия.

Разрушающая нагрузка образца определяется как

$$P_p = \sigma_p \cdot F,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения образца.

Первой итерацией исследования является разработка математической модели слоистого ПКМ, учитывающая повреждения после механической обработки как по глубине, так и по форме. В первом приближении форма определяется максимальным диаметром зоны расслоения, размер которой получен из анализа результатов послойной томографии и эквивалентна характеристическому расстоянию  $d_0 = 1$  мм от контура отверстия по критерию Нуизмера. Визуализация модели с учетом максимальной зоны расслоения представлена на рисунке 6.3.

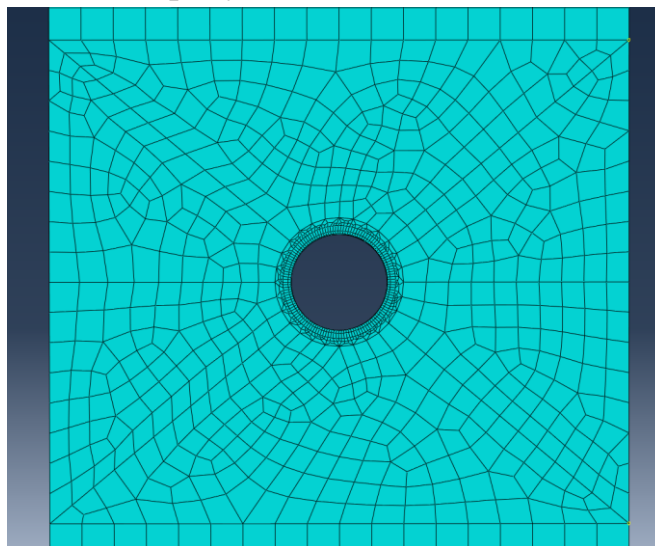


Рисунок 6.3 – Математическая модель с учетом максимальной зоны расслоения

Следующей итерацией проектирования модели является выбор сетки. Размер сетки подбирался таким образом, чтобы зона вокруг отверстия была детализирована для снятия напряжений и визуализации разрушений, а также коррелировалась с полученными в результате компьютерной

микротомографии зонами расслоений. Проведена торировка значений размера сетки для получения качественной картины поведения материала с выходом на «полку» значений времени сходимости модели, приведенная на рисунке 6.4.

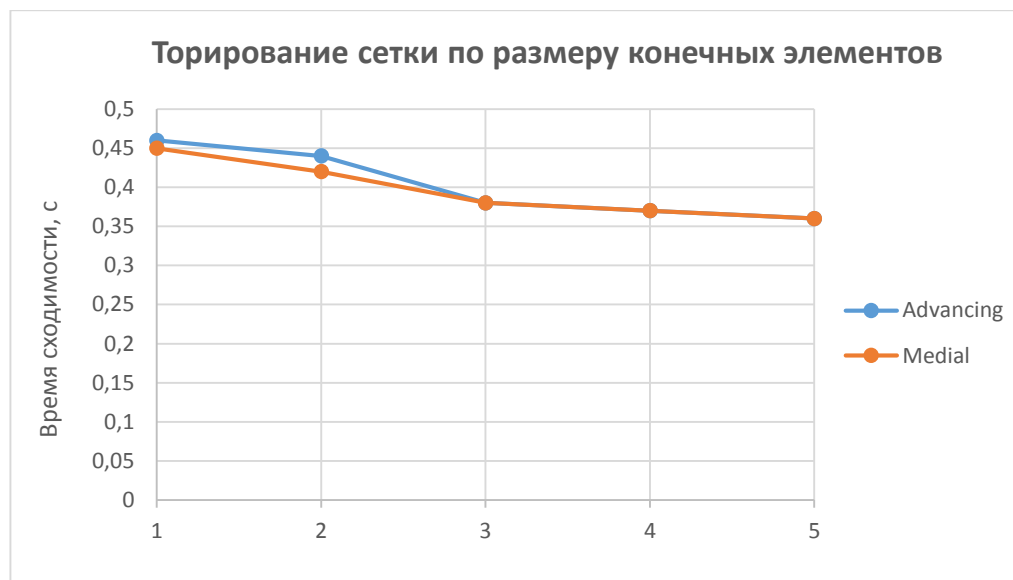


Рисунок 6.4 – График торировки размера сетки в зависимости от времени сходимости, где 1 вариант – сетка 1 мм; 2 вариант – сетка 0,75 мм; 3 вариант – сетка 1 мм переходящая к отверстию с шагом по кромке 0,5 мм; 4 вариант – сетка 1 мм переходящая к промежуточной окружности с шагом 0,5 мм и шагом сетки на кромке отверстия 0,3 мм; 5 вариант – сетка 1 мм переходящая к промежуточной окружности с шагом 0,5 мм и шагом сетки на кромке отверстия 0,175 мм

На рисунке 6.4 и графике торировки 12 отражены два алгоритма построения сетки – medial и advancing.

Medial – алгоритм средней оси, в котором область разбивается на группу простых областей вокруг одной оси, а затем методом структурированной сетки заполняет каждую из элементарных областей конечными элементами. Данный метод является самым быстрым для конечно-элементного расчета за счет снижения количества переходных элементов сетки.

Advancing – алгоритм опережающего формата, который генерирует четырехугольный элемент SC8R на границе области с продвижением вглубь области. Данный метод обладает большей точностью, по сравнению с алгоритмом medial, за счет виртуальной топологии сетки.

Комбинирование данных алгоритмов построения сетки модели создает сетку со срезанными элементами на границе раздела двух типов, в связи с чем происходит сдвиг сетки, отраженный на рисунке 6.4.

Математическая модель повреждений включает в себя возникновение и эволюцию повреждений. Для инициирования повреждений наиболее применимым в МКЭ является критерий прочности Хашина. Данный критерий предсказывает анизотропное повреждение в упруго-хрупких материалах и включает в себя критерии прочности волокон при растяжении и сжатии в направлении волокон, критерии прочности матрицы при растяжении и сжатии в трансверсальном направлении, критерии расслоения при растяжении и сжатии.

Каждому типу разрушения соответствует собственный модуль:

- $f_{m.c.}$  – коэффициент разрушения при сжатии матрицы
- $f_{m.f.}$  – коэффициент разрушения при растяжении матрицы
- $f_{f.c.}$  – коэффициент разрушения при сжатии волокон
- $f_{f.f.}$  – коэффициент разрушения при растяжении волокон

Теории разрушения используют в качестве основы пределы растягивающих и сжимающих напряжений  $X_T$ ,  $X_C$  в первом направлении, совпадающем с направлением волокон, и пределы растягивающих и сжимающих напряжений  $Y_T$ ,  $Y_C$  во втором направлении, перпендикулярном направлению волокон, а также напряжения сдвига в плоскости S.

Основным механизмом критерия Хашина являются инварианты напряжений:

- Критерий прочности волокон при растяжении в направлении волокон:

$$f_f = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2, \quad \sigma_{11} \geq 0$$

- Критерий прочности при сжатии в направлении волокон:

$$F_f^C = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^C}\right)^2, \quad \sigma_{11} < 0$$

- Критерий прочности матрицы при растяжении в поперечном направлении:

$$f_m = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2, \quad \sigma_{22} \geq 0$$

- Критерий прочности матрицы при сжатии в поперечном направлении:

$$F_m^C = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C}, \quad \sigma_{22} < 0$$

где  $X^T$  – предел прочности при растяжении вдоль волокна;

$X^C$  – предел прочности при сжатии вдоль волокна;

$Y^T$  – предел прочности при растяжении перпендикулярно волокнам;

$Y^C$  – предел прочности при сжатии перпендикулярно волокнам;  
 $S^L$  – прочность на продольный сдвиг;  
 $S^T$  – прочность на поперечный сдвиг;  
 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$  – компоненты тензора напряжений, используемый для оценки критериев инициирования повреждения.

Разрушение слоистого композиционного материала наступает в случае, когда максимальное из четырех вышеприведенных соотношений достигает значения, равному 1.

$$f = (F_m^C, F_m^C, f_f, F_f^C)_{max}$$

Иницирование повреждения определяет начало разрушения и не рассчитывает повреждение элементов ПКМ без определения эволюции данных повреждений.

После формирования математической модели производится ее верификация с результатами статических испытаний методических образцов для подтверждения работоспособности и точности моделирования.

В таблице 6.1 представлены результаты экспериментов, проведенных на экспериментальной базе ЦАГИ (НИО-18).

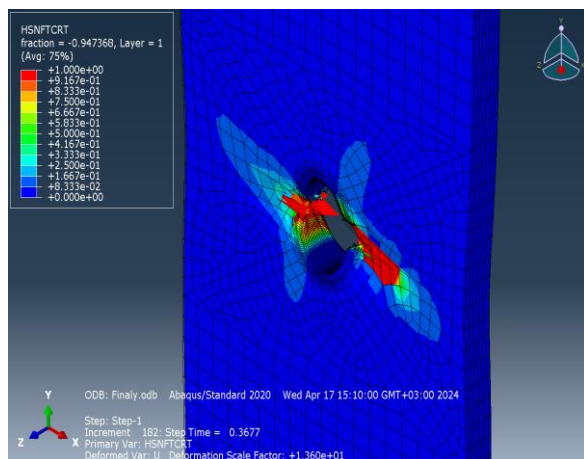
Таблица 6.1 – Результаты испытаний образцов с отверстием по ASTM D 5766

Рс, кг	№ образца	Рс, Н	$\sigma_c$ , МПа
5809.00	65	56986	410.5
5803.00	66	56927	409.9
5472.00	129	53680	387.8
5454.00	130	53504	386.7

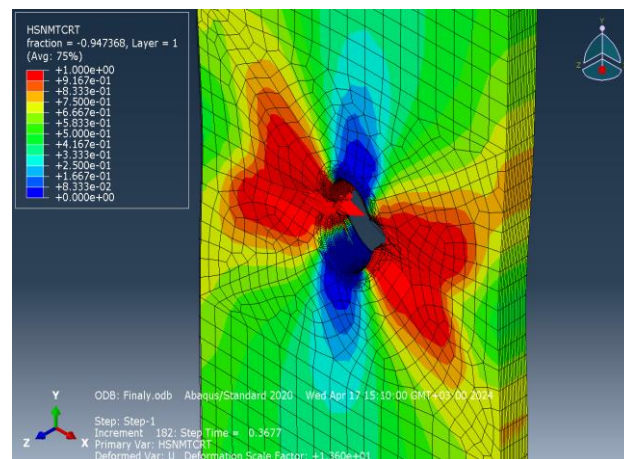
Были рассмотрены две математические модели разрушения полосы с отверстием – без учета эволюции разрушения (модель 1) и с ее учетом (модель 2). Пиковые значения критериев разрушения слоистого композита, полученные в ходе математического моделирования сведены в таблицах 6.2-6.3. Визуализация начала разрушения математических моделей представлены на рисунках 6.5-6.6.

Таблица 6.2 – Результаты моделирования верификационной модели 1

	U, мм	Pc, Н	$\sigma_c$ , МПа
МТ - разрушение матрицы	0.75	27680.2	231.2464
FT - разрушение ВОЛОКОН	1.55	57158.3	477.5129



а)



б)

Рисунок 6.5 – Визуализация начала разрушения математической модели без учета эволюции разрушения материала

а) по критерию прочности волокон, б) по критерию прочности матрицы

Таблица 6.3 – Результаты моделирования верификационной модели 2

	U, мм	Pc, Н	$\sigma_c$ , МПа
МТ - разрушение матрицы	0.75	27680.4	231.2481
FT - разрушение ВОЛОКОН	1.6	58913.5	492.1763

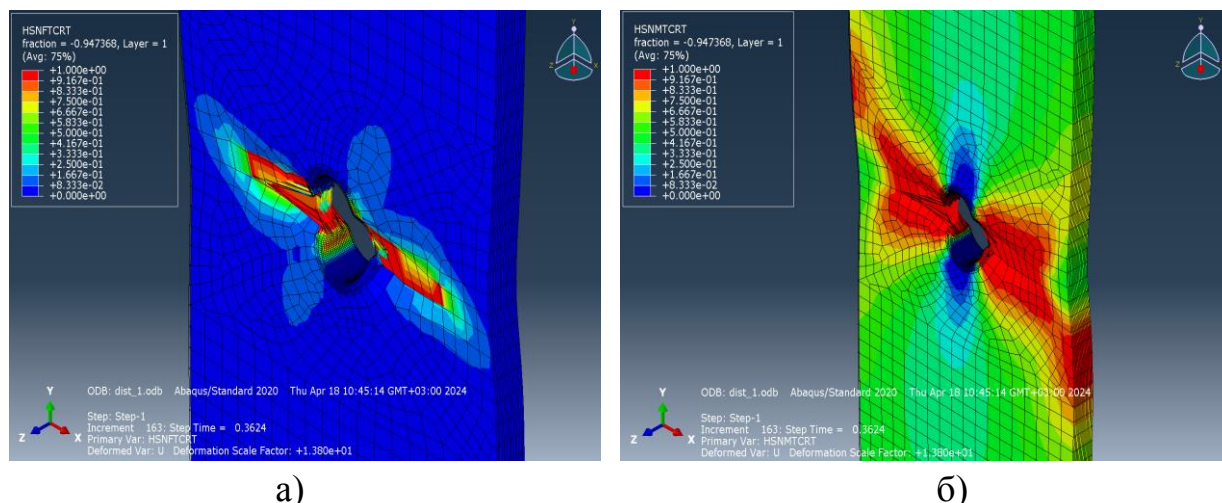


Рисунок 6.6 – Визуализация начала разрушения математической модели с учетом эволюции разрушения материала

а) по критерию прочности волокон, б) по критерию прочности матрицы

Анализируя данные визуализации наиболее целостную картину поведения материала, близкую к экспериментам, показывает модель с учетом эволюции разрушения.

При анализе результатов моделирования, коэффициент вариации моделей составляет 3,4%. Сравнение рассматриваемых аналитических моделей показало, что коэффициент вариации разрушающей силы и предела прочности данных моделей относительно результатов экспериментов равен 4,76% и 17,76% соответственно.

На рисунке 6.7 представлен график нагрузка-деформация для расчетной модели при растяжении.

Для повышения точности модели разрушения слоистого композита с результатами экспериментов сетка конечных элементов была перестроена с тенденцией уплотнения при приближении к отверстию, показанной на рисунке 6.8. В следующей итерации математической модели зона повреждений определяется максимальным диаметром зоны расслоения в каждом слое индивидуально, размер которой получен из анализа результатов послойной томографии.

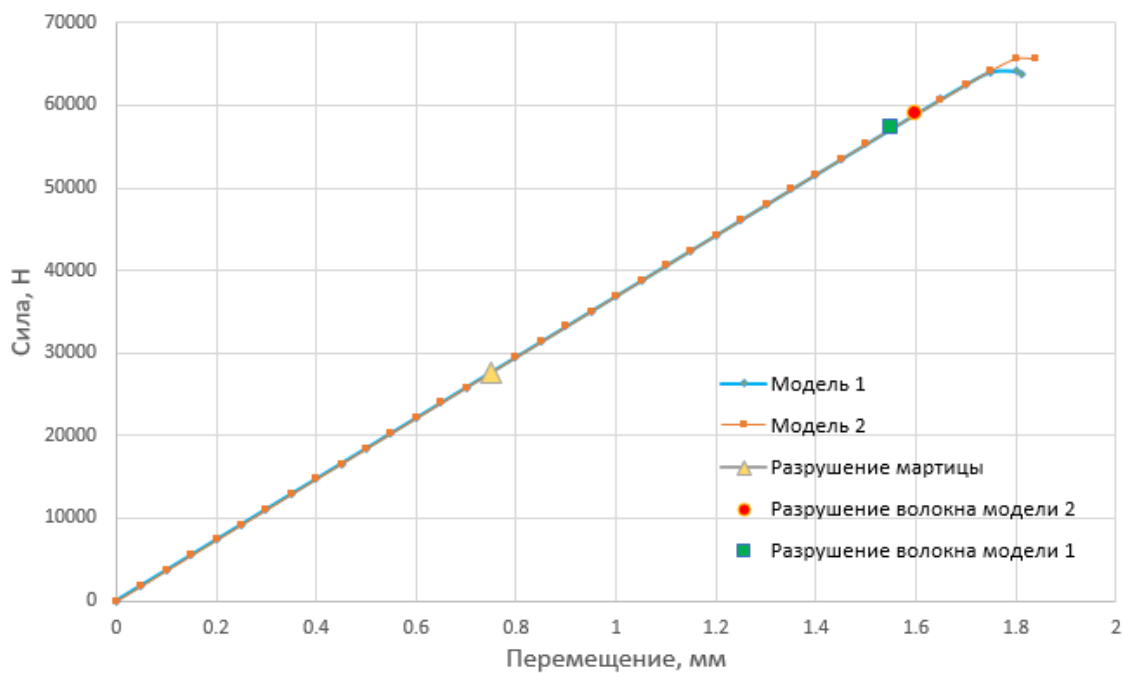


Рисунок 6.7 – График нагрузка-деформация для расчетной модели при растяжении

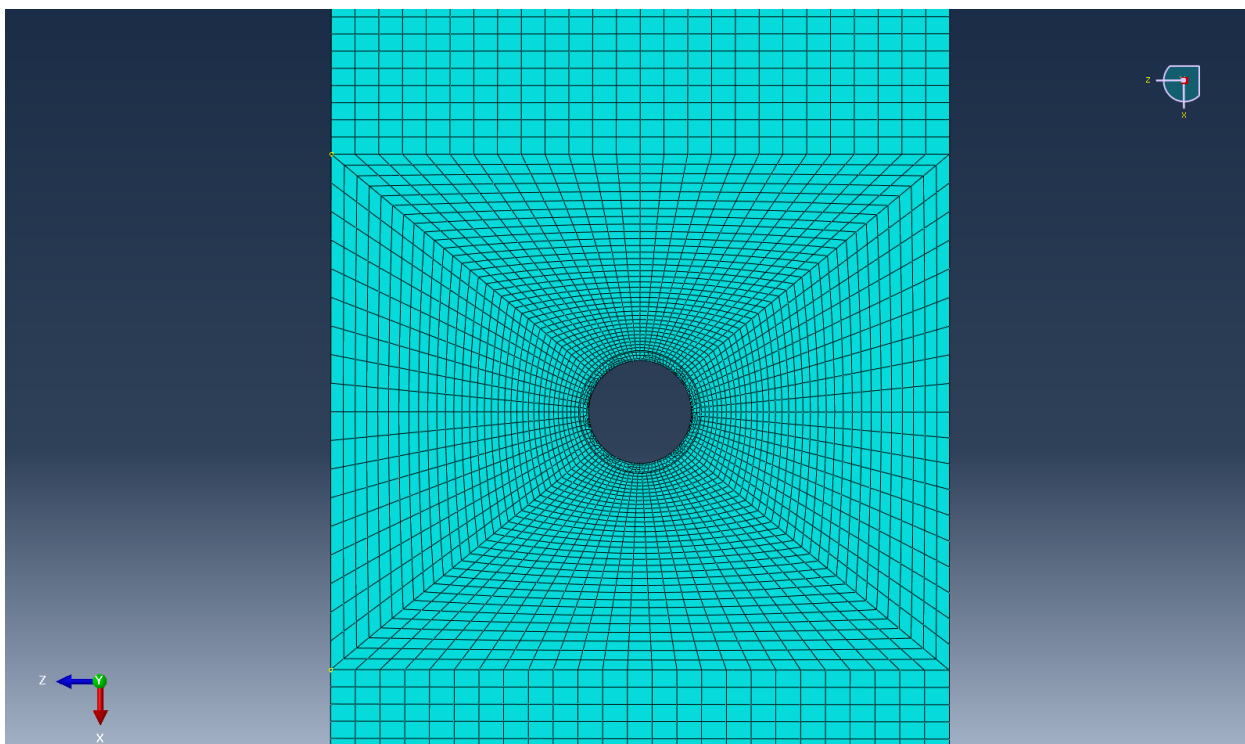


Рисунок 6.8 – Обновленная сетка математической модели

На рисунке 6.9 представлен сравнительные зависимости нагрузка-деформация для расчетной модели и результатами испытаний при сжатии образцов в виде полосы с отверстием. Экспериментальные данные приведены для образцов серии «К» имеющие минимальные размеры межслоевых расслоений. Отклонение значений расчетной разрушающей нагрузки от,

полученной в эксперименте, составило 3.7%, что демонстрирует её корректность.

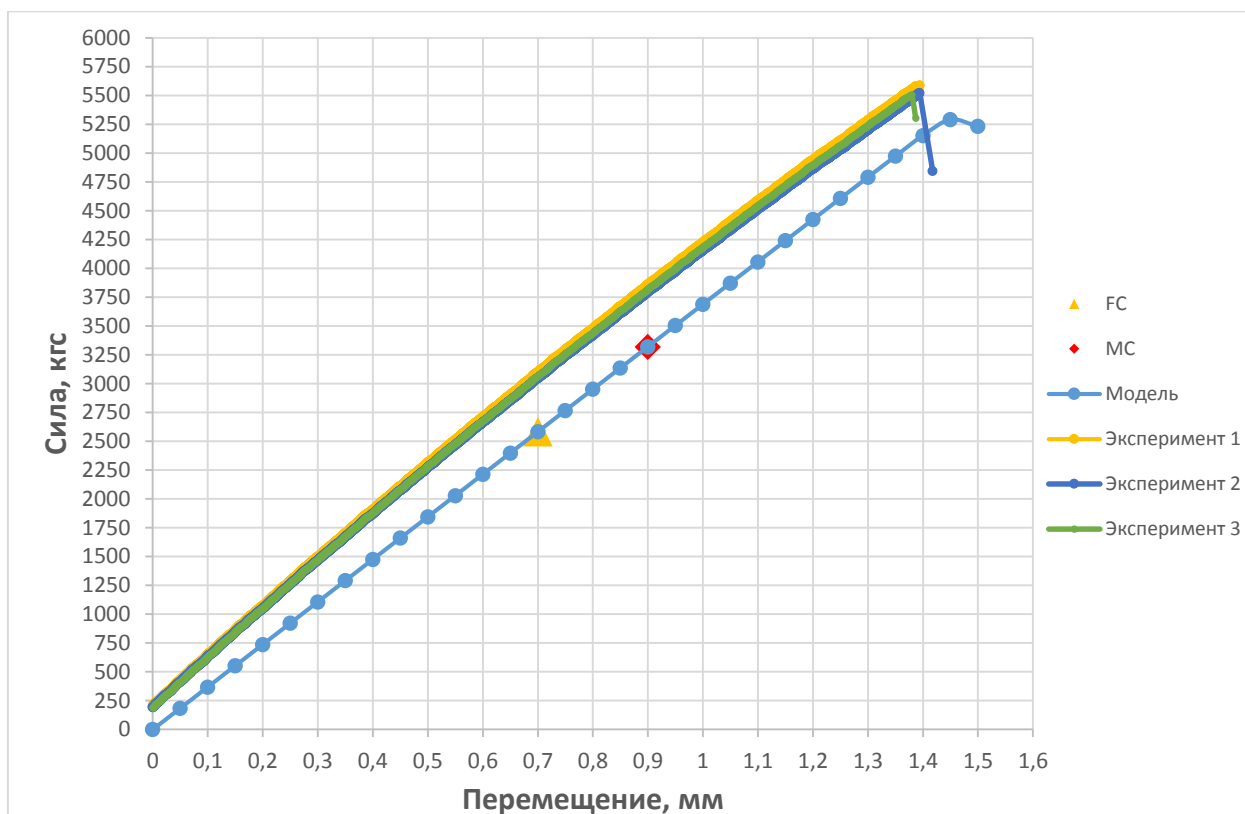


Рисунок 6.9 – Сравнительные зависимости нагрузка-деформация

В дальнейшем планируется модификация математической модели слоистого композита для учета структуры межслоевых расслоений, образующихся после процесса механической обработки. Также на основе расчетного анализа сформировать критерий для оценки качества механической обработки на основе размеров межслоевых расслоений.

## Заключение

1. Исследования повреждений, образуемых на обработанных кромках в деталях из ПКМ при механической лезвийной обработке (сверление, фрезерование), показали существенное отличие размеров повреждений в зависимости от технологических параметров обработки и характеристик режущего инструмента, соответственно и их влияния на прочностные характеристики изделий, включая статическую прочность и усталостную долговечность. В этой связи исследования, направленные на разработку технологий, обеспечивающих минимизацию повреждаемости слоистых ПКМ, в первую очередь – углепластиков, широко используемых в высоконагруженных авиационных конструкциях представляются актуальными и практически важными.
2. Выполнено исследование с применением методов разрушающего и неразрушающего контроля (рентгеновская томография, ультразвуковая микроскопия) внешних и внутренних повреждений в слоистом ПКМ образующихся в процессе механической обработки (сверление, фрезерование).
3. Разработана расчётная модель, позволяющая оценить снижение прочностных свойств ПКМ от образующихся в процессе механической обработки межслоевых расслоений микро- и макро-масштаба. Показана сходимости результатов расчёта с экспериментальными данными на примере полученной экспериментально диаграммы «напряжение-деформация» при сжатии методических образцов в виде полосы с контрольным отверстием.
4. Разработаны технология и подготовлены технологические рекомендации по выбору параметров механической обработки деталей из ПКМ, включая режимы обработки и охлаждения, обеспечивающие минимизацию внешних и внутренних повреждений обрабатываемых ПКМ.
5. Применение разработанной технологии низкоповреждающей обработки деталей из ПКМ позволяет повысить статическую прочность при сжатии образцов с контрольным отверстием до 15%, усталостную долговечность при знакопеременном циклическом нагружении не менее чем в 4 раза. При этом, получаемый в прочностном эксперименте разброс значений прочностных характеристик снижается более чем в 2 раза.
6. Предложена технология финишной локальной обработки на станках с ЧПУ зон концентрации напряжений в деталях из ПКМ на основе применения специального отечественного абразивного инструмента, позволяющая обеспечить при ограниченном увеличении трудоёмкости,

высококачественную подготовку образцов к проведению испытаний на прочность.

7. По результатам испытаний образцов на усталостную долговечность установлено, что в образцах, доработанных абразивным инструментом межслоевые расслоения возникают при количестве циклов нагружения от 130 000, в то время как в образцах только с лезвийной обработкой от 30 000 циклов нагружения.
8. Внедрение технологии низкоповреждающей обработки в производство ФАУ «ЦАГИ» обеспечило изготовление методических и конструктивно-подобных образцов для проведения специальной квалификации импортозамещающего ПКМ в проекте МС-21, а также проведение доработки конструктивно-подобных образцов заводского изготовления для их испытания на прочность.
9. Оформлена заявка на изобретение № 2024136402 от 04.12.2024 «Способ определения оптимальных режимов резания полимерного композиционного материала».

Технология применяется при изготовлении динамически-подобных свободнолетающих моделей и моделей-демонстраторов БПЛА, для которых особенно важна повышенная весовая отдача, обеспечиваемая в том числе и применением низкоповреждающей механической лезвийной обработкой ПКМ.

## Список использованной литературы

- 1 Экспериментальное определение действительных прочностных характеристик элементов композиционных трехслойных панелей, вырезанных из агрегата ЛА / Павлов М.В., Титов С.А., Свиридов А.А., Бурдов А.А. // Механика композиционных материалов и конструкций - Том 31, №1 (2025) – С.101-116. – DOI 10/33113/mkmk.ras
- 2 «К вопросу о дефектах образцов для испытаний углепластиков» / Ю. В. Столянков, И. В. Исходжанова, Н. В. Антюфеева // Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 10 (viam-works.ru).
- 3 Abrao A. M., Campos Rubio J. C., Cenac F., Collombet F., Davim J.P., Deleris M., Faria P. E., Girot F., Gutierrez M. E., Illiescu D., Jackson M. J., Lamikiz A., Zhang L., Novakov T., Lopez De Lacalle L. N., Pramanik A., Zitoune R. //Machining composite materials – 2010.
- 4 Tuncay BILGE, Ali Riza MOTORCU, Aleksandar IVANOV Evaluation of the Delamination Factor for Drilling of compact Laminate Composite Material with Tungsten Carbide Tools, DOI: [10.5505/pages.2016.97992](https://doi.org/10.5505/pages.2016.97992)
- 5 Wentai Ouyang, Junke Jiao, Zifa Xu, Xia Hongbo Experimental study on CFRP drilling with the picosecond laser” double rotation” cutting technique, *Optics & Laser Technology*, May 2021, 142(4):107238, DOI:[10.1016/j.optlastec.2021.107238](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107238)
- 6 Sharizal Ahmad Sobri, Robert Heinemann and David Whitehead, Sequential Laser-Mechanical Drilling of Thick Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites (CFRC) for Industrial Applications, *Polymers* 2021, 13, 2136, <https://doi.org/10.3390/polym13132136>
- 7 Fei Su, Chunjie Li, Wenyi Li, Zhaohui Deng Cutting forces and correlation with the damages during CFRP drill-milling by using novel drill-milling tool, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020 108: 2661-2674, <http://doi.org/10.1007/s00170-020-05580-8>
- 8 Haifeng Ninh, Hualin Zheng, Xiufen Ma, Xinman Yuan Finite analysis of carbon fiber-reinforced polymer delamination damage during multi-pass milling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(7-8):1-13, DOI: [10.1007/s00170-021-08628-5](https://doi.org/10.1007/s00170-021-08628-5)
- 9 «Контроль целостности образцов слоистого композита при исследовании влияния механической обработки на усталостную долговечность» / В.Д. Вермель, Ю.Ю. Евдокимов, А.Г. Калинин, С.А. Титов С.А. // Неразрушающий контроль композиционных материалов – 2021, 67-72.
- 10 On equivalence of polymer composite materials structures loading programs under full-scaled service cycle testing / Pankov A V. and Konovalov V V. //

*31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2018 (International Council of the Aeronautical Sciences)*

- 11 Маев Роман Григорьевич, Акустическая микроскопия: монография / Р. Г. Маев. — М.: Торус Пресс, 2005, 383 с. ISBN 5-94588-031-0: 150.00
- 12 [10] Закутайлов К. В., Левин В.М., Петронюк Ю.С. Ультразвуковые методы высокого разрешения: визуализация микроструктуры и диагностика упругих свойств современных материалов (обзор). «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» №8, 2009, т.75, с. 28-34
- 13 [11] V. Tittman, et al. “Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: acoustic microscopy”, Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites, Techniques and Applications. (ed. V. M. Karbhari), Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, UK, pp. 423-448 (2013)
- 14 Napke J., Gehrig F., Huber N., Schulte K., Lilleodden E.T. Compressive Failure of UD-CFRP containing void defects: In situ SEM Microanalysis, Composites Science and Technology, 2011, Elsevier, DOI: [10.1016/j.compscitech.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.04.009)
- 15 Голован В.И., Гришин В.И., Дзюба А.С., Замула Г.Н., Лимонин М.В., Дударьков Ю.И., Писарев В.С., Балунов К.А. Проектирование, расчеты и статические испытания металлокомпозитных конструкций. – М.: ТЕХНОСФЕРА. – 2022. – 408 С.