

УДК 621.9.025.7.012:001.891.54  
КП  
№ госрегистрации 0112U001377  
Инв. №

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
СУМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(СумГУ)

40007, г. Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2  
тел. (0542) 33-35-39 факс. (0542) 33-40-58  
e-mail: dmytro.kryvoruchko@gmail.com

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной работе  
д.ф.-м. н., профессор

\_\_\_\_\_ А.Н. Черноус

ОТЧЕТ  
ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛАХ И СМЕШАННЫХ ПАКЕТАХ НА ОСНОВЕ  
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ»  
(заключительный)

Начальник НИЧ  
к.ф.–м.н.

Д.И. Курбатов

Руководитель НИР  
д.т.н., профессор

В.А. Залого

Сумы 2013

Рукопись закончена 25 декабря 2013 г.  
Результаты работы рассмотрены научным советом СумГУ,  
протокол от 2013.12.26 №3

## СПИСОК АВТОРОВ

Руководитель НИР, гл. науч. сотруд., доктор техн. наук	_____ (подпись) _____ (дата)	В.А.Залого (реферат, введение, раздел 1-2, общие выводы)
Ответственный исполнитель ст. науч. сотруд., доктор техн. наук,	_____ (подпись) _____ (дата)	Д.В. Криворучко (введение, раздел 1 - 5, выводы, общие выводы, перечень ссылок,)
Инженер 3 кат.	_____ (подпись) _____ (дата)	И.О. Осадчий (раздел 2, раздел 5, приложение В)
Инженер 3 кат.	_____ (подпись) _____ (дата)	В.А.Колесник (раздел 1 - 5, общие выводы, приложение Б)
Ведущий инженер	_____ (подпись) _____ (дата)	А.А. Нешта (раздел 3, приложение А)
Инженер 3 кат.	_____ (подпись) _____ (дата)	М.Ю. Ковпак (раздел 1)
Старший научный сотрудник.	_____ (подпись) _____ (дата)	М.П. Кононенко (раздел 2 )
Инженер 3 кат.	_____ (подпись) _____ (дата)	В.Г. Фортонюк (раздел 1 )
Техник 2 кат.	_____ (подпись) _____ (дата)	Ж.Ю. Шматко (раздел 1 )

Лаборант	_____	В.В Петров (раздел 2 )
	(подпись)	
	_____	
	(дата)	
Младший научный сотрудник	_____	О.О. Залого (раздел 2, раздел 3 )
	(подпись)	
	_____	
	(дата)	
Инженер 1 кат.	_____	Н.А. Бятова (раздел 2 )
	(подпись)	
	_____	
	(дата)	
Лаборант	_____	А.С. Юнак (раздел 1, раздел 2)
	(подпись)	
	_____	
	(дата)	
Лаборант	_____	В.М. Молибог (раздел 3 )
	(подпись)	
	_____	
	(дата)	
Лаборант	_____	А.Н. Березняк (раздел 3 )
	(подпись)	
	_____	
	(дата)	
Лаборант	_____	А.Ю. Довгополов (раздел 3 )
	(подпись)	
	_____	
	(дата)	

## РЕФЕРАТ

Отчет: 219 с., 98 рис., 10 табл., 3 приложения, 116 источников.

Объектом исследования являются процессы механической обработки отверстий в смешанных пакетах композиционный материал/металл.

Целью проекта является разработка научных основ повышения ресурса осевого инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов при обработке отверстий в волокнистых полимерных композиционных материалах (ВПКМ) и смешанных пакетах «ВПКМ-металл».

Методы исследования - моделирование резания методом конечных элементов, экспериментальные исследования силы и температуры резания, а также качества обработанной поверхности.

В отчете рассмотрены различные аспекты технологии механической обработки отверстий в смешанных пакетах металл-углепластик. Затронуты вопросы влияния различных факторов на износ инструмента и качество обработанной поверхности при сверлении. Проведены исследования механизмов разрушения обработанной поверхности при различных схемах обработки ВПКМ. Выполнено имитационное моделирование процесса сверления ВПКМ в главной секущей плоскости главных режущих кромок и определены наиболее благоприятные схемы резания.

Температура резания и интенсивность изнашивания при сверлении зависит не только от режима резания, а и от толщины составляющих пакета. Это требует определения режима резания с учетом этого фактора для обеспечения наилучшего качества обработанных отверстий.

СМЕШАННЫЙ ПАКЕТ, УГЛЕПЛАСТИК, СВЕРЛО, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИЗНОС, ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ, СИЛА РЕЗАНИЯ

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	8
1 РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВЕРЛ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И ПАКЕТОВ ИЗ НИХ.....	11
1.1 Общие представления о волокнистых полимерных композиционных материалах.....	11
1.2 Общее представление о резании волокнистых полимерных композиционных материалах .....	23
1.2.1 Влияние различных факторов на процесс стружкообразования.....	24
1.2.2 Влияние различных факторов на силу резания .....	27
1.2.3 Тепловые процессы.....	27
1.3 Общие представления об износе инструмента.....	28
1.3.1 Виды износа.....	28
1.3.2 Механизмы изнашивания .....	28
1.3.3 Критерии износа и стойкость инструмента при резании волокнистых полимерных композиционных материалов.....	31
1.4 Общие представления об износе инструментов при обработке однородных пакетов волокнистых полимерных композиционных материалов/металл .....	32
1.4.1 Износ и стойкость сверл .....	32
1.4.2 Влияние различных факторов на расслаивание обрабатываемого материала .....	35
1.4.3 Влияние режима резания .....	35
1.4.4 Влияние износа сверла.....	36
1.4.5 Влияние геометрических параметров и конструкции инструмента	36
1.4.6 Влияние материала матрицы и формы армирования.....	37
1.5 Качество отверстий.....	38
1.5.1 Показатели качества отверстий в однородных пакетах ВПКМ .....	38

		6
1.5.2	Повреждения отверстий.....	41
1.5.3	Точность отверстий.....	46
1.5.4	Микрорельеф поверхности.....	50
1.6	Качество отверстий в смешанных пакетах.....	52
1.7	Общие требования к качеству отверстий.....	57
1.8	Выводы.....	61
2	РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	65
2.1	Общая методика исследования.....	65
2.1.1	Методика подготовки образцов.....	67
2.1.2	Технология формовки образцов.....	70
2.1.3	Методика исследования трибологических свойств.....	78
2.1.4	Методики измерения температуры.....	80
2.1.5	Методика определения физико - механических свойств волокнистого полимерного композиционного материала и его компонентов...	87
2.1.6	Методика оценки качества отверстий в пакетах волокнистый полимерный композиционный материал/ металл.....	89
2.1.7	Методика измерения радиуса округления режущей кромки.....	90
2.2	Выводы.....	91
3	ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ.....	93
3.1	Определение механических свойств матрицы.....	93
3.2	Определение трибологических свойств волокнистых полимерных композиционных материалов.....	101
3.3	Выводы.....	105
4	КОНЕЧНО – ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ РЕЗАНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПАКЕТОВ С ИХ ПРИМЕНЕНИЕМ.....	106
4.1	Мировой опыт в сфере моделирования процессов обработки волокнистых полимерных композиционных материалов.....	106

4.2	Создание конечно – элементной модели .....	110
4.3	Проверка адекватности модели.....	130
4.4	Выводы .....	141
5	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА И СМЕШАННЫХ ПАКЕТОВ.....	143
5.1	Исследование влияния ориентации волокон на качество обработанной в углепластике поверхности.....	146
5.2	Исследование температуры резания при сверлении углепластика.....	151
5.3	Исследование температуры резания при сверлении смешанного пакета.. ..	157
5.4	Исследование влияния радиуса округления и фаски износа на температуру резания при сверлении смешанного пакета .....	162
5.5	Выводы .....	174
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....	176
	ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	179
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (СПРАВОЧНОЕ) .....	190
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б (СПРАВОЧНОЕ).....	209
	ПРИЛОЖЕНИЕ В (АКТ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОРАБОТКИ).....	217

## ВВЕДЕНИЕ

Работы выполнялись в рамках договора № 51.20.01-01.12.13 ЗП.

Разработка теории износа и разрушения осевых инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов при обработке отверстий в волокнистых полимерных композиционных материалах (ВПКМ) и смешанных пакетах различного состава («ВПКМ - металл», «металл - ВПКМ»). Металлические слои могут выполняться из титановых сплавов, алюминиевых сплавов или стали. Особенно актуальной эта проблема стоит в сборочном производстве крупногабаритных машин, например, самолетов. Специфические особенности агрегатно - сборочного производства авиационных конструкций, в том числе с деталями из ВПКМ, исключают возможность использования для обработки отверстий под крепежные элементы стационарного оборудования, смазочно-охлаждающих жидкостей, ряда других технологических методов и средств, традиционных для механосборочного производства. Поэтому углубленное исследование износа инструментов, и разработка рекомендаций по их усовершенствованию является чрезвычайно актуальной проблемой.

**Целью исследования** является разработка научных основ повышения ресурса осевых инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов при обработке отверстий в ВПКМ и смешанных пакетах из них.

**Объект исследования** - процессы обработки отверстий осевым инструментом.

**Предмет исследования** - ресурс инструментов и качество обработанной поверхности при обработке отверстий в ВПКМ и смешанных пакетах ВПКМ/металл.

**Основными задачами** исследования являются:

- Анализ современных взглядов на механизмы изнашивания и разрушения при резании ВПКМ и смешанных пакетов ВПКМ с металлическими слоями.



- Анализ современных физических, аналитических и численных моделей рабочих процессов резания обработки ВПКМ, обобщения подходов к моделированию резания анизотропных материалов и пакетов из них процессов;
- Создание модели процессов резания ВПКМ и методики расчетного эксперимента;
- Разработка модели материала «ВПКМ» и экспериментальной методики и оборудование определения их коэффициентов;
- Разработка модели трения при резании ВПКМ и экспериментальной методики и оборудование определения их коэффициентов;
- Проведение проверки адекватности разработанных численных моделей путем сравнения данных расчетных и натуральных экспериментов;
- Исследование влияния различных факторов на силы резания, температуру резания и износ инструментов при сверлении ВПКМ.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

- получила дальнейшее развитие и разработана микромеханическая КЭ модель процесса резания углепластика округленным лезвием, учитывающая отдельно свойства волокон и матрицы;
- впервые разработана система трех углов ориентации волокна относительно режущей кромки координатных плоскостей системы резания, позволяющая выполнить преобразования 3D системы в эквивалентную 2D систему резания;
- на основе моделирования процесса резания впервые установлено и подтверждено экспериментально, что наименьшая глубина повреждений наблюдается при углах направленности волокна  $\theta=45^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ , а наибольшая при  $\theta=0^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ . По результатам механической обработки наибольшее количество повреждений в виде вытягивания и не срезанных волокон обнаружено в образцах с углами  $\theta=135^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ . Наиболее качественная поверхность, без видимых повреждений получена при обработке образца с углами  $\theta=45^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ .
- впервые установлено, что при резании без СОЖ характер тепловых процессов и интенсивность износа при резании смешанных пакетов существенно

зависит от порядка слоев в пакете и их толщины. Наиболее неблагоприятным сочетанием материалов пакета, с точки зрения воздействия температурных эффектов на инструмент и обрабатываемый материал является комбинация ВПКМ/Металл, с точки зрения формирования расслоений – Металл/ВПКМ.

В отчете по НИР рассмотрены актуальные вопросы обработки отверстий в композиционных материалах и смешанных пакетах.

В разделе 1 приведена общая характеристика факторов, влияющих на износ инструмента при обработке композиционных материалов, титановых и алюминиевых сплавов. Описаны требования к точности и качеству отверстий в КМ, титановых сплавах и смешанных пакетах.

В разделе 2 описана методика подготовки и формовки образцов, определения физико- механических и трибологических характеристик ВПКМ, проведения экспериментальных исследований, оценка износа инструмента и качества обработанных отверстий.

В разделе 3 содержит результаты экспериментов по определению физико-механических и трибологических характеристик ВПКМ.

В разделе 4 представлены теоретические предпосылки проведения имитационного моделирования, обоснована схема моделирования, определена система разрешающих уравнений, КЭ модели, обоснован выбор граничных условий и параметров решателя конечно – элементной модели, приведены результаты имитационного моделирования процесса резания ВПКМ.

В разделе 5 приведены результаты экспериментальных исследований влияния ориентации волокон на качество обработанной поверхности ВПКМ. Исследовано изменение сил и температур резания при сверлении смешанных пакетов ВПКМ/металл и влияние износа инструмента на эти показатели.

По результатам исследований опубликовано 19 статей, 2 из которых на английском языке в издании, которое реферируется базой Scopus, 4 тезиса, 1 учебник, 1 учебное пособие, 3 патента и 2 монографии. Основные результаты были представлены на пяти конференциях.

# **1 РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВЕРЛ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И ПАКЕТОВ ИЗ НИХ**

## **1.1 Общие представления о волокнистых полимерных композиционных материалах**

В машиностроении к конструкционным относятся материалы, из которых изготавливаются конструкции и детали машин, воспринимающие механические нагрузки. В конструкциях, материалы могут испытывать различные воздействия, связанные, например, с видом нагрузки (растяжение, сжатие, изгиб), характером нагружения (статический, динамический) и, наконец, действием окружающей среды (температура, влажность и т. п.). Перечисленные факторы определяют комплекс конструктивно–эксплуатационных требований, предъявляемых к конструкционным материалам. Способность материалов удовлетворять комплексу требований выявляется при анализе их механических свойств, т. е. характеристик, определяющих поведение материала под действием приложенных внешних механических сил [1].

До второй половины 20 века потребности промышленности в конструкционных материалах в таких отраслях как машиностроение, авиа- и судостроение удовлетворяли различные металлы и сплавы: сталь, титановые и алюминиевые сплавы. Во второй половине 20 века появляются первые полимерные композиционные материалы на основе эпоксидной смолы. До 90-х годов 20 века композиционные материалы на полимерной основе использовались преимущественно для нужд космоса, но в последней декаде 20 века они, начали находить все более широкое применение в авиастроении. На сегодняшний день композиционные материалы занимают лидирующие позиции в авиа и судостроении, ветроэнергетике.

Композиционные материалы представляют собой гетерофазные системы, полученные из двух или более компонентов с сохранением индивидуальности каждого отдельного компонента.

Для композиционных конструкционных материалов характерны следующие признаки:

1. Состав и форма компонентов материала определены заранее;
2. Компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала;
3. Материал является однородным в макромасштабе и неоднородным в микромасштабе (компоненты различаются по свойствам, между ними существует явная граница раздела).

В зависимости от вида армирующего компонента композиты могут быть разделены на две основные группы: дисперсно–упрочненные и волокнистые, которые отличаются структурой, механизмами обеспечения высокой прочности.

Дисперсно–упрочненные композиты представляют собой материал, в матрице которого равномерно распределены мелкодисперсные частицы второго вещества. В таких материалах при нагружении всю нагрузку воспринимает матрица, в которой с помощью множества практически не растворяющихся в ней частиц второй фазы создается структура, эффективно сопротивляющаяся пластической деформации.

У волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) пластичная матрица, армирована высокопрочными волокнами, проволокой, нитевидными кристаллами. Идея создания волокнисто–армированных структур состоит не в том, чтобы исключить пластическое деформирование матричного материала, а в том, чтобы при его деформации обеспечивалось перераспределение нагрузки на высокопрочные волокна. [1].

Изделие с высокой прочностью (например, канат) может быть получен путем объединения параллельных волокон, расположенных должным образом в пространстве. В канате волокна нагружаются в основном растягивающими напряжениями. При объединении волокон в изделие (путем соответствующих навивок) напряжения между отдельными волокнами создаются вследствие трения скольжения, возникающего при растяжении каната.

Особенность волокнистой композиционной структуры заключается в равномерном распределении высокопрочных, высокомодульных волокон в пластичной матрице (содержание их, т. е. объемная доля, может достигать 75%).

В дисперсно–упрочненных материалах оптимальным содержанием дисперсной фазы считается 2–4% [1]. Дисперсные частицы в указанных материалах в отличие от волокон создают только «косвенное» упрочнение, т. е. благодаря их присутствию стабилизируется структура, формирующаяся при термической обработке. Другая отличительная особенность волокнистой композиционной структуры – анизотропия свойств, обусловленная преимущественным расположением волокон в том или ином направлении.

Дисперсно – упрочненные же материалы имеют одинаковые свойства во всех направлениях, так как упрочняющие дисперсные частицы имеют равноосную форму.

В ВПКМ высокопрочные волокна воспринимают основные напряжения, возникающие в композиции при действии внешних нагрузок, и обеспечивают жесткость и прочность композиции в направлении ориентации волокон.

Податливая матрица, заполняющая пространство между волокнами, обеспечивает совместную работу отдельных волокон за счет собственной жесткости и взаимодействия, существующего на границе раздела матрица – волокно.

При создании ВПКМ применяются высокопрочные стеклянные, углеродные, борные и органические волокна, металлические проволоки, а также волокна и нитевидные кристаллы ряда карбидов, оксидов, нитридов и других соединений.

Армирующие компоненты в композитах применяются в виде моноволокон, нитей, проволок, жгутов, сеток, тканей, лент, холстов.

Важным элементом в ВПКМ является матрица, которая обеспечивает монолитность материала, фиксирует форму изделия и взаимное расположение армирующих волокон, распределяет действующие напряжения по объему

материала, обеспечивая равномерную нагрузку на волокна и ее перераспределение при разрушении части волокон. Материал матрицы определяет метод изготовления изделий из ВПКМ, возможность выполнения конструкций заданных габаритов и формы, а также параметры технологических процессов и т. п.

В общем случае ВПКМ могут быть классифицированы по материаловедческому (по природе компонентов) или конструктивному признаку (по типу армирующего вещества и его ориентации в матрице). В рамках рассматриваемых классификаций можно выделить несколько больших групп композиционных материалов. К таким группам следует отнести композиты с полимерной матрицей (пластики), композиты с металлической матрицей (металло– композиты), композиты с керамической матрицей и матрицей из углерода.

В зависимости от природы армирующих волокон различают, например, следующие композиты на полимерной матрице: стеклопластики, углепластики, боропластики, органопластики и т. д. Существуют аналогичные по названиям композиты и на других матрицах.

По конструктивному признаку композиционные материалы классифицируются на (Рис. 1.1):

1. Хаотически армированные (Рис. 1.1*a*) с короткими (Рис. 1.1*a1*) и непрерывными волокнами (Рис. 1.1*a2*);
2. Одномерноармированные (Рис. 1.1*б*) однонаправленные непрерывные (Рис. 1.1*б1*) и однонаправленные короткие (Рис. 1.1*б2*);
3. Двумерноармированные (Рис. 1.1*в*) с непрерывными нитями (Рис. 1.1*в1*) и тканями (Рис. 1.1*в2*);
4. Пространственно – армированные (Рис. 1.1*г*) с тремя семействами нитей (Рис. 1.1*г1*) и  $n$  семействами нитей (Рис. 1.1*г2*).

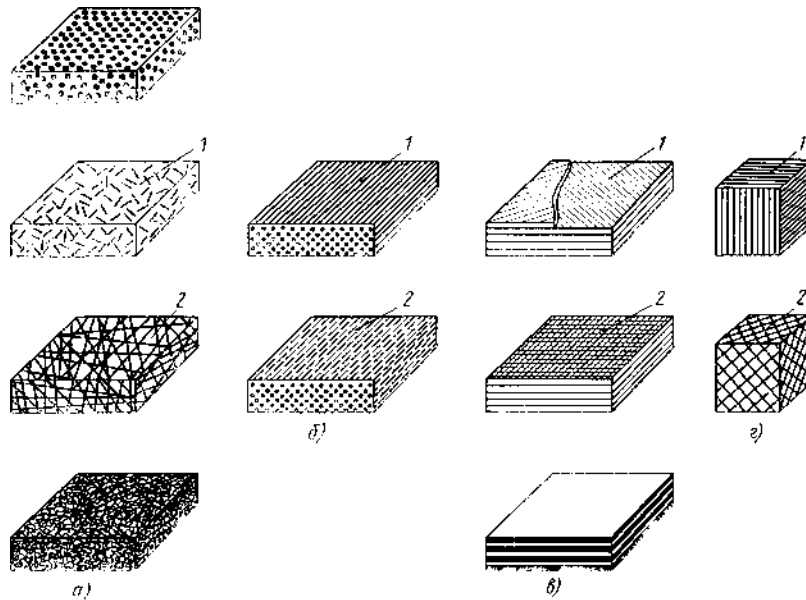


Рисунок 1.1 – Классификация композитов по конструктивному признаку [1]

Армирование волокнами позволяет использовать новые принципы проектирования и изготовления изделий, основанные на том, что материал и изделие создаются одновременно в рамках одного и того же технологического процесса.

В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композита, не только отражающих исходные характеристики его компонентов, но и включающий свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. В частности, появление ряда новых свойств в композитах связано с гетерогенной структурой, обуславливающей наличие большой поверхности раздела между волокнами и матрицей. Так, наличие границы раздела между армирующими элементами и матрицей существенно повышает трещиностойкость материала.

Современные композиты имеют не только широкий спектр физико-механических свойств, но и способны к направленному их изменению, например, повышать вязкость разрушения, регулировать жесткость, прочность и другие свойства. Эти возможности расширяются при применении в ВПКМ волокон различной природы и геометрии, т. е. при создании гибридных композитов. Кроме того, для данных материалов характерно появление

согласованного совместного действия нескольких факторов в одном направлении, так называемого синергетического эффекта.

Совокупность этих факторов содействовало расширению сфер применения ВПКМ. Одни из наиболее перспективных является изготовление полимерных шестерен, которые находят широкое применение в машиностроении. Это связано с их преимуществами, такими как уменьшение шума, самосмазывающихся функций, снижение веса, экономии средств. Однако формовка и механическая обработка зубчатых колес и шестерен связана с рядом трудностей.

Сложности изготовления и механической обработки этих типов деталей машин обусловлены жесткими требованиями предъявляемыми к их прочности, износостойкости и долговечности. Как показывает опыт даже разрушение одного зуба может привести к выходу из строя всей зубчатой передачи.

Существует несколько методов изготовления зубчатых колес из полимеров:

1. Литьё шестерён под давлением из пластмасс.

Достоинством данного метода является высокая прочность, постоянство размером и относительная дешевизна получаемых изделий;

2. Изготовление шестерни механообработкой из Капролона (полиамид 6).

К достоинствам этого метода следует отнести высокую прочность и точность зубчатых колес. Однако, наряду с выше упомянутыми достоинствами, существуют и недостатки, обусловленные быстрым накоплением погрешностей установки и базирования, как следствие брак при мелкосерийном производстве;

3. Метод быстрого прототипирования.

Однозначным достоинством данного метода является высокая скорость изготовления изделий, которая, однако, перекрывается рядом недостатков. Среди них низкая прочность и не ремонтпригодность исключают возможность применения этого метода при изготовлении высоко нагруженных деталей [1].



Основные проблемы зубчатых колес из чистых полимерных материалов могут быть решены заменой их на шестерни, изготовленные с применением ВПКМ. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются угле- и стеклопластики, а также капралон.

Не смотря более высокие прочностные свойства по сравнению с полимерными колесами, при использовании колеса из ВПКМ также существуют некоторые ограничивающие факторы. Основным из которых является температурное разрушение матрицы ВПКМ, низкая ударная прочность и труднообрабатываемость [2]. Над каждой из этих проблем ведется активная работа.

Исследование повышения износа зубчатых колес из ВПКМ при достижении критических нагрузок. Выдвинуто предположение, что износ повышается из-за резкого роста температуры в зоне контакта, что приводит к разрушению связки в полимере [3].

Ведутся работы по изучению механизма износа зубчатых колес из полимерных материалов с добавлением нанотрубок. Практическая реализация состоит в том, что методом литья под давлением была получена заготовка из композита, которую впоследствии поддавали механической обработке, а обработка была проведена методом зубофрезерования [4].

Существуют методы нанесения покрытий на поверхность зуба. Результаты показывают, что поли-тетра-фтор-этилен (PTFE) способствует наибольшему снижению сил трения [5], а отказ состоит преимущественно в отслоение покрытия и абразивному износу.

Практикуется несколько методов комбинирования металлических материалов с композитами при изготовлении зубчатых колес, в зависимости от предъявляемых к конструкции требований.

- зубчатый венец, диск и ступицу исполняют полностью из композита или пластмассы;

- зубчатый венец изготавливают из не металлов, а диск и ступицу из металлов и их сплавов;

- зубчатый венец из металла, а другие элементы зубчатого колеса в различных комбинациях (сочетаниях) из пластмасс и композитов [6].

Широкое применение пластических масс и композиционных материалов, из которых изготавливают детали устройств и механизмов, в целом является существенной особенностью современного развития техники. Во многих случаях детали из новых материалов полностью заменяют металлические в классическом исполнении. В качестве примера можно привести такие материалы как слюдоситаллы на основе фторфлогопита [7], которые обрабатываются на стандартном металлорежущем оборудовании с достаточной точностью исполнения. Многие новые неметаллические материалы предназначены для литья и формования. В этих случаях их используют в промышленности в виде порошка или гранул. Таким образом изготовление зубчатых колёс осуществляют с помощью литья, формования и резания.

Следует также отметить, что одной из важнейших особенностей современного периода совершенствования зубчатых передач является использование для изготовления зубчатых звеньев пластических масс и композиционных материалов [8]. К примеру, достаточно широко используют неметаллы для изготовления зубчатых венцов фирмы Parvalux Electric Motors Ltd, ITT Heyne, Ovoid, SF Opperman, Moss Gear Company, Siemens AG.

Композиционные материалы, армированные углеродными волокнами в зависимости от типа матрицы делятся на:

- армированные пластмассы
- армированные металлы.

Рассмотрим их особенности на примере широко применяемых на практике углепластиков. Среди всех армирующих волокон только арамидные волокна имеют плотность, меньшую плотности углеродных волокон. Но высокопрочные углеродные волокна прочнее арамидных, а высокомодульные углеродные волокна имеют модуль упругости, близкий к модулю упругости борных волокон [9]. Поэтому именно углеродные волокна нашли широкое применение в конструкциях, которые должны иметь ограниченный вес. Среди

всех армированных пластмасс углепластики обладают наиболее высокими стойкостью к усталостным испытаниям и долговечностью.

Углепластики имеют очень низкий коэффициент линейного расширения и оказываются наиболее подходящими материалами для конструирования зубчатых колес и других высоконагруженных конструкций.

Такие ученые как К. Мао, W. Li, C.J. Hooke, D. Walton (Великобритания) проводят исследования, направленные на изучение термических эффектов в зоне контакта зубьев, трения и износа, при работе зубчатой пары из композиционного материала [10]. Ими была определена зависимость между температурой шестерни и передаваемой нагрузкой, получены соответствия между предложенным методом прогнозирования температуры и полученными экспериментальными данными (рис.1.2). Материал шестерни – армированный стеклопластик.

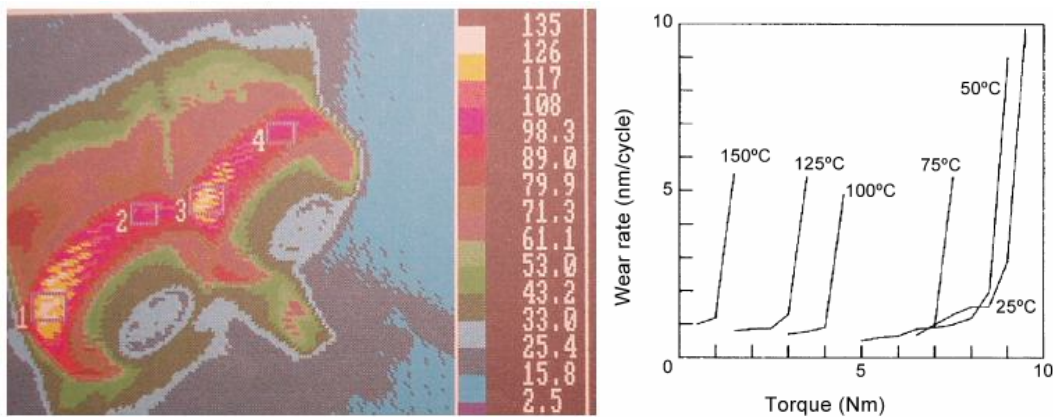


Рисунок 1.2 – Температура поверхности шестерен

Возможности применения пары материалов нейлон – ацетал, исследовалась величина и геометрия износа поверхности в зависимости от нагрузки и выбора материала ведущей и ведомой шестерни в паре нейлон – ацетал. Также при исследованиях учитывался фактор температурных воздействий, так как зубчатые пары из композиционных материалов работают без смазывающих материалов [11].

Основным результатом стало наблюдение высокой стойкости передачи с использованием ведущего зубчатого колеса из ацетал, и разработка рекомендаций по минимизации износа рабочих поверхностей зубчатых колес и

установление зависимости между их износом и количеством рабочих циклов (рис.1.3).

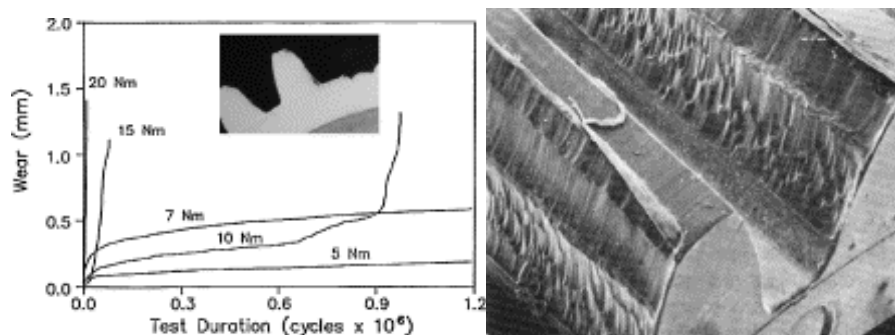


Рисунок 1.3 – Износ зубчатых колес из нейлона

Вопросом термических эффектов в зубчатых передачах также занимались Eric Letzelter, Michèle Guingand, Jean-Pierre de Vaujany, Pauline Schlosser (Франция) ими был предложен метод, основанный на применении инфракрасной камеры, которая позволяет записывать тепловой режим, а также направление распространения теплового потока как функцию времени [12].

Основным результатом их исследований было получение зависимостей температуры от вязкоупругих свойств композита(рис.1.4).

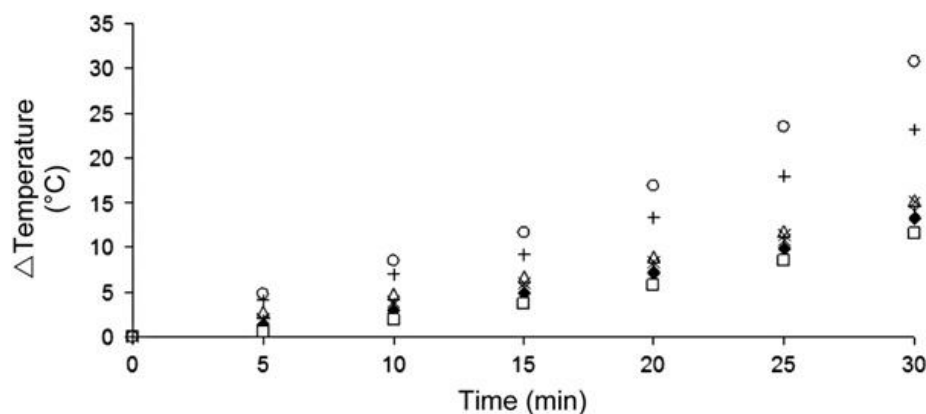


Рисунок 1.4 – Зависимость температуры от времени

Yousef, S. (Египет), изучал механизм износа зубчатых колес из полимерных материалов с добавлением нанотрубок. Модификация материала шестерен нанотрубками карбона позволила получить композит с высокими физико-механическими свойствами. Практическая реализация состояла в том, что методом литья под давлением была получена заготовка, которую впоследствии поддавали механической обработке, зубчатый венец был получен

методом зубофрезерования. с помощью электронного микроскопа изучалась дисперсия нанотрубок в полученной заготовке.

Результаты показали, что сопротивление износу повышается с добавлением нанотрубок. Прочность, модуль упругости и жесткость также увеличивается, в то время как твердость не меняется.

Похожее направление исследований ведут ученые из Индии S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy. На сегодняшний день активно проводятся исследования по модификации ВПКМ и их структуры, путем сопоставления результатов моделирования и натуральных лабораторных исследований, направленных на прогнозирование влияния ориентации волокон в ВПКМ, при изготовлении заготовок методом литья под давлением [13]. Большое количество работ посвящено вопросам прогнозирования и предотвращения усадки материала при остывании после литья.

Основным результатом исследований является то, что несогласованность волокон по сечению зубьев деформирует толщину зуба, и увеличивается погрешность шага, что приводит к отклонениям от проектных значений точности зубчатой передачи (рис1.5).

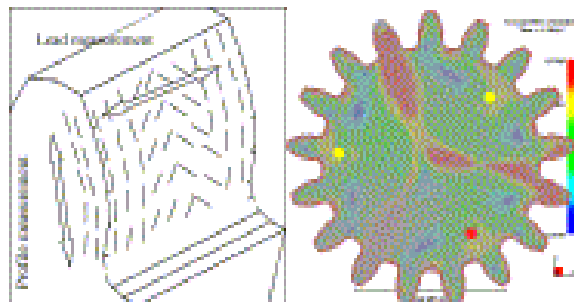


Рисунок 1.5 – Деформация зуба зубчатого колеса

По результатам исследования усадки полимерного материала после литья, была установлена взаимосвязь между усадкой и условиями спекания [14]. Рассматривалась микроструктура материала и физико-механические свойства полученного композита. Приведена сравнительная характеристика получаемой микротвердости в зависимости от метода спекания, под вакуумом или под давлением воздуха.

Важным аспектом при изучении зубчатых колес из композиционных материалов является трение поверхностей контактирующих колес, этим вопросом активно занимаются ученые из Японии, такие как K.D. Dearn, Y.K. Chen. Ними проводилось изучение трения и износа в области вершины зубьев, при переходе от качения к скольжению. Что оказывает существенное влияние на долговечность полимера, использованного в зубчатом колесе. Исследуется материал: полиэфир-эфир-кетон (PEEK), для упрощения понимания процессов применяют два трущихся диска [15]. Наблюдаемые механизмы разрушения были связаны со структурой контактных поверхностей, а также включены плавление поверхности и контактной усталости.

Шестерни из (PEEK) способны работать на низких коэффициентах скольжения при низких и высоких нагрузках. Их работоспособность уменьшается с увеличением коэффициента скольжения. Представленные результаты могут быть использованы в процессе проектирования, чтобы позволить материалу быть примененным в высоконагруженных зубчатых передачах (рис.1.6).

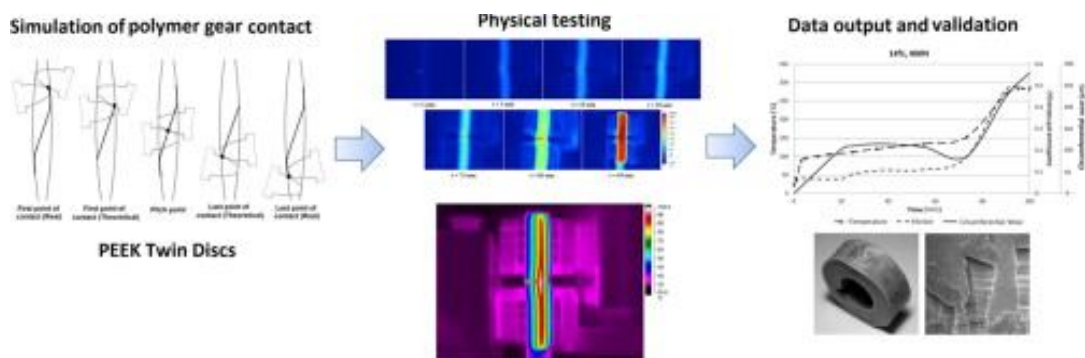


Рисунок 1.6 – Изучение скольжения в паре зубчатых колес из пластика

N.A Wright, S.N Kukurka свою работу направили на симуляцию контактных условий во время переключения скоростей хода. Так как по утверждению автора до этого износостойкость полимерной матрицы и композитов не изучалась систематически [16].

Методы испытаний на износ сравниваются, включая прямое тестирование колеса и тестирования диска, вместе с электронным измерением, потери веса и прямых измерений. Представленный новый метод,

характеризующий износ передач, которая касается реальных условий контакта и износа зубьев. Тема и методы данных исследований явно перекликаются с приведенными выше.

## 1.2 Общее представление о резании волокнистых полимерных композиционных материалах

В отличие от полимеров и квазиизотропных полимерных композиционных материалов (например, термопластов на основе бумаги, КМ, упрочненных короткими волокнистым наполнителем или частицами) ВПКМ проявляют высокую анизотропию свойств вследствие своей слоистой структуры. Это существенно образом изменяет процесс стружкообразования при резании таких материалов, делая его абсолютно не похожим на достаточно хорошо изученные процессы резания металлов, в том числе и хрупких.

Стружкообразование при резании однонаправленных ВПКМ сильно зависит от угла направленности волокон, и в меньшей степени от переднего угла. В зависимости от направленности волокон и величин переднего угла лезвия инструмента, формируется один из пяти типов стружки (рисунок 1.7):

1. Стружка расслаивания (тип I) образуется при резании ВПКМ с углом направленности волокон  $\Theta \rightarrow 0^0$  (рис. 1.7а).
2. Стружка продольного изгиба (тип II) образуется при резании ВПКМ с углом направленности волокон  $\Theta \rightarrow 0^0$  инструментом с нулевым или отрицательным передним углом (рис. 1.7б)
3. Стружка, формируемая срезанием волокон (тип III и тип IV) образуется при резании ВПКМ в условиях, когда волокна ВПКМ разрушаются перпендикулярно к своим осям в результате межслоевого сдвига со сжатием. Этот режим может иметь место в диапазоне углов направленности волокон в пределах  $0^0 < \Theta < 90^0$  практически при любой величине переднего угла (рисунок 1.7в, г). В зависимости от объема деформации сдвига можно получить либо

суставчатую стружку при  $\Theta < 75^\circ$  (тип III), либо элементную (рис. 1.7д) при  $\Theta \rightarrow 90^\circ$  (тип IV). Стружка IV типа часто очень похожа на порошок или пыль.

4. Стружка макроразрыва (тип V) образуется при резании ВПКМ с большими углами направленности волокон ( $105^\circ < \Theta < 150^\circ$ ) и сопровождается макроразрушением ВПКМ (рис. 1.7е).

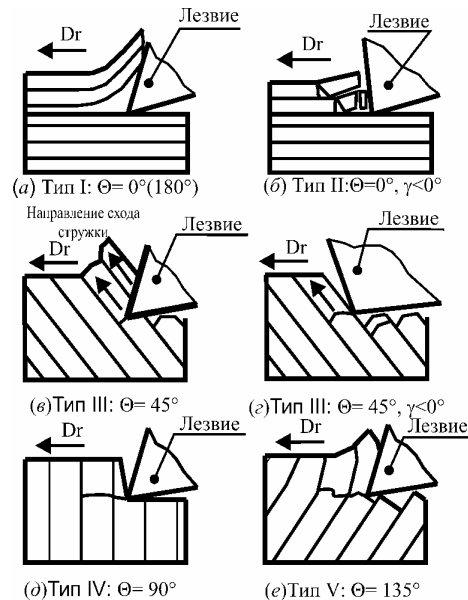


Рисунок 1.7 – Механизмы стружкообразования и типы стружек, формирующихся при прямоугольном резании углепластика остро заточенным лезвием [17]

### 1.2.1 Влияние различных факторов на процесс стружкообразования

Исследования показывают, что механизм стружкообразования и тип стружки при резании ВПКМ зависят от угла направленности волокон  $\Theta$  по отношению к направлению вектора скорости главного движения резания  $V$ , переднего угла  $\gamma$ , радиуса округления режущей кромки  $\rho$ , материалов матрицы и волокнистого наполнителя, характера армирования.

Угол направленности волокон  $\Theta$  и передний угол  $\gamma$  оказывают на механизм стружкообразования и тип стружки при резании ВПКМ наибольшее влияние. При резании с расположением вектора скорости резания параллельно



волокнам ( $\Theta = 0^\circ$ ) инструментом с большим положительным передним углом у стружка формируется за счет расслаивания и хрупкого излома [17].

Задний угол  $\alpha$  не оказывает существенного влияния на механизм формирования стружки или топографию обработанной поверхности, за исключением незначительного повышения качества обработанной поверхности при больших значениях  $\alpha$  [17].

Радиус округления режущей кромки. В условиях резания с малым отношением толщины среза  $a$  к радиусу округления режущей кромки механизмы стружкообразования изменяются с изменением  $\rho$ . Если радиус округления режущей кромки  $\rho$  соизмерим или меньше поперечного размера волокнистого наполнителя, то волокна легко срезаются и процесс эквивалентен процессу резания абсолютно острым лезвием. Волокна отталкиваются (упруго отжимаются) и плохо срезаются, когда радиус округления режущей кромки  $\rho$  приблизительно в пять – десять раз больше диаметра волокна (рис. 1.8) [18, 19].

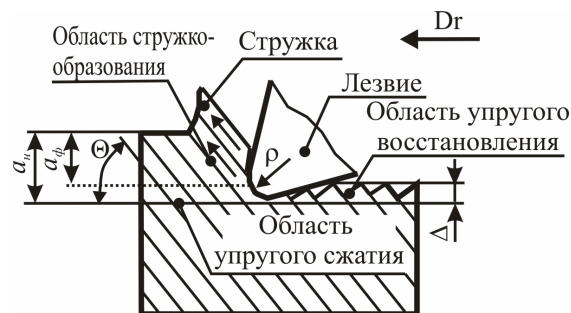


Рисунок 1.8 – Схема формирования стружки при резании лезвием с округленной режущей кромкой [17]

Материал матрицы также влияет на процесс формирования стружки. Из – за различия в физических и механических свойствах термопластов и реактопластов при их резании образуются различные стружки. Армированные углеволокном реактопласты (углепластики), которые являются более прочными и более хрупкими по сравнению с термопластами, образуют элементную, порошкообразную стружку за счет хрупкого разрушения матрицы и волокнистого наполнителя. При этом может наблюдаться растрескивание материала матрицы.

Материал волокнистого наполнителя. В зависимости от механических и физических свойств волокнистого наполнителя ВПКМ также проявляют различные механизмы разрушения и морфологию стружки при резании. При резании ВПКМ, армированных угле – и стекловолокном, наблюдается хрупкий излом волокон, а при резании ВПКМ на основе арамидных волокон – пластический разрыв волокнистого наполнителя. Резание ВПКМ на основе стекловолокна сопровождается частичным изгибом волокнистого наполнителя и образованием трещин. Это приводит к вырыванию волокон из материала матрицы.

Таким образом, особенности строения ВПКМ и их разрушение в значительной мере характеризуют специфические условия процессов стружкообразования и износа рабочих поверхностей лезвийного инструмента. К ним можно отнести:

1. Сравнительно малую межслоевую прочность ВПКМ, способную привести к расслаиванию ВПКМ под действием сил резания. Для предотвращения этого необходимо кинематически обеспечивать направление сил резания для сжатия слоев ВПКМ между собой;
2. Малую пластичность ВПКМ, приводящую к образованию при резании элементной стружки (IV тип);
3. Значительную упругость материала, которая вызывает уменьшение диаметра отверстий при их обработке, а также большие силы трения на задних поверхностях инструмента, требующие увеличения задних углов лезвия инструмента;
4. Токсичность и вредность стружки, вызывающие необходимость в их эффективном удалении из зоны обработки по всей площади стружечных канавок;
5. Малая теплопроводность ВПКМ, приводящая к интенсивному разогреву инструмента даже при относительно небольших скоростях резания;
6. Нежелательность применения смазочно – охлаждающих жидкостей при резании по причине снижения прочностных характеристик материала.

### 1.2.2 Влияние различных факторов на силу резания

Сила резания при обработке ВПКМ зависит от угла направленности волокон, механических свойств ВПКМ, угла трения, геометрии инструмента, режима резания и др.

Угол направленности волокон оказывает, пожалуй, наибольшее влияние из всех перечисленных факторов, поскольку изменяет режим стружкообразования и тип стружки. С увеличением угла направленности волокон  $\Theta$  приблизительно до  $60^\circ$  тангенциальная проекция силы резания  $P_z$  медленно увеличивается. Далее, при приближении к  $\Theta = 90^\circ$ , наблюдается ее резкое увеличение. При дальнейшем увеличении угла  $\Theta$  тангенциальная проекция силы резания уменьшается. Существенное снижение ее величины наблюдается в диапазоне  $\Theta = 100 - 165^\circ$ . Радиальная проекция силы резания  $P_y$ , хоть и уменьшается, но в значительно меньшей степени, чем  $P_z$ .

Трение на рабочих поверхностях лезвия инструмента значительно влияет на напряжения и деформации в плоскости сдвига, а, соответственно, и на тип образующейся стружки. Угол трения  $\mu$  при резании углепластиков существенно зависит от угла направленности волокон  $\Theta$ , причем эта зависимость имеет почти синусоидальную форму.

С увеличением переднего угла  $\gamma$  тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  проекции силы резания уменьшаются. Это связано с облегчением процессов отделения стружки и ее скольжения по передней поверхности при больших передних углах  $\gamma$ . Эта тенденция как для углепластиков, так и для стеклопластиков подтверждается большинством исследований.

### 1.2.3 Тепловые процессы

Тепловые процессы при резании ВПКМ подчиняются общим закономерностям классической теории тепловых процессов при резании металлов [20]. Вместе с тем, удельная теплоемкость ВПКМ обычно больше, чем у

металлов, а удельная теплопроводность значительно меньше. Поэтому, при прочих равных условиях, если в заготовки из металла и ВПКМ поступит одно и тоже количество теплоты, температура в заготовке из ВПКМ будет больше.

При резании ВПКМ, из – за их низкой удельной теплопроводности теплота, генерируемая в зоне первичных деформаций, не передается лезвию быстро, и, поэтому, ее отвод в результате теплопередачи весьма ограничен. Отводиться может только теплота из тонкого граничного слоя на поверхностях контакта.

### **1.3 Общие представления об износе инструмента**

#### **1.3.1 Виды износа**

Непрерывное резание ВПКМ (на примере точения), как правило, сопровождается преимущественным изнашиванием по задним поверхностям (главной и вспомогательной) и увеличением радиуса округления режущих кромок в результате постепенного истирания контактных поверхностей лезвия. Большая часть изменений происходит на задней поверхности с формированием искривленной (криволинейной) границы площадки износа. В случаях, когда и главная и вспомогательная режущие кромки участвуют в процессе резания, максимальный износ по задней поверхности наблюдается в зоне, примыкающей к вершине лезвия [182].

#### **1.3.2 Механизмы изнашивания**

Из всех известных механизмов изнашивания [21] отказ инструментов при резании ВПКМ вызывают, как правило, скол и выкрашивания режущей кромки, абразивное и химическое изнашивание [17]. В то время, как скол приводит к внезапному и катастрофическому разрушению режущей кромки в первые моменты резания, то остальные механизмы способствуют постепенному прогрессирующему изменению формы лезвия в последующие периоды резания.

Поскольку температура резания при обработке ВПКМ относительно низка и не способствует высокой скорости химических реакций, то интенсивность изнашивания при резании этих материалов главным образом определяется механическими процессами.

С механическим удалением микроскопических частиц материала лезвия с его поверхности связаны выкрашивание и абразивное изнашивание. Выкрашивание режущей кромки возникает в условиях, когда режущий инструмент или технологическая система не имеет достаточной жесткости, чтобы противостоять чрезвычайно изменяющимся силам резания, большой глубине резания и/или переменным нагрузкам.

Абразивное изнашивание лезвия в основном связано с истирающим действием на поверхностях контакта «стружка – лезвие» и «лезвие – обработанная поверхность» твердых составляющих, которые входят в состав обрабатываемого ВПКМ [22, 23]. В основном это материал волокон. Абразивное изнашивание происходит и на передней и на задней поверхностях инструмента, однако на задней поверхности интенсивность этого процесса наибольшая. В результате абразивного изнашивания на режущей кромке формируются «ребристые» зоны и увеличивается ее радиус округления, что, в конечном счете, усложняет процесс стружкообразования и повышает температуру резания.

Химическое изнашивание инструментов при резании ВПКМ связано с химическими реакциями инструментального материала при его контакте с кислородом воздуха и веществами обрабатываемого материала, и образованием на поверхности лезвия более мягких или хрупких соединений, которые легко удаляются с поверхности лезвия в процессе трения. В зависимости от режима резания и свойств обрабатываемого материала (типа волокон и их состава, метода армирования и т.п.) некоторые из этих механизмов могут играть доминирующую роль и определять интенсивность изнашивания инструмента в целом.

Развитие износа по задней поверхности при резании ВПКМ происходит во времени с переменной интенсивностью и может быть, как и при резании металлов, разделено на три периода [24]:

1. Период приработки. В этот период наблюдается высокая интенсивность изнашивания. К основным причинам изменения формы лезвия в этом периоде является или выкрашивания или сколы как микровыступов на рабочих участках поверхностей лезвия, так и режущего клина. В начальном периоде работы лезвия микровыступы на его рабочих поверхностях и новые режущие кромки, имея малый радиус округления  $r$ , воспринимают силы резания по относительно малой площади контакта со стружкой, вследствие чего возникают чрезвычайно высокие контактные давления, что в свою очередь приводит к их механическому разрушению, и, естественно, к высокой интенсивности изнашивания лезвия в целом.

2. Период установившегося износа. В течение всего этого периода интенсивность изнашивания остается практически неизменной, хотя площадка износа хоть и медленно, но все-таки увеличивается, что сопровождается увеличением работы трения, а, следовательно, и мощности тепловых потоков. В конце этого периода износ по задней поверхности достигает второй критической величины, что приводит к некоторому росту силы и температуры резания;

3. Период катастрофического износа. Этот период характеризуется резким увеличением величины площадки износа за счет комбинированного влияния теплового разупрочнения материалов заготовки и инструмента и увеличения контактного давления, что сопровождается увеличением интенсивности изнашивания.

### 1.3.3 Критерии износа и стойкость инструмента при резании волокнистых полимерных композиционных материалов

К сожалению, к настоящему времени еще не существует никаких официальных документов и конкретных рекомендаций по критериям износа при обработке ВПКМ [17]. На практике при обработке ВПКМ чаще всего, как и при обработке металлов, нормируется величина фаски износа на задней поверхности. Ее величина ограничивается  $h_3=0.2$  мм, что по крайней мере в 1.5 раза меньше, чем при обработке металлов, когда рекомендуемая величина износа устанавливается  $h_3 > 0.3$  мм.

Одним из критериев износа при обработке ВПКМ может служить радиус округления режущей кромки  $\rho$  [25]. Использование этого критерия для оценки работоспособности инструментов в реальном производстве затруднено, так как требует для его измерения специальных методик и приборов, например, электронного микроскопа.

На практике для оценки работоспособности инструментов часто используют такие показатели как их ресурс или стойкость.

Использование в качестве критерия работоспособности инструмента его ресурса тоже не всегда может быть приемлемым. Например, ресурс, выраженный количеством обработанных данным сверлом отверстий при заданных условиях обработки, хоть и является экономически информативной характеристикой инструмента, однако ограничен конкретной операцией.

Более универсальной характеристикой, позволяющей сравнивать различные инструменты и условия обработки, является стойкость. Некоторые эмпирические зависимости стойкости инструментов от скорости резания при обработке ВПКМ можно найти, например, в работе [17]. Стойкость инструмента зависит от геометрических параметров режущего инструмента (передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы) и режима резания (скорости резания  $V$ , подачи  $S$  и глубины резания  $a$ ).

## **1.4 Общие представления об износе инструментов при обработке однородных пакетов волокнистых полимерных композиционных материалов/ металл**

### **1.4.1 Износ и стойкость сверл**

Независимо от применяемого инструментального материала абразивное изнашивание является превалирующим механизмом изнашивания сверл при обработке ВПКМ. Однако в отличие от прямоугольного резания для сверления ВПКМ характерны повышенные температуры и стружкообразование путем хрупкого разрушения твердых волокон, закрепленных в мягкой матрице как под действие режущих лезвий, так и за счет вдавливания поперечной режущей кромки. Эти особенности приводят к тому, что в некоторых случаях наблюдается выкрашивание и абразивное изнашивание режущих кромок твердосплавных сверл после сверления углепластика, которые показаны на рис. 1.9. После обработки первых 10-ти отверстий на передней поверхности вдоль поперечной кромки наблюдаются участки с её нарушением (рис. 1.9*а*). После обработки 100 отверстий область выкрашивания распространяется ещё и на главную режущую кромку (рис. 1.9 *б,в*). После обработки 50-ти отверстий происходит выкрашивание на вершине и на вспомогательной режущей кромке (рис. 1.9 *г*). Как упоминалось ранее сверление углепластика сопровождается абразивным изнашиванием поперечной режущей кромки (рис. 1.9*д*), по задней поверхности главной режущей кромки (рис. 1.9 *е*), а также округлением вершины сверла (рис. 1.9 *ж*) и адгезией углерода на задней поверхности и в вершине сверла, которая проявлена химическим методом (рис. 1.9 *з*) [24, 26].



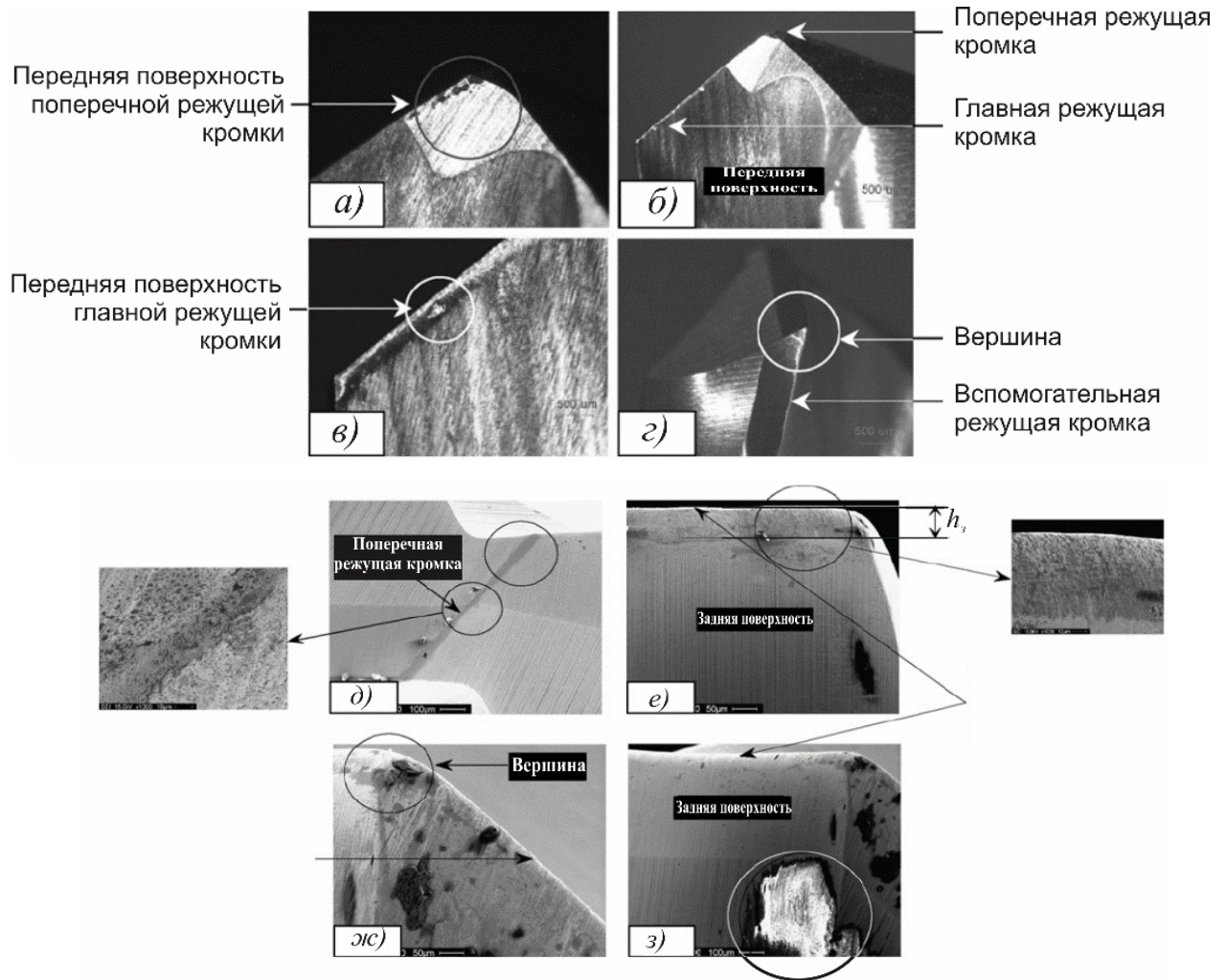


Рисунок 1.9 – Места выкрашивания твердосплавных сверл диаметром 5 мм после сверления углепластика ( $n=15000$  об/мин,  $s=0.1$  мм/об) [24]

Своеобразное влияние на процесс изнашивания оказывает подача. При очень малых подачах весьма длительный контакт инструмента с заготовкой способствует накоплению теплоты и повышению температуры, а, следовательно, и ускоряет изнашивание. При больших подачах, чрезмерно большие нагрузки на инструмент приводят к интенсификации абразивного изнашивания, разрушению и выкрашиванию режущих кромок [24].

Повышение температуры является основной проблемой при сверлении смешанных пакетов, поскольку высокая температура в зоне резания, помимо прочего, существенно снижает стойкость инструмента. При сверлении с помощью одного и того же инструмента лезвие может последовательно

подвергаться нескольким механизмам изнашивания в зависимости от состава пакета и расположения слоев.

Износ сверл является основным фактором, изменяющим качество отверстия в процессе обработки. Такие факторы, как время сверления, скорость резания и подача также могут влиять на качество отверстия, но в меньшей степени, чем износ инструмента. Поэтому для сохранения приемлемого качества отверстий в процессе обработки необходимо уменьшение интенсивности изнашивания сверл, что может быть достигнуто за счет выбора таких рациональных инструментальных материалов, геометрии инструмента и режимов сверления, которые бы способствовали уменьшению времени контакта сверла с заготовкой, а, следовательно, и температуры резания.

Вместе с тем, сложное, а в некоторых случаях и противоречивое, влияние этих факторов на показатели процесса сверления не всегда позволяет добиться желаемого результата. При прочих равных условиях:

1. Увеличение подачи уменьшает время контакта инструмента с заготовкой, но и увеличивает осевую силу. Следовательно, увеличивается вероятность расслаивания и повышается интенсивность изнашивания инструмента;

2. Уменьшение подачи уменьшает осевую силу, но увеличивает время контакта инструмента с заготовкой и, следовательно, температуру резания и интенсивность изнашивания;

3. Увеличение скорости резания уменьшает осевую силу, а, следовательно, и вероятность расслаивания, но увеличивает температуру резания и вибрации, что сопровождается повышением интенсивности изнашивания инструмента;

4. Уменьшение скорости резания увеличивает осевую силу, что, как правило, сопровождается возрастанием вероятности расслаивания.

### 1.4.2 Влияние различных факторов на расслаивание обрабатываемого материала

Степень влияния различных факторов на расслаивание обрабатываемого материала при сверлении отверстий в заготовках из ВПКМ (Рис. 1.10) может быть представлена в порядке убывания степени воздействия в следующем порядке [27]: подача, износ инструмента, геометрия и конструкция инструмента, материал матрицы и схема армирования ВПКМ, скорость резания.

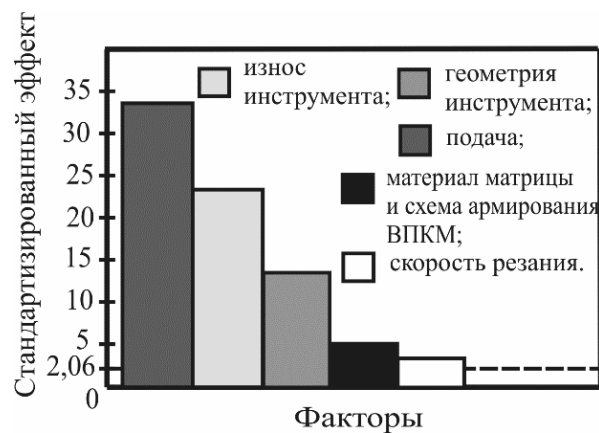


Рисунок 1.10 – Степень влияния различных факторов на величину расслаивания при сверлении углепластиков [27]: уровень значимости  $\alpha=0.05$

### 1.4.3 Влияние режима резания

При малой подаче внутренняя поверхность отверстия гладкая и обычно имеет малое расслаивание. Если подача достаточно мала, то расслаивание может возникнуть только на выходе сверла, когда поперечная режущая кромка и большая часть главных режущих кромок уже вышли из отверстия.

Увеличение скорости резания, при прочих равных условиях, хотя и приводит к снижению осевой силы и крутящего момента в т.ч. и из-за увеличения температуры резания и изменения механических свойств ВПКМ, все-таки сопровождается увеличением степени повреждения отверстия из-за высоких температур. При высокой скорости резания волокна не срезаются чисто,

из-за возрастания под действием высоких температур их пластичности и степени «размазывания». При высоких скоростях резания наблюдаются также и неполное срезание волокнистого наполнителя, в результате чего увеличивается эллипсность отверстий [28].

На практике скорость резания ограничивается двумя факторами: максимально возможная частота вращения сверла и температура резания, определяющая термическую деструкцию [29].

#### 1.4.4 Влияние износа сверла

Износ сверл приводит к расслаиванию ВПКМ, и в первую очередь слоев пакета на выходе инструмента из заготовки. Коэффициент расслаивания увеличивается с увеличением износа по задним поверхностям сверла и уголкам сопряженных лезвий в результате увеличения осевой силы. Для спиральных сверл при обработке ВПКМ характерным является также и большая, чем при обработке сталей, величина износа поперечной режущей кромки. Такое изменение геометрии сверла, связанное с его износом, приводит к некоторому увеличению критической осевой силы  $P_x$ , а, следовательно, и к увеличению степени расслаивания [30].

#### 1.4.5 Влияние геометрических параметров и конструкции инструмента

Геометрические параметры и конструкция инструмента влияют при сверлении ВПКМ на все виды повреждений.

Для любой конструкции инструмента расслаивание наружных волокон у поверхности врезания (входа) увеличивается с увеличением переднего угла  $\gamma$  [31].

Расслаивание наружных волокон у поверхности выхода режущего инструмента может быть уменьшено путем смещения точки приложения

осевой силы от центра к периферии отверстия, что позволяет увеличить критическую осевую силу.

Инструментальный материал влияет на расслаивание через интенсивность изнашивания, коэффициент трения и радиус округления режущей кромки.

Применение специальных форм заточки спиральных сверл из быстрорежущей стали не позволяет получить ощутимого эффекта при обеспечении требуемого качества обработанной поверхности. В то же время сверла с короткой перемычкой и острой режущей кромкой из твердого сплава или поликристаллического алмаза обеспечивают наименьшее расслаивание [27].

Различное биение сверл, обусловленное погрешностью переточки, вызывает рассеяние размеров и увеличение степени расслаивания при одной и той же осевой силе.

#### 1.4.6 Влияние материала матрицы и формы армирования

Разнородность ВПКМ, состоящего из твердых абразивных слоев и мягкой матрицы, в каждом конкретном случае усложняет выбор оптимальных режимов резания. Материал матрицы, форма армирования и, особенно, объемное содержание волокон, влияют на расслаивание посредством изменения в процессе резания фактической осевой силы  $P_x$  и критической осевой силы  $[P_x]$ .

При сверлении стеклопластиков осевая сила увеличивается с увеличением объемной доли волокон. Увеличение скорости резания при сверлении поперечных, тканевых и штапелированных ВПКМ, уменьшает расслаивание наружных волокон (у поверхности входа режущего инструмента) в результате уменьшения осевой силы. Осевые силы при сверлении ленточных ВПКМ в три раза больше, чем при сверлении поперечных ВПКМ. У штапелированных ВПКМ расслаивание наружных волокон у поверхности врезания меньше, чем у тканевых. Для одной и той же формы волокнистого наполнителя расслаивание наружных волокон у поверхности врезания (входа) и

расслаивание наружных волокон у поверхности выхода у тканевых ВПКМ на эпоксидной основе ниже, чем у ВПКМ на полиэстеровой основе [32, 10], несмотря на то, что эти два композиционных материала обрабатываются с приблизительно одинаковыми осевыми силами.

## 1.5 Качество отверстий

Качество отверстий в деталях из ВПКМ, как и в металлических деталях, в значительной мере определяет срок службы всего соединения. Показатели качества отверстий рассматриваются как технологические критерии прочности и надежности будущего соединения. Вместе с тем, показатели качества отверстий в деталях из ВПКМ и в металлических деталях различны.

Традиционно качество отверстий в металлических деталях для их механических соединений определяется размерной точностью, шероховатостью поверхности, формой отверстия и его позиционным отклонением. В силу неоднородного строения для ВПКМ этих показателей недостаточно для того, чтобы обеспечить надежность соединения. Поэтому для ВПКМ применяются и регламентируются дополнительные, специфические для них, показатели.

### 1.5.1 Показатели качества отверстий в однородных пакетах ВПКМ

Показатели качества отверстий в деталях из ВПКМ включают в себя, наряду с такими показателями как размерная точность, погрешность формы и взаимного расположения, шероховатость обработанной поверхности, также и показатели поврежденности поверхности обработанного отверстия: расслаивание, сколы кромок, вытягивание волокон и др. (рис. 1.11) [33, 34, 35]. Известно, что приблизительно 60% брака при сборке летательных аппаратов возникает из-за повреждений поверхностей отверстий.

В деталях из ВПКМ традиционно применяемые параметры шероховатости обработанной поверхности не обеспечивают полной информации о микрорельефе и качестве поверхности отверстий [18] вследствие наличия, так называемой ворсистой – выступания над поверхностным слоем не срезанных волокон волокнистого наполнителя.

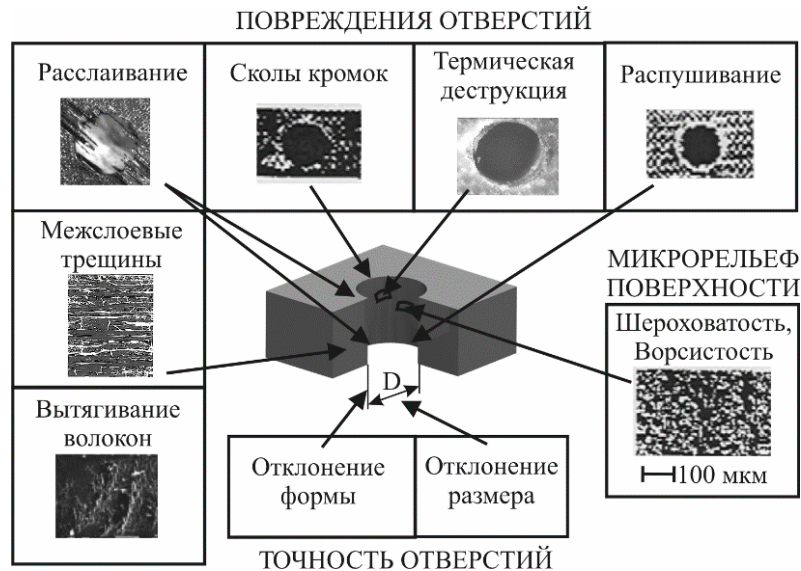


Рисунок 1.11 – Показатели качества отверстий в ВПКМ [34]

Таким образом, в тех случаях, когда имеет место выступание не срезанных волокон над обработанной поверхностью на величину больше 4–5 диаметров элементарного волокна в количестве более 20–30% от общего количества волокон, качество поверхности должно дополнительно оцениваться ворсистой, т.е. количеством не срезанных волокон и величиной их выступания над обработанной поверхностью.

Характерными повреждениями поверхностей отверстий в деталях из ВПКМ являются также межслоевые трещины и термическая деструкция. Часто из-за недорезания расслоившихся слоев на выходе инструмента из формируемого отверстия не все волокна срезаются. Если несрезанных волокон мало, то они выглядят как заусенцы, если их много (больше 20–30%) – наблюдается распушивание волокон [22, 35, 26, 36, 33].

Наиболее часто встречающимся видом повреждения отверстий является расслаивание, представляющее собой разделение поверхностных слоев ВПКМ

под действием усилий, главным образом осевых, возникающих в процессе резания.

Таблица 1.1 – Виды повреждений поверхности отверстий в ВПКМ

<b>Вид повреждения</b>	<b>Характеристика</b>	<b>Причина возникновения</b>
Расслаивание наружных слоев у поверхности врезания режущего инструмента (peel-up delamination)	Равномерное по образующей расслаивание слоев у поверхности врезания инструмента	Сила резания, действующая со стороны ленточек и перемычки, больше прочности межслоевой связи верхних слоев
Расслаивание наружных слоев у поверхности выхода режущего инструмента (push-down delamination)	Равномерное по образующей расслаивание слоев у поверхности выхода инструмента	Осевая сила резания, действующая на несрезанные слои ВПКМ, больше прочности межслоевой связи нижних слоев
Заусенцы (Splintering); распушивание волокон (fuzzing)	Часть волокон на выходе инструмента из отверстия остаются несрезанными	Не срезание нижних слоев из-за их деформации и отслаивания нижнего слоя.
Межслоевые трещины (spalling, interlaminar cracking)	Формирование трещин между слоями многослойных ВПКМ внутри отверстия	Осевая сила резания, больше прочности межслоевых связей
Вытягивание волокон (fibre pull-out, fibre/matrix debonding)	Вытягивание волокон из матрицы	Малая адгезия волокон к матрице при данной осевой силе
Скол кромки (edge chipping)	Микроразрушение кромки отверстия, равномерное по образующей	Повышенная хрупкость ВПКМ, вибрации при резании
Термическая деструкция (Thermal damages)	Повреждения поверхности отверстия из-за повышенной температуры	Температура резания больше предельной для данного ВПКМ



### 1.5.2 Повреждения отверстий

Как уже было отмечено, наиболее характерным видом повреждения отверстий, выполненных в деталях из ВПКМ, является расслаивание. Этот вид повреждения обусловлен тем, что ось отверстия, как правило, располагается перпендикулярно плоскости армирования и действующие силы резания стремятся оторвать один слой от другого. Несмотря на различные механизмы возникновения расслаиваний, в конечном счете они приводят к нарушению целостности структуры ВПКМ.

В зависимости от причины возникновения этого дефекта (см. табл. 1.1) [22] может наблюдаться расслаивание наружных слоев у поверхности врезания режущего инструмента и расслаивание наружных слоев у поверхности выхода режущего инструмента. Этот вид повреждения отличается от межслоевой трещины тем, что формируется исключительно в поверхностных слоях ВПКМ. К основным причинам расслаивания даже при обработке «острым» инструментом (сверлом) можно отнести: при расслаивании наружных слоев у поверхности врезания – наличие перемычки у инструмента (сверла) и отрицательных передних углов в этой зоне, а также большая подача; при расслаивании наружных слоев у поверхности выхода режущего инструмента, – как правило, большая подача.

Дополнительно расслаивание наружных слоев у поверхности врезания режущего инструмента имеет место вследствие действия сил, прижимающих верхние слои ВПКМ к рабочим поверхностям сверла (рис. 1.12). Часть срезанного материала, т.е. формируемая стружка, начинает «наматываться» («закручиваться») в стружкоотводящих (стружечных) канавках сверла и уплотняться еще до того, как он будет полностью отделен от соответствующего слоя ВПКМ, в результате чего в зоне его контакта с вновь сформированной (обработанной) поверхностью возникают относительно большие силы трения, особенно при больших подачах. Эти силы приводят к тому, что перемещающаяся вдоль стружечной канавки достаточно сильно уплотненная часть срезанного слоя, воздействуя на верхние

слои заготовки, которые в данной зоне удерживаются только силами межслоевых связей, стремясь их разделить.

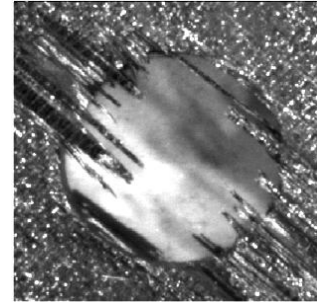


Рисунок 1.12 – Пример расслаивания наружных слоев листа ВПКМ у поверхности врезания сверла  
 Рисунок 1.13 – Пример расслаивания наружных слоев ВПКМ у поверхности выхода сверла

Таким образом, склонность к расслаиванию у поверхности врезания определяется свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, режимом резания, конструкцией инструмента и величинами действующих сил резания, в первую очередь осевых.

Расслаивание наружных слоев у поверхности выхода режущего инструмента – повреждение, которое происходит в межслоевых областях нижних слоев ВПКМ при выходе режущего инструмента из контакта со слоистой заготовкой (рис. 1.13). Это повреждение является следствием действия осевой силы резания на еще полностью неразрезанные слои заготовки. При определенных условиях напряжения, возникающие в результате действия осевой силы резания, могут превышать прочность межслоевых связей в еще полностью несрезанных слоях формируемого отверстия. Под действием осевой силы еще несрезанные слои изгибаются, что приводит к нарушению условия прочности между слоями, формированию и распространению трещины в межслоевом пространстве и, естественно, к разрыву адгезионных связей между отдельными слоями и расслаиванию остающихся несрезанных слоев листа ВПКМ.

Эксперименты показали [37], что расслаивание при сверлении наиболее активно происходит в момент воздействия поперечной режущей кромки на впереди лежащие («нижние») слои и ее выходе из контакта с заготовкой.

Экспериментально доказано, что при сверлении расслаивание у поверхности врезания намного меньше, чем у поверхности его выхода из отверстия.

Расслаивание наружных слоев способствует не срезанию волокнистого наполнителя (рис. 1.12 и 1.13) [38, 39], особенно если на поверхности листа ВПКМ присутствует однонаправленный слой. Поэтому связанные с расслаиванием повреждения вдоль образующей отверстия неравномерны. Область повреждения вокруг отверстия имеет частично эллиптическую форму, причем большая ось этого эллипса ориентируется вдоль направления волокон. Несрезанные волокна могут наблюдаться как на поверхности входа сверла в заготовку, так и на поверхности выхода сверла из отверстия. В зависимости от свойств волокон обрабатываемого листа ВПКМ и схемы их укладки повреждения могут иметь вид заусенцев и/или распушенных волокон [40]. Заусенцы представляют собой отдельные несрезанные волокна достаточно правильной формы, а распушивание представляет собой относительно большое число несрезанных волокон по периметру отверстия. Распушивание преимущественно возникает в области резания с острым углом направленности волокон относительно режущей кромки в условиях, когда обработка выполняется инструментом с увеличенным радиусом округления режущей кромки.

Для количественной характеристики расслаивания используют два коэффициента:

1. Коэффициент расслаивания  $F_d$  [41], представляющий собой отношение максимального диаметра поврежденной области  $D_{max}$  к номинальному диаметру отверстия  $D$ .
2. Коэффициент расслаивание по площади  $F_A$  [2]. Он определяется как отношение площади поврежденной области ( $A_{Dmax}$ ) к номинальной площади отверстия ( $A_D$ ).

К первому этапу расслаивания можно отнести ту часть процесса, которая связана воздействием на нижние слои ВПКМ осевой силы, возникающей на поперечной режущей кромке. Под действием этой силы около оси отверстия образуется малая выпуклость, которая по мере движения сверла увеличивается вдоль направления волокон в плоскости армирования. Когда локальные растягивающие напряжения между срезанным и несрезанным слоями на периферии отверстия начинают превышать межслоевую прочность, в определенной области матрицы возникает трещина, которая может устойчиво распространяться. Увеличение выпуклости сопровождается уменьшением сил сцепления между оставшимися несрезанными слоями за счет увеличения касательных напряжений между ними при их растяжении (удлинении), и, соответственно уменьшением крутящего момента. При выходе сверла «открываются» поверхностные щели в нижних слоях, в результате чего поперечная режущая кромка выходит из контакта с заготовкой, и начинается второй этап деформирования волокон, формирования и роста трещин за счет осевых сил резания на главных режущих кромках. Учитывая то, что поперечная режущая кромка имеет большой отрицательный передний угол и формирует при сверлении более 50% осевой силы, расслаивание оставшихся несрезанных слоев на этом этапе хоть и имеет место, но в значительно меньшей степени, чем на первом этапе.

Таким образом, размер (диаметр) поврежденной области в поперечном сечении определяется величиной осевой силы  $P_x$ , создаваемой режущим инструментом на соответствующем этапе при заданных режимах резания, а также свойствами обрабатываемого ВПКМ. Расслаивание возникает тогда, когда осевая сила  $P_x$  достигает или становится больше критического значения  $[P_x]$ :  $P_x \geq [P_x]$ .

С увеличением осевой силы, при прочих равных условиях, диаметр поврежденной области возрастает. При этом, если силы резания в конце первого этапа настолько малы, что повреждения не выходят за границы отверстия, то на втором этапе главные режущие кромки срежут эти поврежденные слои и

сформируется отверстие без расслаиваний [23]. В противном случае после обработки в отверстии останутся эти повреждения.

Углепластики в большей степени, чем какие-либо другие ВПКМ, при одной и той же остаточной глубине склонны к расслоению вызванной критической осевой силой, несмотря даже на то, что величина  $G_k$  для углепластиков ниже. Это легко объясняется большей величиной модуля упругости армированных углепластиков.

Количество поврежденных слоев может быть определено сравнением фактической осевой силы резания [ $P_x$ ] с ее критическим значением для заданного количества слоев. При оценке возможности образования этого повреждения для заданных условий обработки можно руководствоваться следующим правилом: если на диаграмме «Сила – Остаточная глубина сверления» на выходе сверла кривая фактической силы проходит ниже кривой критической (предельной) осевой силы в области данного слоя, то расслаивание в нем не произойдет.

Если описанные ранее расслаивания возникают в наружных слоях ВПКМ, то межслоевые трещины имеют место только во внутренних слоях отверстий деталей из ВПКМ. Обычно, они начинаются под углом  $60^\circ$  к плоскости армирования. Трещина распространяется в этом направлении до достижения межслоевой границы.

На стенке отверстия межслоевые трещины возникают за счет накручивания волокон и деструкции смолы. Этот вид повреждения возникает в тех случаях, когда угол ориентации волокнистого наполнителя  $\theta$  близок к  $90^\circ$ .

Выделение теплоты в результате трения волокнистого наполнителя по инструменту и высокая температура резания может привести к термической деструкции вдоль стенок отверстия, которая способствует стеклованию матрицы реактопластов и оплавлению матрицы термопластов. Высокая температура может также повредить волокнистый наполнитель путем горения углеродных волокон. Высокая температура также способствуют налипанию

стружки на рабочие поверхности инструмента, что в свою очередь еще больше повышает температуру в зоне резания и усугубляет термическую деструкцию.

Следует дополнительно отметить, что при сверлении ВПКМ склонных к оплавлению и обгоранию поверхности вокруг отверстия [42, 8, 9]. Отверстия могут иметь поврежденную область вокруг кромок, где ухудшается устойчивость матрицы к термическому или механическому воздействию [10].

Основными причинами термической деструкции отверстий являются: чрезмерное тепловыделение и недостаточный отвод тепла, имеющий место при резании ВПКМ с неправильно подобранными параметрами инструмента и условиями обработки.

Предельная температура в значительной степени зависит от состава ВПКМ. Например, для углепластиков на основе эпоксидной смолы температура резания не должна превышать 400°. Использование СОТС позволяет уменьшить температуру обработки. Однако СОТС при резании ВПКМ может вызвать химическое повреждение отверстий. Химическое повреждение в конечном итоге приводит к отделению волокнистого наполнителя от матрицы с последующим образованием трещин и расслаиванием. Повреждающая активность СОТС зависит от ее типа и основы (водная или масляная основа), рН фактора (кислотный, щелочной или нейтральный), времени контакта с СОТС. При резании ВПКМ с СОТС может иметь место водное насыщение ВПКМ, что, как правило, сопровождается разрушением молекулярных связей между волокнистым наполнителем и матрицей.

### 1.5.3 Точность отверстий

Говоря о точности отверстий в деталях из ВПКМ, рассматривают: точность размеров (диаметров) отверстий (размерная точность), точность их формы и точность взаимного расположения.

Размерная точность отверстия в деталях из ВПКМ определяется двумя факторами: упругой деформацией технологической системы под действием сил

резания и упругим восстановлением обрабатываемого материала после обработки поверхности. Эти факторы при резании ВПКМ играют более значимую роль, чем при обработке большинства металлов.

Большое упругое восстановление обрабатываемого материала и вызванное этим уменьшение диаметра отверстий (усадка) является характерной особенностью сверления ВПКМ. Из-за малого модуля упругости ВПКМ силы, действующие со стороны инструмента на обработанную поверхность в момент ее формирования, приводят к ее значительной деформации. Вследствие последующего упругого восстановления возникает остаточная деформация поверхности отверстия и его диаметр, как правило, отличается от диаметра сверла (требуемого по чертежу или предполагаемого размера), что необходимо обязательно учитывать при назначении условий обработки и прогнозировании ее выходных параметров. На величину остаточной деформации влияют: инструментальный материал, геометрия инструмента, величина его износа (размерного), режим резания, свойства обрабатываемого ВПКМ, состав армированных волокон в нем и др.

Отверстия, изготовленные твердосплавными сверлами, как правило, имеют диаметр больше диаметра сверла, а быстрорежущими сверлами – меньше диаметра сверла [43]. В зависимости от марки ВПКМ уменьшение диаметра отверстия может достигать до 0.06мм. При сверлении ступенчатыми сверлами за счет уменьшения остаточной деформации обработанной поверхности после резания второй ступенью можно получить (при прочих равных условиях) меньшую остаточную деформацию отверстия, чем при сверлении с помощью стандартных спиральных сверл [44]. Уменьшение радиуса округления режущих кромок сверл также уменьшает остаточную деформацию отверстия.

При сверлении быстрорежущими сверлами на диаметр отверстия наибольшее влияние оказывает скорость резания, в то время как при сверлении твердосплавными – подача. Диаметр отверстия увеличивается с увеличением скорости резания и подачи, особенно при сверлении твердосплавными сверлами.

Увеличением диаметра отверстия при интенсивных режимах резания связано, как правило, с увеличением вибраций.

На точность отверстий также существенное влияние оказывает износ инструмента. Диаметр изготавливаемого отверстия будет тем меньше, чем больше размерный износ инструмента независимо от инструментального материала сверл. Наибольшее влияние на точность отверстия оказывает износ вершин лезвий в месте сопряжения с ленточкой, сопровождающийся уменьшением диаметра сверла, и, следовательно, диаметра отверстия [26, 23].

Биение шпинделя и биение главных режущих кромок сверла чаще всего приводит к увеличению диаметра отверстия. Размер отверстия при сверлении твердосплавными сверлами очень чувствителен также и к биению поперечной режущей кромки.

Остаточная деформация отверстия в значительной мере зависит от состава и свойств композиционного материала. Сверление некоторых ВПКМ возможно и без остаточной деформации. При сверлении твердосплавным сверлом тканевого стеклопластика с высоким содержанием волокон, заметная остаточная деформация не возникает, так как тканевая основа препятствует изгибу волокон и уменьшает упругое восстановление обработанной поверхности.

При формировании отверстий в ВПКМ осевым инструментом форма отверстий искажается как в поперечном (отклонение от круглости), так и в продольном (отклонение от цилиндричности) сечениях. Такая погрешность формы иногда может превосходить допуск размеров отверстия.

Отклонение от круглости возникает в результате неравномерного упругого восстановления обрабатываемого материала вдоль образующей отверстия, что, как правило, вызвано анизотропией свойств ВПКМ [45]. Действительно, во время сверления ориентация режущей кромки инструмента относительно волокон постоянно изменяется. Угол между направлением волокна и режущей кромкой последовательно увеличивается от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Волокна сначала сжимаются, затем изгибаются и затем растягиваются. За один оборот



инструмента цикл повторяется два раза. Упругое восстановление волокон, подверженных изгибу, меньше, чем волокон, подверженных растяжению–сжатию. Поэтому отверстие приобретает форму эллипса. Описанный механизм проявляется при обработке отверстий не только в однонаправленных, но и при обработке разнонаправленных ВПКМ, хотя основная ось эллипса может иметь различную ориентацию в зависимости от толщины однонаправленных слоев в листе [37, 28]. Увод оси сверла под действием неравномерных на режущих кромках радиальных сил резания дополнительно способствует формированию отклонения от цилиндричности отверстий.

Погрешность формы и взаимного расположения зависит от обрабатываемого материала, режима резания, материала и геометрии режущего инструмента, а также его износа.

Сверла из быстрорежущей стали формируют отверстия с большим отклонением от круглости, чем твердосплавные сверла. Например, отклонение от круглости при использовании сверла из быстрорежущей стали после сверления 1000 отверстий может достигать 100 мкм, тогда как максимальная величина отклонения от круглости после сверления 24000 отверстий твердосплавным инструментом без покрытия в тех же условиях не превышает 70 мкм.

На форму отверстий превалирующее влияние оказывает режим резания. Однако влияние скорости резания и подачи не однозначно. В одних условиях с увеличением скорости резания и подачи погрешности формы увеличиваются, в других – могут уменьшаться. Снижение погрешности формы отверстия с увеличением скорости резания наблюдается только для сверл достаточно большого диаметра при малых подачах. Снижение погрешности формы отверстия с увеличением подачи возникает при средних скоростях резания. Для твердосплавных сверл существует некоторая область режимов резания, в которой погрешность формы минимальна.

### 1.5.4 Микрорельеф поверхности

Микрорельеф поверхности отверстий в ВПКМ традиционно оценивается стандартными параметрами шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$  и др. Вместе с тем, эти показатели корректны, когда ворсистость поверхности имеет приемлемый для регистрации микрорельефа уровень [181, 23]. Следует также учитывать, что измерения параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  в соответствии с действующими стандартами выполняется на достаточно малой базовой длине и это не позволяет оценить состояние поверхности в различных слоях листового ВПКМ. Поэтому параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  являются информативными показателями качества поверхностей отверстий в деталях из ВПКМ только в ограниченных случаях [181, 46, 23, 37].

Микрорельеф поверхности при обработке отверстий в ВПКМ в значительной мере зависит от ориентации режущей кромки инструмента относительно волокон и угла ориентации волокон  $\theta$  в главной секущей плоскости. Более низкая шероховатость получается при резании с  $\theta \rightarrow 0^\circ$ , поскольку волокна в этом случае срезаются целиком. Изменение шероховатости при изменении положения режущей кромки связано с изменением режима нагружения волокон при вращении инструмента, из-за последовательного чередования процессов: сжатия, среза, изгиба и вытягивания. Максимальные значения шероховатости получаются при угле между направлением волокна относительно режущей кромки по одним данным составляет  $135^\circ$  и  $315^\circ$  [47], по другим  $-30^\circ$  [23] или даже меньшим значением [43]. Шероховатость поверхности во многом зависит от обрабатываемого материала, конструкции сверла и режима резания. Исследования показывают, что при сверлении углепластика даже с малыми подачами ( $s=0.05$  мм/об) шероховатость поверхности находится в пределах  $R_a = 1.2 - 5.8$  мкм [48, 49], что значительно больше, чем при обработке заготовок из металлов. Например, шероховатость поверхности отверстий в пластинах из титанового сплава, при прочих равных условиях, находится в пределах  $R_a = 0.48 - 2$  мкм [43]. У

отверстий, просверленных в углепластиках быстрорежущими спиральными сверлами с нормальной заточкой, шероховатость больше, чем у отверстий, просверленных теми же сверлами в стеклопластиках и гибридных КМ. Применение спиральных сверл с острием понижает шероховатость отверстий в углепластиках, но повышает в стеклопластиках.

Из всех элементов режима резания подача является главным фактором, влияющим на микрорельеф обработанной поверхности ВПКМ, поскольку большая часть микронеровностей поверхности обуславливается геометрической составляющей. Шероховатость поверхностей отверстий в деталях из ВПКМ увеличивается с увеличением подачи и уменьшается с увеличением скорости резания. С другой стороны, из – за низкой удельной теплопроводности ВПКМ шероховатость поверхности может увеличиваться с увеличением скорости резания и уменьшением подачи, так как повышается температура. Предельное значение скорости резания из этих соображений для углепластиков составляет около 80 – 85 м/мин. Надо также принимать во внимание то, что увеличение скорости резания и подачи способствует увеличению амплитуды вибраций и, следовательно, и увеличению шероховатости поверхности.

Объемная доля волокон также влияет на шероховатость обработанной поверхности. Увеличение объемного содержания волокон приводит к повышению жесткости ВПКМ, более высокой удельной теплопроводности и более высокой температуре стеклования. В связи с этим объемная доля волокон изменяет характер влияния подачи на микрорельеф обработанной поверхности: при сверлении ВПКМ с низкой объемной долей волокон шероховатость возрастает с уменьшением подачи, и наоборот, при сверлении ВПКМ с высокой объемной долей волокон – с увеличением подачи.

Охлаждение также оказывает влияние на микрорельеф поверхности. Существенно более низкие значения шероховатости можно получить при криогенном охлаждении независимо от геометрии сверла, так как низкая температура значительно увеличивает жесткость матрицы и уменьшает внутренние напряжения в поверхности, вызванные разностью между

коэффициентами теплового расширения матрицы и армирующего волокнистого наполнителя.

При резании ВПКМ существует их склонность к вытягиванию волокон, что в конечном итоге приводит к увеличению глубины резания. Это явление проявляется и на микрорельефе поверхности в виде вырывов (сколов) в отдельных слоях, особенно при резании многослойных ВПКМ. Более глубокие области вытягивания волокон наблюдаются в слоях с углом ориентации волокон  $45^\circ$  и  $90^\circ$  в отверстиях, обработанных сверлами из быстрорежущей стали, поскольку крутящий момент при сверлении сверлами из быстрорежущей стали на 40 % больше, чем при резании твердосплавными сверлами. В отверстиях, выполненных твердосплавными сверлами, в слоях с ориентацией волокон  $45^\circ$  вытягивание волокон отсутствует. Глубина вытягивания волокон зависит также и от подачи. При сверлении с большими подачами высота микрорельефа увеличивается, поскольку режущие кромки вместо того, чтобы срезать волокна, их вытягивают, обуславливая повышенную ворсистость поверхности.

## **1.6 Качество отверстий в смешанных пакетах**

Обработка отверстий в смешанных пакетах значительно более сложная, чем однородных пакетов из ВПКМ. Ухудшают качество поверхности отверстий в смешанных пакетах движение горячей металлической стружки по отверстию, повышенная температура металлических слоев при их обработке, нарост на режущих кромках, повышенный износ инструмента, расслаивание волокон и их распушивание между слоями пакета, а также образование в металлических слоях заусенцев на выходе и между слоями [43, 44]. Различное упругое восстановление обрабатываемых материалов пакета усложняет формирование точных отверстий.

Воздействие металлической стружки (алюминиевой или титановой) на поверхность формируемого в ВПКМ отверстия возникает при ее движении по стружечным канавкам сверла. Горячая стружка в виде непрерывной ленты при

контакте с обработанной поверхностью может повреждать волокна и матрицу, вызывая увеличение размера и ее повреждение, а, следовательно, и увеличение ее шероховатости. Увеличение подачи при сверлении металлического слоя приводит к увеличению повреждений поверхности в слое ВПКМ. Такие повреждения в слое углепластика в результате воздействия титановой стружки. Глубина повреждений в этом случае приблизительно равна 300 мкм [44].

При сверлении пакетов ВПКМ/металл может наблюдаться явление обратного подрезания. Это эффект заключается в том, что металлическая стружка (алюминиевая или титановая), перемещаясь по стружечным канавкам сверла, оказывает абразивное воздействие на обработанную металлическую поверхность отверстия и матрицу ВПКМ, провоцируя повреждения отверстия и увеличение его размера.

Вредное воздействие металлической стружки, ухудшающее качество поверхности формируемого в ВПКМ отверстия, может быть уменьшено за счет:

1. Устранения всех зазоров в технологической системе с целью повышения жесткости и уменьшения вероятности возникновения вибраций;
2. Использования рациональной геометрии сверла, обеспечивающей надежное дробление стружки;
3. Выбора оптимальной скорости резания и подачи;
4. Обеспечения надежности закрепления пакета;
5. Применения операции развертывания отверстия после сверления;
6. Периодического вывода сверла из отверстия, обеспечивая удаление стружки без ее пакетирования.

Термическое воздействие на слои ВПКМ со стороны металлических слоев в большей степени проявляется при сверлении быстрорежущими сверлами. Оно проявляется в виде колец термических и механических повреждений вокруг отверстия на входе и выходе сверла в сои из ВПКМ, а также в виде вытягивания волокон из-за перегрева матрицы ВПКМ в результате локального увеличения температуры резания при обработке отверстия в металлическом слое. Кроме того, в последнем на выходе слое из

ВПКМ может наблюдаться расслаивание. Диаметр колец повреждения увеличивается с возрастанием скорости резания и износа сверл, но уменьшается с увеличением подачи. Увеличение подачи хоть и увеличивает количество теплоты, выделяющейся в процессе резания как ВПКМ, так и металлического слоя, но при этом уменьшает время контакта между инструментом и заготовкой. Влияние второго фактора в большинстве случаев оказывается более сильным, чем первого, что сопровождается уменьшением температуры в системе, а, следовательно, и уменьшением повреждаемости изготавливаемого отверстия. Использование твердосплавного инструмента уменьшает термические повреждения в слое из ВПКМ в сравнении с применением инструмента из быстрорежущей стали.

Формирование точных отверстий в смешанных пакетах сопряжено со значительными трудностями из-за различного модуля упругости материалов пакета. Такие свойства обуславливают различные величины упругого восстановления обработанной поверхности и, следовательно, различные отклонения размера вдоль всего отверстия. Например, при сверлении спиральным сверлом с нормальной заточкой из – за малого модуля упругости ВПКМ диаметр отверстия в слое ВПКМ значительно меньше по сравнению с диаметрами отверстия в металлическом слое.

Диаметром отверстий в слоях смешанных пакетов можно управлять путем применения сверл специальных конструкций, покрытий, охлаждения и т.п. Так, при сверлении отверстий в пакетах «углепластик – алюминиевый сплав» применение покрытия  $TiV_2$  и минимального охлаждения позволяет уменьшить отклонение диаметра отверстий в различных слоях смешанного пакета до 20 мкм.

В целом, применение сверл специальной конструкции, оптимальных режимов резания и инструментальных материалов, а также жесткой технологической системы позволяет в 2–3 раза повысить размерную точность отверстий и обеспечить формирование отверстий с точностью вплоть до 8 качества путем сверления без последующих чистовых операций. Например, в ходе

сверления 100 отверстий диаметром 8мм сверлом модели Prisco 86 PT с помощью машины Quackenbush 15QDA в смешанном пакете рассеивание диаметра отверстий не превышало 30 мкм, в том числе и по всей (суммарной) толщине пакета, состоявшего в данном случае из листа углепластика толщиной 12,7мм и листа из титанового сплава толщиной 9.5 мм. Частота вращения сверла составляла  $n=500$  об/мин, подача  $S=0.05$  мм/об. Обработка производилась с использованием техники минимальной смазки [50]. В нежестких технологических системах или при применении ручного инструмента достигнуть столь высокой точности отверстия значительно сложнее и требуется при этом, как правило, нескольких технологических переходов.

Интересно, что при формировании отверстий в смешанных пакетах методом винтового фрезерования диаметр отверстий в слоях ВПКМ оказывается больше, чем в слоях металла. Это связано с меньшей деформацией инструмента под действием радиальной проекции силы резания в слоях ВПКМ по сравнению со слоями металла.

Шероховатость поверхности в металлических слоях меньше, чем в слоях из ВПКМ, что связано с изотропией металлов. Влияние режима резания на шероховатость поверхности в металлических слоях меньше, чем на шероховатость поверхности в слоях из ВПКМ.

Если процесс формирования отверстия в смешанном пакете начинать со сверления слоя из ВПКМ, то можно значительно уменьшить расслаивание его наружных слоев у поверхности выхода сверла, используя металлический слой как опорную пластину [49, 48].

При сверлении пакетов «ВПКМ – металл» возможно распушивание волокнистого наполнителя ВПКМ и накопление стружки между его волокнами [51]. Считается, что эти виды повреждений являются неизбежным последствием обработки отверстий в пакетах. Распушивание волокнистого наполнителя и накопление стружки между волокнами и деталями смешанного пакета может привести к некачественной сборке узла и ускоренному износу деталей собираемого соединения. Поэтому детали смешанного пакета после

обработки отверстий должны быть обязательно разъединены и очищены от металлической стружки, заусенцев и загрязнений.

Заусенец при обработке смешанного пакета формируется в металлическом слое. На выходе сверла из металлического листа, его выходная поверхность нагревается, и пластичность выходного слоя повышается, что способствует более легкому течению обрабатываемого материала и, как следствие, формированию заусенца. В общем, формирование заусенца зависит от осевой силы, температуры резания и температуры, вызванной трением стружки и ленточек (вспомогательных режущих кромок) сверла при сверлении с высокой скоростью и/или малой подачей, износа режущих кромок и радиуса их округления. Описанные изменения геометрии инструмента увеличивают осевую силу. При работе изношенным сверлом на выходе сверла из металлического листа режущие кромки не режут, а «давят» на материал, создавая при этом заусенец практически по всему периметру отверстия.

Об этом свидетельствуют и большие высоты заусенцев, особенно при высоких скоростях резания и малых подачах при повышенном и быстром износе сверл из быстрорежущей стали.

Размер заусенца зависит также и от режимов резания. Скорость резания и подача оказывают значительное влияние на высоту заусенцев на выходе сверла из заготовки. Высота заусенцев на выходе возрастает с увеличением скорости резания и уменьшением подачи. При большой скорости резания заусенец приобретает неровные края.

При сверлении отверстий в смешанных пакетах быстрорежущими сверлами размеры заусенца увеличиваются с каждым последующим просверленным отверстием со скоростью 0.1–0.2 мм/об. Высота заусенца уже на первом отверстии может составлять 0.9 мм. При обработке твердосплавными сверлами износ незначителен и, следовательно, высота заусенца намного меньше. При сверлении смешанных пакетов твердосплавными сверлами формируются входные заусенцы, высота которых практически не изменяется с увеличением количества посверленных отверстий.



Если обработка отверстия в смешанном пакете начинается с металлического слоя, то на поверхности раздела слоев «металл – ВПКМ» остается «выступающий» материал, часто из закаленного металла, который называется межслойным заусенцем.

Такой заусенец может иметь место при сверлении и пакетов «металл – металл», например, Ti/Al. Процесс образования межслойного заусенца, как правило, сопровождается расслаиванием, короблением и другими повреждениями. При отсутствии соответствующего сжатия слоев под действием осевой силы, действующей со стороны сверла, нижний слой пакета деформируется и образуется зазор между слоями. Зазор обеспечивает пространство для формирования заусенца на поверхности раздела двух соседних слоев пакета. С увеличением силы сжатия слоев высота межслойного заусенца и толщина его корня уменьшаются.

Высота заусенца промежуточного слоя хоть и зависит от износа сверла, но все-таки в значительно меньшей степени, чем от других факторов. Размеры межслойного заусенца промежуточного слоя можно значительно уменьшить за счет применения ступенчатого сверла, обеспечив удаление второй ступенью сверла заусенцев, сформированных первой ступенью.

## **1.7 Общие требования к качеству отверстий**

Важнейшим показателем качества отверстий является их размерная точность, которая должна обеспечить необходимый характер посадки в механическом соединении и гарантировать работоспособность соединения в целом. Несмотря на преобладание в соединениях деталей ВПКМ и смешанных пакетов посадок с зазором, диаметральный допуск отверстий в этих соединениях достаточно жесткий, особенно для болтовых соединений. Его величина и определяется: видом соединения, количеством отверстий, расстоянием между ними и материалом соединяемых деталей.

Для заклепочных соединений деталей из ВПКМ и смешанных пакетов диаметральный допуск может достигать 250 мкм. По данным справочника заклепочное соединение с большим числом часто расположенных отверстий в ВПКМ и смешанных пакетах (приблизительно каждые 40 мм) требует выполнения отверстий с диаметральной допуском  $\pm 25-75$  мкм. Одним европейским производителем авиационной техники применяется посадка H10/f7, что для отверстия 8 мм обеспечивает зазор в пределах 13–86 мкм. Исследования соединений  $\varnothing 3.18$  и  $\varnothing 6.35$  мм показали, что только в 4% случаев увеличение зазора от 76 до 279 мкм приводит к 30% уменьшению усталостной прочности соединения. По мнению DiNicola и Fantle DiNicola and Fantle of United Technologies–Sikorsky Aircraft зазор в 160 мкм является максимально допустимым зазором при изготовлении заклепочных соединений деталей из ВПКМ.

Значительно более жесткий допуск необходим для отверстий болтового соединения. Количество болтов, расстояние между ними и зазор в соединении взаимосвязаны и в совокупности оказывают существенное влияние на прочность на смятие в соединениях с несколькими болтами. Исследования показали, что предел прочности на смятие соединения с одним болтом зависит только от диаметра отверстия и не зависит от характера посадки. По данным Y. Amit увеличение зазора уменьшает площадь контакта между болтом и отверстием, увеличивая уровень напряжений в этой зоне. На практике допуск диаметра отверстия болтового соединения в узлах крыльев и хвоста самолета с применением ВПКМ может составлять 30 мкм и меньше. По данным компании Sandvik Coromant допуск отверстий болтового соединения в пакетах из ВПКМ может составлять  $\pm 20-40$  мкм.

С другой стороны известны работы, которые экспериментально доказано, что малые зазоры также снижают несущую способность соединения деталей из ВПКМ.

Так в работах исследовались болтовые соединения пакетов, включающих ВПКМ, с зазорами от 0 до 240 мкм. Большие зазоры (от 240 мкм и более)

приводят к потере жесткости болтового соединения со многими болтами в результате неравномерного нагружения и повреждения отдельных отверстий с последующим их разрушением. Преждевременное разрушение происходит также и при малых зазорах, но в результате нарушения целостности болтов из-за неравномерного их нагружения. Поэтому для соединений диаметром 8 мм зазоры от 80 до 160 мкм являются наиболее приемлемыми.

В силу особенностей соединений в конструкциях самолета соосность отверстий соединяемых деталей достигается совместной обработкой отверстий в пакете или регулировкой компенсаторами. Операция регулировки является одной из самых дорогостоящих при изготовлении планера самолета. Детали, изготовленные из ВПКМ, требуют значительно большего количества регулировок по сравнению с подобными элементами, изготовленными из металлов. Это вызвано двумя основными причинами:

1. Точность деталей из ВПКМ ниже, чем металлических из-за вариации толщин листов из ВПКМ, связанной с незначительными изменениями в сложном составе смолы, вариации в предварительно пропитанном волокнистом наполнителе и удалении остатков смолы во время изготовления;
2. ВПКМ плохо переносят сжатие из – за большого модуля упругости и низкой пластичности.

При работе с толстыми листами из ВПКМ к уже упомянутым проблемам добавляется еще и расслаивание.

В реальных производственных условиях в процессе изготовления возможно возникновение различных повреждений отверстий. Некоторые экспериментальные исследования для пластин из стеклопластика, например, V. Tagliaferri и др. позволили выявить, что прочность на растяжение пластин с отверстием не зависит от степени повреждения отверстия, в том числе и на его кромке, а прочность на смятие зависит от степени повреждения, но только тогда, когда это повреждение является очень большим. Более того, образцы с дефектами, вызванными механической обработкой отверстий имеют всего

лишь несколько меньшие значения сопротивления усталости, чем образцы без дефектов. E. Persson и др. показали, что образцы, в которых отверстия выполнены сверлами в виде трехгранной пирамиды и спиральными сверлами с покрытием из поликристаллического алмаза (ПКА), имеют на 8–10% меньшую усталостную прочность и на 2–11% меньшую статическую прочность по сравнению с образцами, отверстия в которых выполнены спиральным фрезерованием, обеспечивающим меньшее расслаивание.

Наконец, незначительное влияние подачи, скорости резания и других условий резания на прочность на смятие образцов из углепластика, установленное в работе [37], также доказывает положение о малой чувствительности прочности деталей из ВПКМ к повреждениям отверстий. Вместе с тем, повреждения отверстий стараются не допускать. Обычно считается, что характерный размер повреждения не должен превышать 0,76 мм. Если же размер повреждения больше этой величины, то в зависимости от диаметра отверстия, вида соединения и служебного назначения детали принимается решение о его устранении. Повреждения с размерами в пределах от 0,76 до 2,54 мм считаются исправимым браком и исправляются без изменения диаметра отверстия.

Повреждения с размерами свыше 2,54 мм исправляются увеличением диаметра отверстия или другим способом, приемлемым для данной конструкции [52].

Проверка качества отверстий выполняется визуально или при помощи специальных средств измерений: калибры, нутромеры, кругломеры [52]. В силу того, что размерная точность отверстия в зоне раздела материалов, отличается от размерной точности отверстия в каждом из обрабатываемых материалов в отдельности, контроль отверстий, изготовленных в смешанных пакетах, осуществляется внутри слоев и на их границах.

В лабораторных условиях для выявления вида повреждения отверстия кроме визуального осмотра используются методы ультразвуковой дефектоскопии, радиографии и рентгеновской томографии. Следует отметить,

что эти методы не применимы для сравнения зон повреждения в пакетах из различных ВПКМ, имеющих, как правило, различные коэффициенты рассеивания. Кроме того, образец не может использоваться для механических испытаний повторно, поскольку поглощение жидкостей, применяемых для проявления повреждений, значительно снижает механические свойства ВПКМ.

## 1.8 Выводы

По результатам анализа литературных источников отечественных и зарубежных авторов удалось доказательно установить, что за последние 20 лет доля использования ВПКМ в авиации, энергетике и машиностроении существенно выросло.

Наиболее перспективным направлениям использования ВПКМ и пакетов с их применением по-прежнему остается авиация. Однако в использовании ВПКМ при изготовлении высоко нагруженных зубчатых колес также скрывается существенный потенциал для технологического скачка. К достоинствам использования ВПКМ в машиностроении следует отнести технологичность, существенное снижение массы при высоких прочностных характеристиках изделий, экологичность. Основными сдерживающими факторами препятствующими более стремительное распространение ВПКМ при изготовлении зубчатых колес являются изменение размеров рабочих поверхностей колес связанное с усадкой полимерной составляющей ВПКМ, сложность обеспечения качества и точности поверхности изделия после механической обработки.

Основными технологическими проблемами, которые возникают в процессе сверления пакетов ВПКМ/Металл являются трудности с обеспечением требуемого качества поверхностного слоя отверстия, повышенный износ режущего инструмента, сложность сочетания разных режимов обработки материалов пакета в одном цикле.

Не смотря на теоретически высокие эксплуатационные свойства ВПКМ, в конечном итоге, имеют существенно заниженные эксплуатационные характеристики, обработанных резанием поверхностей. Снижение эксплуатационных характеристик обусловлено часто неудовлетворительным качеством обработанной поверхности и состоянием поверхностного слоя. Сложность обеспечения их состояния на требуемом уровне является одной из основных особенностей ВПК и одной из основных проблем [127, 137]. Имея гетерогенную структуру с ярко выраженной анизотропией свойств, характеризующуюся в ряде случаев низкой адгезионной связью между матрицей и наполнителем, способную разрушаться под действием механических факторов, ВПКМ разрушаясь при резании вдоль поверхностей раздела композитов, образует специфические дефекты: расслоение и наличие выступающих над обработанной поверхностью не срезанных волокон.

Из-за дефектности поверхностного слоя сложно добиться требуемой низкой шероховатости обработанной поверхности, измерение которой, достоверно затруднено из-за вышеназванных причин.

Одним из существенных лимитирующих факторов повышения интенсивности механической обработки ВПКМ является их низкая теплостойкость, ограниченная 150-300°C, что тем более пагубно сказывается на качестве отверстий при обработке пакетов ВПКМ/Металл, так как известно, что температура в зоне резания может колебаться от 350-900°C в случае трудно обрабатываемых материалов, например, титановых сплавов. При температурах, выше указанных, происходит деструкция эпоксидной смолы и как следствие снижение механической прочности, твёрдости обработанной поверхности, сопротивление истиранию, влагопоглощение, диэлектрические показатели эксплуатационных характеристик отверстия.

Второй, не менее важной проблемой является низкая стойкость режущих инструментов при сверлении пакетов ВПКМ/Металл, что связано с абразивным воздействием наполнителя (стеклянные, углеродные, борные волокна), как следствие попадания в зону резания продуктов износа, диспергированного

наполнителя, связующего и, следовательно, к интенсификации износа режущего инструмента.

Для процесса сверления отверстий в пакетах ВПКМ/металл характерно наличие противоречивых условий оптимальных режимов резания различных материалов в одном процессе. Так для обеспечения требуемой стойкости режущего инструмента и качества поверхности при сверлении слоя ВПКМ необходимы высокая скорость резания  $V=20-150$  м/мин и малая подача  $S<0,05$  мм/об, в то время как для обеспечения требуемой стойкости режущего инструмента и качества поверхности при сверлении, например, слоя титанового сплава необходимы низкая скорость резания и большая подача.

Осевая сила и крутящий момент максимальны при прохождении сверла через металлический слой. Величина осевой силы и крутящего момента при сверлении металлического слоя, как правило, в 2-3 раза больше, чем при сверлении слоя ВПКМ.

При сверлении смешанных пакетов ВПКМ/металл величина расслаивания определяется режимами резания, величиной износа инструмента, его геометрическими параметрами и конструкцией, матрицей и формой армирования.

Существенное влияние на расслаивание ВПКМ оказывает износ поперечной режущей кромки, который приводит к повышению  $P_x$ . Из геометрических параметров сверла наибольшее влияние на расслаивание оказывает угол при вершине  $2\varphi$ .

Качество отверстий в деталях из ВПКМ в значительной мере определяет срок службы всего соединения. не только традиционными показателями – размерная точность и шероховатость поверхности, – но и дополнительными, определяющими повреждения отверстий – вид повреждения, диаметр зоны повреждения, характерный размер повреждения. Характерными видами повреждений поверхности отверстий в ВПКМ являются: расслаивание, сколы кромок отверстий, вытягивание волокон, межслоевые трещины, термическая деструкция, распушивание волокон.

Наличие металлических слоев в смешанных пакетах усложняет выполнение отверстий заданного качества по всей толщине пакета из-за термического и механического воздействия стружки на поверхность отверстий в слое из ВПКМ, а также образования заусенцев в металлических слоях.

Перечисленные причины и особенности обработки пакетов ВПКМ/Металл, как уже отмечалось выше показывают, что простой перенос закономерностей процесса резания металлов на эти материалы некорректен. В этой связи насущной является необходимость искать научно-обоснованные решения изложенных проблем, пути, связанные с минимизацией воздействия вышеизложенных причин.



## **2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **2.1 Общая методика исследования**

Для достижения поставленной цели исследования и решения сформулированных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования.

Изучение физических явлений, сопровождающих процесс резания, в частности измерение температурного поля в зоне резания, проводилось с использованием фундаментальных положений теории резания материалов, теории упругости и механики разрушения анизотропных материалов с применением методов моделирования.

Реализация экспериментальных исследований, направленных на изучение процесса механической обработки ВПКМ и пакета ВПКМ/ Металл сопровождалась несколькими этапами.

Первый включал: методологическую подготовку экспериментальных исследований, создание концепта для измерения температуры в зоне резания, составление плана эксперимента, изготовление образцов, проведение поисковых экспериментов. Создание концепта предполагало: размещение термоэлектрода по задней поверхности сверла, - сборку и монтаж радиотехнического оборудования для снятия и передачи данных о значении температурного поля в зоне резания. Измерения проводились методом термопары. Термоэлектроды были размещены в сверле и образовывали искусственной термопару. Передача данных осуществлялась по средствам цифрового сигнала, что уменьшило искажения получаемых данных. Сбор данных выполнялся при помощи аналого - цифрового преобразователя, а их обработка на компьютере с необходимым программным обеспечением.

Второй этап заключался в экспериментальном определении физико - механической свойств ВПКМ, с целью создания адекватной конечно-

элементной модели процесса механической обработки композиционного материала.

Третий этап предусматривал проведение модельного эксперимента и анализ напряженно - деформируемых состояний на режущей кромке инструмента методом конечных элементов. Реализация этого этапа сопровождалась созданием поисковой и основной моделей механической обработки. Создание поисковой модели было направлено на отработку технологии создания конечно- элементных моделей ВПКМ и процесса их механической обработки, реализации основной модели была направлена на устранение недостатков поисковой с расширением ее функциональных возможностей для прогнозирования характеристик процесса резания пакета ВПКМ/Металл.

Реализация четвертого этапа была сопряжена с проведением эксперимента по механической обработке ВПКМ с целью выявления влияния ориентации армирующей составляющей материала на качество обработанной поверхности, поисковый и основной эксперименты по сверлению пакета ВПКМ/Металл. Целью поискового эксперимента являлось наладка всех систем и приборов, для получения наиболее точных данных. Планирование экспериментальных исследований на этом этапе предполагается выполнять по методике ооднофакторного эксперимента. Согласно плану эксперимента планируется исследовать влияние подачи и скорости резания на температуру резания в зоне контакта ВПКМ и металл. В ходе эксперимента выходными данными процесса резания были осевая сила и температура. Силы резания измерять динамометром мод. УДМ-100. С целью исключения влияния режима обработки на осевую силу и температуру в зоне резания сверления отверстий выполнялось при постоянных режимах резания с неизменной скоростью и подачей, как в ВПКМ так и в металле. При повторной серии опытов была реализована механическая обработка образцов, на токарном и фрезерном станке, оценкой износа главной режущей кромки сверла. Эксперимент проводился при постоянных режимах

резания. При проведении эксперимента выполнялся хронометраж машинного времени.

В качестве критериев износа режущей кромки были использованы: фаска износа по задней поверхности, наличие сколов на режущей кромке. Качество отверстий оценивалось по шероховатости поверхности, размерной точности и отклонению от формы (цилиндричности). Для ВПКМ дополнительно: наличие следов термической деструкции, вытягивания волокон, расслоение, не срезанные волокна.

Точность измерений температуры в зоне резания определяется точностью нормирующего преобразователя, характеристикой резистора и разрядностью АЦП. Высокое качество компонентов измерительной системы обеспечивает малую погрешность измерения в пределах 0,1 %, что подтверждено актом метрологической проработки результатов НДР (Приложение В). Вместе с тем в связи с расположением термоэлектрода на некотором удалении от режущей кромки полученные значения температуры будут отличаться от значений непосредственно на режущей кромке, однако тенденции их изменения будут однозначно повторять изменения температуры резания.

### **2.1.1 Методика подготовки образцов**

Реализация намеченных целей и задача подразумевает создание большого количества образцов. Условно, их можно разделить на две группы: образцы для механической обработки и образцы для исследования физико-механических свойств. Первые также можно разделить на образцы ВПКМ и образцы пакета ВПКМ/Металл. Изготовление каждого из выше описанных типов подразумевает использование различных технологий формовки и подготовки образцов.

Как известно из теории и практики проведения экспериментальных исследований на результат могут влиять различные факторы. Задача заключалась в том, что бы исключить воздействие нежелательных факторов, например

окружающей среды, а ограничить область исследования интересующими нас факторами. Особый интерес представляли угол ориентации волокон в ВПКМ –  $\theta$  и угол ориентации образца относительно режущей кромки инструмента -  $\eta$ . И если исследованием угла ориентации волокон в ВПКМ ученые занимались уже давно, то влияние угла ориентации режущей кромки относительно исследуемого образца не исследовалось. Исследование этих углов проводилось путем прямоугольного резания образца ВПКМ с различной ориентацией волокон. На рис. 2.1 показана схема контакта инструмента и обрабатываемого образца. На рисунке показаны основные схемы резания ВПКМ, рассмотренные в ходе экспериментальных исследований.

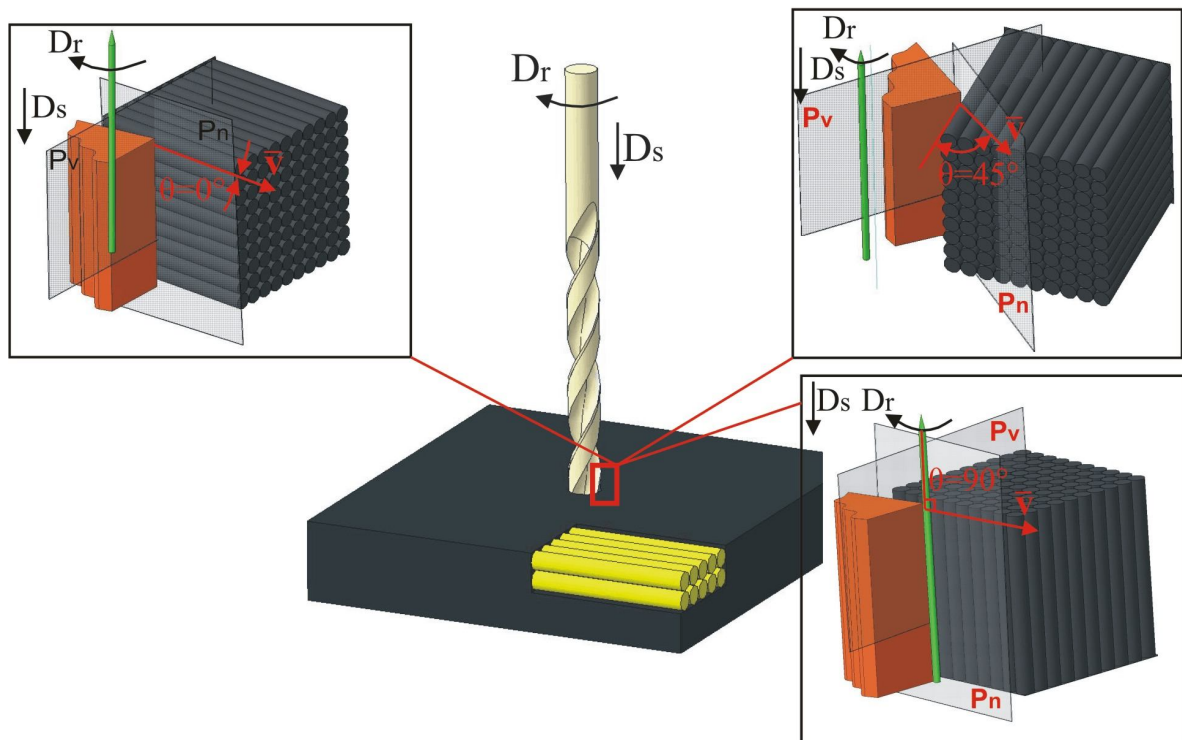


Рисунок 2.1 – Углы приложения режущего инструмента к исследуемому образцу

Для сверления пакета ВПКМ/Металл были использованы прямоугольные пластины и цилиндрические образцы

Прямоугольные образцы пакета ВПКМ/ Металл состояли из 5 мм шлифованных листов стали с одной сторон которого приформован ВПКМ, в нашем случае углепластик, также имеющий толщину пять миллиметров габаритные размеры 40мм на 90мм (рис.2.2).

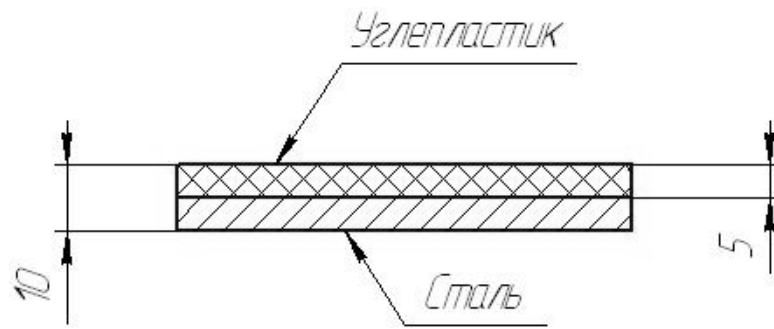


Рисунок 2.2 – Образец ВПКМ/ Металл

Учитывая некоторые ограничения методики измерения температурного поля при сверлении пакета (см. п. 2.1.4), был изготовлен еще одна разновидность образца для сверления контрольных отверстий (рис. 2.3). Эти образцы предназначены для проведения опытов на токарном станке с измерением температуры и осевой силы.

При создании образцов этого типа была использована техника послойной укладки.

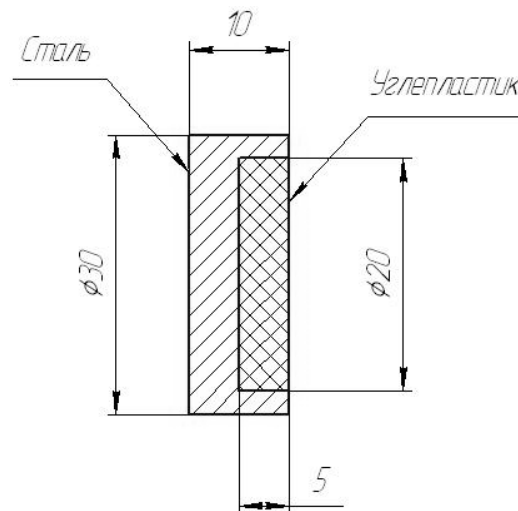


Рисунок 2.3 - Контрольный образец

Вторым типом образцов использованных в исследовании были образцы согласно ГОСТ 11262-80, ГОСТ 4651-82. Эти образцы были подготовлены для испытаний на растяжение и сжатие эпоксидной смолы.

## 2.1.2 Технология формовки образцов

Объектом исследования были образцы полимерного композиционного материала, состоящий из волокнистого наполнителя и матрицы. В качестве волокнистого наполнителя выступает углеродные волокна, а матрица представлена в виде эпоксидной смолы марки ЭД-20 ГОСТ 10587-84. Обрабатываемые образцы изготавливались путем соединения ленты однонаправленного углеродного волокна плотностью  $40\text{г/м}^2$  с эпоксидной смолой марки ЭД-20. Основные составляющие композиционного материала представлены на рис. 2.4



Рисунок 2.4 – Компоненты для изготовления образцов

Как наполнитель применялась смола эпоксидная. При укладку волокон проводился предварительный нагрев форм до температуры  $40^{\circ}\text{C}$ , с целью улучшения смачивания волокна эпоксидной смолой. Было изготовлено 4 образца с различными углами направленности волокнистого наполнителя. Исходя из этого, использовалось четыре основных схемы укладки волокна, а именно  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  и  $135^{\circ}$ . Перед закладкой волокнистого наполнителя форма и пуансон обильно смазываются специальным разделяющим раствором (разделителем). Разделитель формирует на поверхностях, контактирующих с эпоксидной смолой слой, который препятствует схватыванию формы и

эпоксидной смолы. При закладке образцов каждый слой волокнистого наполнителя смачивался отдельно. После пропитки слоя в эпоксидной смоле излишки удалялись путем механического воздействия пальцами рук. Очищенный от излишков смолы слой укладывался в емкость для формовки образца. Последовательное выполнение этих действий продолжалось до полного заполнения формы. С целью повышения качества образцов за счет повышения пропитывания волокон, удаления воздуха и излишков смолы, форма с уже уложенными слоями устанавливалась в станочные тиски. Удаления воздуха, излишков смолы и повышение смачивания волокнистого наполнителя и эпоксидной смолы происходило путем создания давления между содержимым формы и пуансоном. В станочных тисках по средствам ходового винта две губки тисков двигались навстречу друг другу так, что пуансон вдавливался в емкость с формируемым образцом (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Формовка образца

Процесс полного застывания образцов длился 24 часа. После чего образцы изымались из формы при помощи наставок. Наставки вставлялись в форму через технологические отверстия. Удаление образца из формы производилось механически. Полученные образцы подвергались термической обработке.

Термическая обработка образцов проводилась с целью искусственного старения. Термическая обработка композиционного материала позволяет существенно повысить его физические и прочностные свойства. Механизм искусственного старения заключается в повышении степени взаимодействия

волокнистого наполнителя и матрицы, улучшает проникновение матрицы в волокнистый наполнитель и повышает адгезионное взаимодействие компонентов углепластика. Термическая обработка производилась в муфельной печи ПМ-8 при температуре 80°C (см. рис. 2.6).

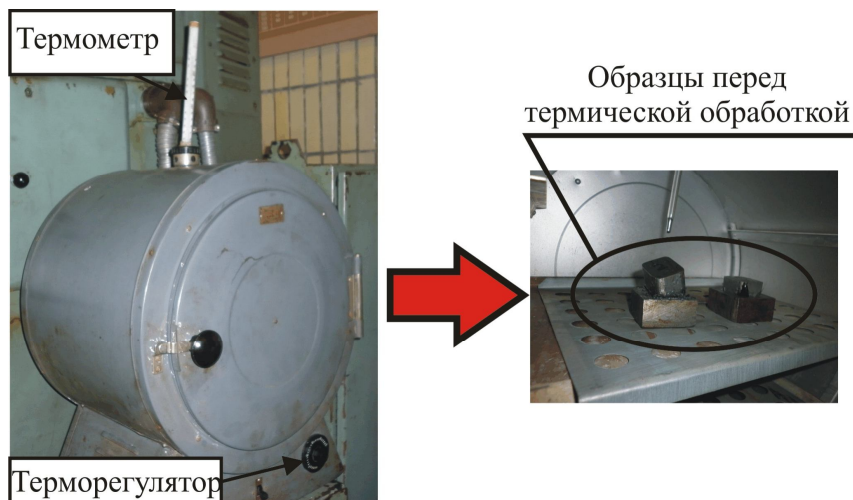


Рисунок 2.6– Термическая обработка образцов ВПКМ

Термическая обработка проводилась с соблюдением определенной последовательности действий. Нагрев образцов производился вместе с печью, с целью предотвращения растрескивания образца, которое могло быть спровоцировано резким перепадом температуры. Образцы размещались в печи, дверца герметично закрывалась, после чего производился нагрев до температуры 80°C. При данной температуре образцы выдерживались два часа, после чего, изымались из печи и охлаждались до комнатной температуры. Все образцы были подвергнуты термической обработке одновременно.

При изготовлении образцов пакета был применен метод низкотемпературной вакуумной формовки, позволяющий получить качественные образцы ВПКМ с низким содержанием эпоксидной смолы (рис. 2.7)





Рисунок 2.7 – Формовка образца ВПКМ/Металл

При создании пакета была применена однонаправленная лента углеродная конструкционная ЛУ-П/0,1 ГОСТ 28006-88 представляющая собой совокупность углеродных волокон диаметром 5-10 мкм, которая при низком удельном весе обладает очень высокой прочностью. Углеткани, как и углеродные волокна, характеризуются устойчивостью к воздействию большинства химически агрессивных реагентов, низким удельным весом и коэффициентом температурного расширения.

Применение однонаправленного волокна обусловлено необходимостью контроля ориентации волокон, при укладке образцов, слоя углетканы располагались под девяносто градусов друг относительно друга. Данный вариант был выбран исходя из проведенного литературного обзора, так как такая схема обеспечивает наивысшую прочность конструкций из углепластика.

В качестве матрицы для формовки пакета ВПКМ/Металл применялась эпоксидная смола Larit 285 жидкая, прозрачная, подходит для вакуумирования, ручной формовки. Соотношение смола - отвердитель по весу 100:40, по объему 100:50.

Основные характеристики:

- плотность: 1,13-1,17г/см<sup>3</sup>(при 25°С);

- вязкость: 700-900 мПа·с (при 25°С);

-эпоксидный эквивалент 168-185

Для приготовления смолы применялись весы с точностью измерения до 0.1 грамма, согласно описанному выше соотношению смешивалась смола, и отвердитель после чего смесь оставлялась на 5-10 минут для окончательного соединения компонентов, только после этого начиналась пропитка углеленты. Предварительно углелента нарезалась на части размером 100 мм на 50 мм в соответствии с направлением армирования волокон в образце. Проводилась пропитка каждого куска углеленты отдельно с последующей укладкой на стальную пластину описанную выше. При достижении необходимой толщины слоя углепластика который равен 6мм при укладке применялось около 60-и слоев углеткани. После укладки изделие помещалось в специальный вакуумный пакет представляющий собой герметичный пластиковый сосуд с расположенным внутри образцом и клапаном для подключения вакуумного шланга. Вакуум обеспечивался вакуумным насосом (рис.2.7).

Насос вакуумный пластинчато-роторный 2НВР 5ДМ предназначены для откачки из герметичных сосудов воздуха и неагрессивных к рабочей жидкости и материалам конструкции пожаро-взрывобезопасных нетоксичных газов, очищенных от капельной влаги и механических загрязнений, с содержанием кислорода не более, чем в воздухе (21% по объему) при нормальных условиях, от атмосферного давления до предельного остаточного, при давлении в выходном сечении, не превышающем атмосферное более, чем на 9,3 кПа (70 мм рт.ст.).

Технические характеристики:

- тип: насос вакуумный пластинчато-роторный.

- вид климатического исполнения насосов: УХЛ 4 по ГОСТ 15150-69, при температуре окружающего воздуха и откачиваемой среды от 283 до 308 К (от плюс 10 до плюс 35 С).

- питание электродвигателя: от сети с частотой 50 Гц, переменного тока напряжением 380 В.

- давление на входе: 0,133 (1) кПа (мм рт.ст.).

- быстрота действия в диапазоне давлений: на входе от атмосферного до 0,26 кПа (2мм рт.ст.):  $19^{+3,0 -2,0}$  ( $55^{+0,82 -0,55}$ ).



Рисунок 2.7 – Вакуумный насос 2НВР 5ДМ

При изготовлении всех типов образцов из композиционных материалов применялась термическая обработка. При формовании образцов из углепластика применялась печь с температурой нагрева до 200 С. Приготовленный образец размещенный в вакуумном пакете загружался в печь для нагрева, температура при которой проходила сушка образцов 60 С. Применялось два основных терморегима: предварительный нагрев до 80°С градусов и охлаждение с печью или постоянная температура 60 С в течении 6 часов вакуумирования (рис.2.8). Формование с применением вакуума использовалось для создания механического давления на композит во время цикла его производства. Давление, оказанное вакуумом

на композитный материал дает ряд преимуществ по сравнению с ручной формовкой:

- удаляет воздух попавший в между волокон и слоёв в композите;
- способствует лучшей пропитки композитного материала;
- оптимизирует отношение армирующего материала к смоле;

Эти преимущества позволили максимизировать физические свойства создаваемых композитных материалов.

Формование с применением вакуума оказывает давление на образец равное 0,1 МПа.



Рисунок 2.8 – Печь с подведенным вакуумом

Укладка слоев углеткани производилась в ручную для обеспечения необходимого направления армирования волокон в готовом композите. В контрольные образцы типа «цилиндр» укладывались вырезанные круги из углеткани предварительно пропитанные эпоксидной смолой. После чего образцы помещались в вакуумный пакет и загружались в печь до полной полимеризации смолы.

После полного застывания смолы образцы изымались из вакуумного пакета. Излишки углепластика обрезались при помощи абразивного круга. Образец металлической стороной устанавливался на плоскошлифовальный

станок и шлифовался до размера 10 мм, для обеспечения точности соотношения толщины углепластика и металла.



Рисунок 2.9 – Цилиндрический образец после формовки

Образцы для определения физико-механических свойств также изготавливались в условиях термической обработки (рис.2.10). Смола после приготовления заливалась на стальную пластину по предварительно выклеенной форме.



Рисунок 2.10 – Заготовка под образец для испытаний на растяжение

После застывания смола на плоскошлифовальном станке шлифовалась до размера 2 мм согласно ГОСТ 11262-80 и ширины 6 мм. Таким же образом были изготовлены образцы из углепластика и отдельно из углеволокна волокна.

### 2.1.3 Методика исследования трибологических свойств

Методика основана на нагружении плоского контртела сферическим индентором, вращающимся относительно контртела. В исследовании была использована жесткая схема нагружения, при которой на индентор действует постоянная сила вдавливания, а его положение относительно контртела по нормали друг к другу оставалось неизменным, определялось начальным внедрением индентора в контртело (рис. 2.11).

В процессе испытаний наблюдалось скольжение с неизменной фактической площадью контакта, нормальной силой и силой трения.

Исследование трибологических свойств углепластика и эпоксидной смолы сопровождалось реализацией ниже следующего алгоритма.

На столе вертикально фрезерного станка 6Р12 соосно с осью шпинделя устанавливается измерительное устройство – динамометр КРСЖ-6-10, позволяющий одновременно измерять нормальную к его базовой плоскости силу и крутящий момент.

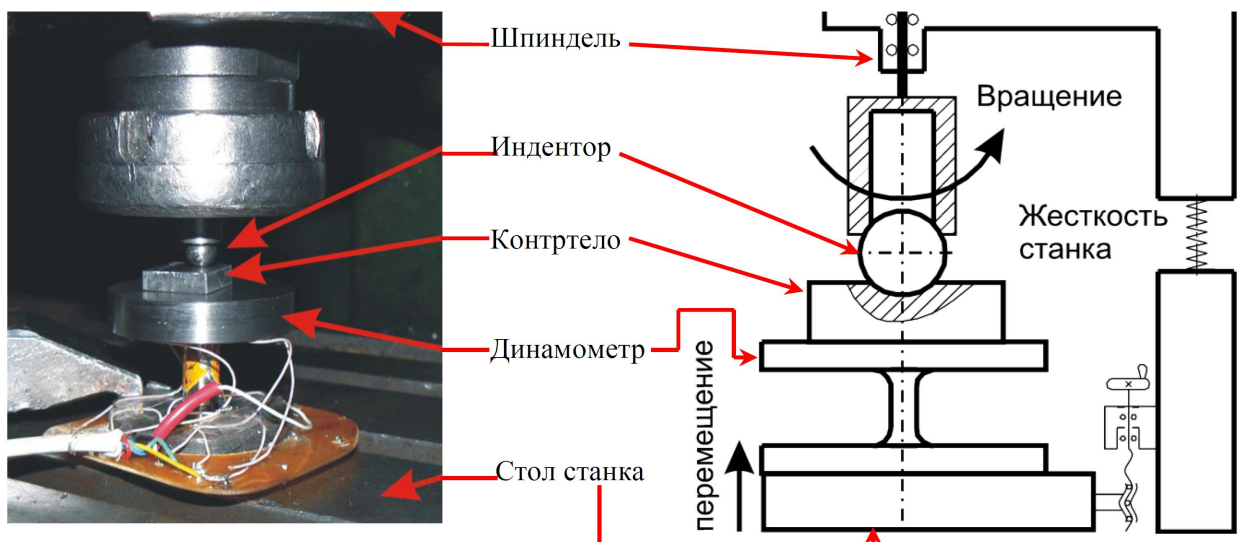


Рисунок 2.11 – Общая схема установки

На базовую поверхность динамометра было установлено контртело (образцы из углепластика или смолы) в виде пластины толщиной 5 мм с параллельными боковыми поверхностями. В цанговом патроне была закреплена оправка с центровым отверстием. Индентор в виде полированной сферы

диаметром равным 9,6 мм изготовленный из твердого сплава предварительно очищенный спиртом и активированным углем был размещен между поверхностью контр тела и конической оправкой. Нагружение контртела индентором осуществлялось перемещением консоли станка вверх вдоль оси z. Индентор вращается относительно своей оси непрерывно на протяжении всего нагружения. Измерение момента трения проводилось при частоте вращения шпинделя  $n=31,5$  об/мин. Малая частота вращения исключает возможность разогрева контактной поверхности.

Проведению исследований по определению трибологических свойств ВПКМ предшествовало изготовление индентора, представляющего собой полированный шар из твердого сплава. С целью повышения точности измерений и получению достоверной информации о природе процессов взаимодействия обрабатываемого и инструментального материала, было принято решение отделить требуемый фрагмент инструментального материала непосредственно от сверла, которым в дальнейшем будет вестись механическая обработка отверстий. Данные действия не понизили прочностные характеристики сверла, впрочем, как и не снизили его точность, что было подтверждено последующими измерениями радиального биения сверла в оправке.

Дальнейшая подготовка индентора заключалась его размещении между двумя чугунными притирами. Доводка твердосплавного индентора была реализована за счет механизма терния скольжения задаваемого вращающимся в шпинделе станка мод 6P12 притира по не подвижному притиру (рис. 2.12 ). В качестве абразивного агента была использована алмазная паста с повышенной концентрацией алмазного порошка с зернистостью 60/40 для черновой доводки, и 3/2 для предварительного полирования. Требуемое отклонение от круглости не менее 5 мкм, шероховатость поверхности не более 0,03 мкм.



Рисунок 2.12 – Притирка твердосплавного индентора

#### 2.1.4 Методики измерения температуры

В данном исследовании была сделана попытка регистрации температуры в зоне резания при обработке ВПКМ и пакета ВПКМ/ Металл. Исследования проводились поэтапно. На первом этапе целью было исследование температуры в зоне резания при сверлении ВПКМ. С этой целью была предложена следующая методика:

1. Изготавливают образец с заданной структурой (волокно и наполнитель) и требуемой схемой армирования, в котором в месте сверления отверстия размещены электроды из нихромовой проволоки  $\varnothing 0,3$  мм в осевом и радиальном направлениях. Количество и размещение электродов выбирается, исходя из цели конкретного исследования;

2. Выполняют тарирование термопары «исследуемая марка твердого сплава - нихромовая проволока» и определяют зависимость температуры от термо-ЭДС в нагретом стыке двух металлов;

3. Выполняют сверление в заданном месте образца, регистрируя термо - ЭДС быстродействующим регистратором, в качестве которого можно использовать ЭВМ с АЦП. С целью исключения помех частота регистрации должна быть такой, чтобы за время срезания электрода было зарегистрировано не менее 10 точек;



4. По полученным данным о термо-ЭДС рассчитать температуру в каждой контрольной точке режущей кромки сверла.

Измерение температуры производилось по схеме, представленной на рис.2.13. Заготовка 1 обрабатывалась сверлом 2, с которого сигнал термо – ЭДС передавался на внутреннее кольцо подшипника 3, а далее через шарики и графитовую смазку – на его наружное кольцо, с которого поступал непосредственно на устройство сбора данных 5. При обработке сверло 2 срезает одновременно несколько вертикально вложенных в ВПКМ проволочных термоэлектродов 4, что позволяет зарегистрировать термо - ЭДС вдоль режущей кромки сверла (рис.2.13).

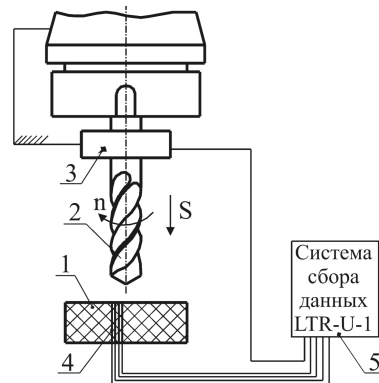


Рисунок 2.13 Схема реализации способа измерения температуры при сверлении волокнистых полимерных композиционных материалов

В эксперименте выполнялось сверление образцов ВПКМ, состоящих из однонаправленных углеродных волокон, пропитанных эпоксидным связующим ЭД-20. Образцы в виде цилиндра  $\varnothing 20$  и высотой 7 мм были сформованы техникой послойной укладки. На этапе формовки в образцы было введено четыре нихромовых проволоки  $\varnothing 0,3$ мм, таким образом, чтобы измерить температуру резания в четырех точках главной режущей кромки сверла. Сверление ВПКМ выполнялась на фрезерном станке 6P12 твердосплавным сверлом с нормальной заточкой GUNRING К/Р  $\varnothing 10$  мм с частотой вращения шпинделя  $n=1000$  об/мин; осевой подачей сверла  $S=0,1$  мм/об.

Для определения величины температуры, соответствующей величине измеренной термо-ЭДС, выполнялось тарирование термопары «твердый сплав-

нихром». Для этого была реализована установка (Рис 2.14). Локальный нагрев инструмента 5 в месте горячего спая 4 производился в погружной печи 3. Охлаждение холодного спая 1 было реализовано при помощи резервуара с охлаждающей жидкостью 2. В процессе нагрева и охлаждения проводился активный контроль температуры при помощи контрольной термопары, размещенной непосредственно в зоне нагрева. Термо - ЭДС тарированной термопары измерялась системой сбора данных LTR-U-1. Обработка данных осуществлялась с помощью программы Power Graph 3.3 на персональном компьютере (ПК). Опыты повторялись три раза (см табл.2.1).

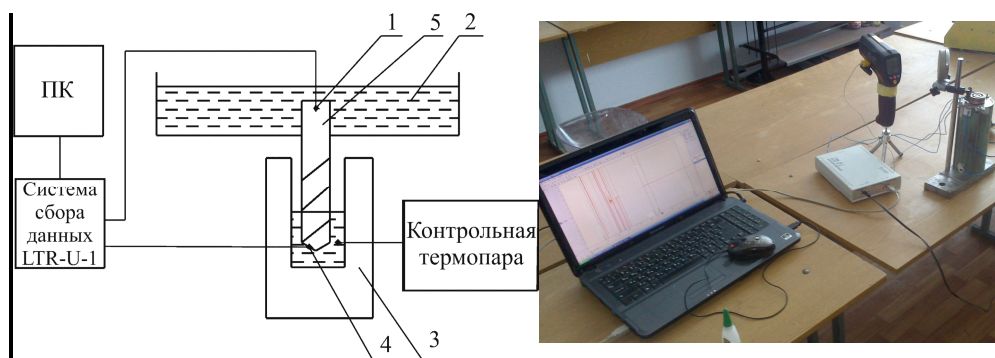


Рисунок 2.14 Схема установки для тарирования термопары «твердый сплав-нихром»

Таблица 2.1 – Экспериментальные данные о зависимости термо-ЭДС от температуры термопары хромель-алюмель.

№ цикла	Термо-ЭДС $\theta, mV$	Температура $t, ^\circ C$	№ цикла	Термо-ЭДС $\theta, mV$	Температура $t, ^\circ C$	№ цикла	Термо-ЭДС $\theta, mV$	Температура $t, ^\circ C$
1	0,6	20	2	0,6	20	3	0,6	20
	1,1	40		1,1	40		1,1	40
	1,7	80		1,9	80		1,7	80
	2,5	120		2,4	120		2,6	120
	2,7	160		2,8	160		2,7	160
	3,1	200		3,0	200		3,1	200
	3,8	240		4,0	240		4,0	240
	4,5	280		4,5	280		4,4	280
	4,8	300		4,7	300		4,8	300

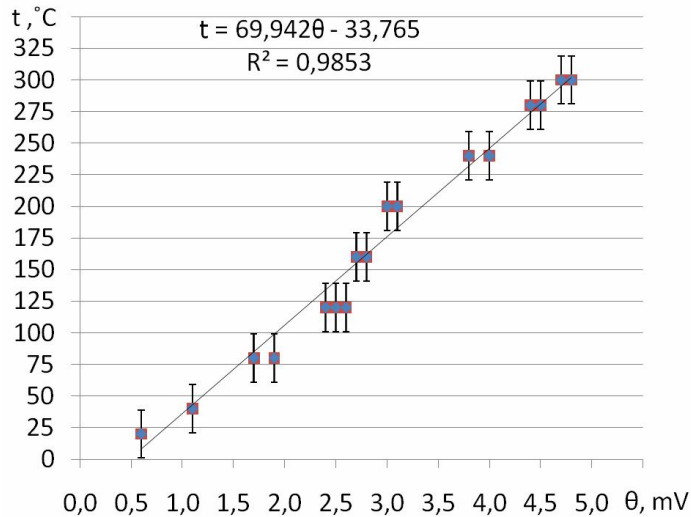


Рисунок 2.15 Зависимость температуры от величины термо - ЭДС в контакте нихром - твердый сплав

По полученным данным (рис. 2.15) была определена тарировочная характеристика

$$t = 70 \cdot U - 34, \quad (2.1)$$

где  $t$  – температура в зоне резания, °C;

$U$  термо - ЭДС, mV.

Доверительный интервал составил 4°C. Уравнение (2.1) удовлетворяет критерию адекватности Фишера.

Вторым этапом подготовки является подготовка сверла. Применяемое сверло GUEHRING-SL R-RT1U 5510 K/P95377 материал твердый сплав. Для размещения термопары в теле сверла была прорезана винтовая канавка на глубину 1 мм при помощи ручной бор машинки с установленным алмазным кругом.

Поверхность канавки для обеспечения электро изоляции была покрыта термостойким лаком. Поверхность проводов термопары так же была изолирована лаком все элементы были помещены в печь для сушки лака при температуре 150градусов в течении 4х часов производилась сушка элементов перед сборкой. В месте контакта спая со сверлом лак удалялся.

Сборка сверла представляла собой заклепку термопары в канавку сверла , в качестве клея применялась смола Lorit 285 с добавлением мелкой фракции

карбонового волокна для повышения термостойкости клеевого состава. После высыхания клея к термопаре припаивалась клемма позволяющая присоединять при необходимости систему регистрации сигнала.



Рисунок 2.16 – Сверло в сборе с термопарой

Общая схема устройства регистрации термо-ЭДС

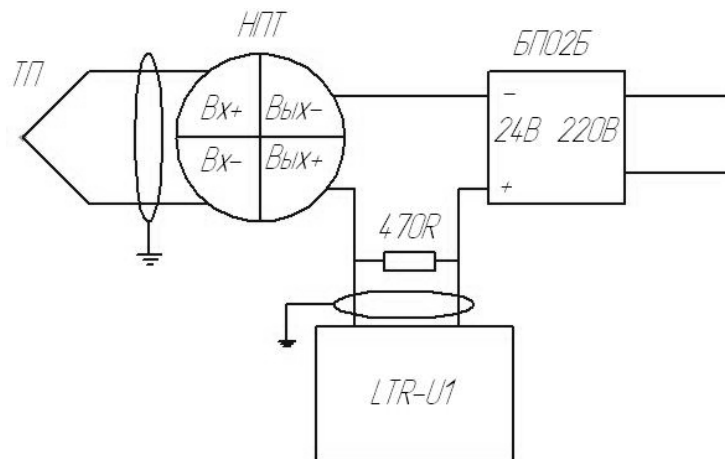


Рисунок 2.17 – Схема устройства сбора данных

Устройство состоит из пяти элементов:

- ТП- термопара снимающая сигнал с поверхности сверла, термопреобразователь термоэлектрический ТЭРА ТХА 1-20-К-2-Н-500-6,5-1,2- (0...1000), предназначен для измерения различных высокотемпературных сред.

- НПТ – нормирующий температурный преобразователь предназначен для преобразования значения температуры в унифицированный сигнал постоянного тока 4-20 мА согласно ГОСТ 13384-94.

- БП02Б – блок питания предназначенный для обеспечения НПТ

- 470R – резистор

- LTR-U1 – система сбора данных

После сборки всех элементов системы проводилось повторное тарирование термопары, результаты представлены на рисунке ниже.

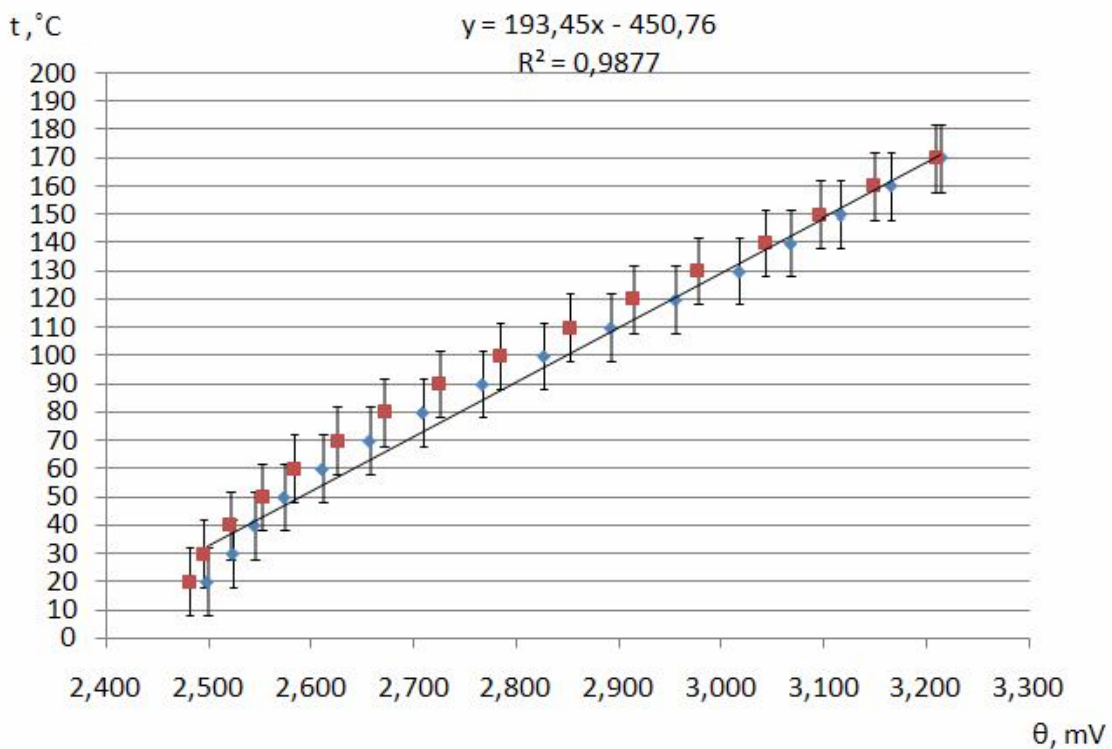


Рисунок 2.18 – Тарировочный график термопары

При проведении исследований применялось два типа станков: токарный модели 16K20T1, и фрезерный Fadal, на фрезерном станке (рис.2.19) проводилось сверление для набора количества отверстий, а соответственно и износа инструмента. Использование цилиндрических образцов (рис.2.20) для этих целей не рационально, так их изготовление сопряжено со значительными затратами основного и вспомогательного времени на формовку единицы площади образца к количеству размещаемых отверстий и большому расходу материала.

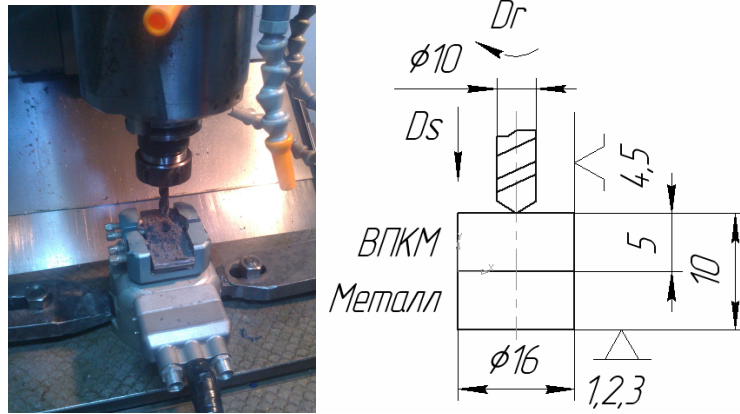


Рисунок 2.19 - Сверление отверстий на фрезерном станке

Обработка контрольных образцов проводилась на токарном станке для измерения температуры и осевой силы одновременно. Динамометр устанавливался на резцедержку токарного станка.

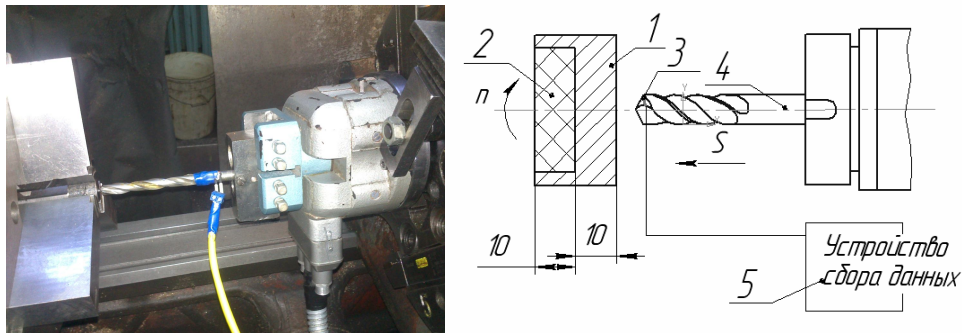


Рисунок 2.20 – Обработка контрольных образцов на токарном станке

При обработке контрольного образца происходил процесс сбора данных из двух источников: динамометр УДМ-100 и термопара. Термопара вместе с системой сбора данных обеспечивала показания температурных эффектов в зоне резания при прохождении сверлом композита и металла. Динамометр в свою очередь обеспечивал измерение осевой силы в процессе резания, данные обоих источников выводились на экран компьютера и регистрировались и сохранялись при помощи программы продукт Power Graph 3.3.

### 2.1.5 Методика определения физико - механических свойств волокнистого полимерного композиционного материала и его компонентов

Для изучения физико - механических свойств композиционного материала было принято решение исследовать образцы из готового композита, карбон+смола, и отдельно образцы изготовленные из эпоксидной смолы. Свойства непосредственно карбонового волокна были приняты по информации завода производителя.

Эпоксидная смола подвергалась двум типам испытаний: на растяжение и на сжатие (рис.2.21). Образцы изготавливались согласно ГОСТ 11262-80. Стандартом регламентированы геометрические размеры образцов перед испытанием и скорость деформации. Перед испытанием на образцы были нанесены метки в соответствии. Образцы закрепляют в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и направлениям движения подвижного зажима, зажимы равномерно затягивают, чтобы исключить скольжение образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушения в месте закрепления. Испытания проводились при скорости раздвижения зажимов равной 1мм/мин.



Рисунок 2.21 – Образцы из эпоксидной смолы после испытаний на растяжение

Измерения проводились на машине гидравлической типа Р20 предназначены для статических испытаний образцов конструкционных материалов на растяжение, сжатие и изгиб.

Измерение нагрузки при проведении испытаний осуществляется традиционным торсионным силоизмерителем. Машины позволяют производить запись диаграммы нагружения на двухкоординатном самописце (рис.2.22).



Рисунок 2.22 – Испытание образца из углепластика на растяжение



## 2.1.6 Методика оценки качества отверстий в пакетах волокнистый полимерный композиционный материал/ металл

Примеры трехточечных схем измерений отклонений от круглости рассмотрены ниже.

1) Трехточечные схемы измерения отверстий см. на рис.2.23.

Принцип измерений и расчетные формулы аналогичны применяемым для измерения валов. Так же как и при измерении валов существуют симметричная и несимметричная схемы. Угол  $\psi$  между неподвижными опорами в отверстии рассчитывается по формуле  $\psi = 180^\circ - \alpha$ .

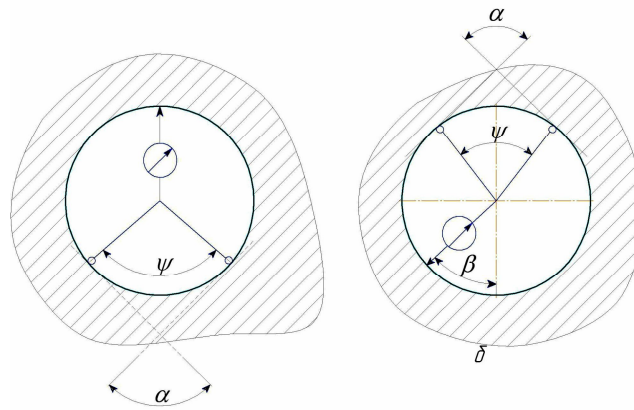


Рисунок 2.23 – Измерение отклонения от круглости

Кроме рассмотренных выше схем, для определения величины отклонения от круглости применяются специальные средства тем или иным образом материализующие прилегающую окружность (кругломеры). При этом измерительной базой становится именно прилегающая окружность, что полностью соответствует стандартному описанию искомой погрешности. Таким образом, методическая составляющая погрешности измерений становится практически равной нулю, что существенно увеличивает точность измерений, необходимую в особо ответственных случаях.

Измеряемая деталь сопрягается с образцовой по форме деталью (кольцом или пробкой), которая в ограниченном диапазоне диаметров материализует прилегающую окружность. Измерительной головкой, закрепленной неподвижно

на образцовой детали, регистрируется максимальная разность показаний за один оборот измеряемой детали относительно образцовой. Для более полной компенсации действительных отклонений диаметра деталей применяют образцовые детали, регулируемые по диаметру, либо набор различных по диаметру образцовых деталей.

### **2.1.7 Методика измерения радиуса округления режущей кромки**

Оценка радиуса округления производилась при помощи растрового электронного микроскопа РЭМ 100УМ (рис.2.22) с помощью методики по патенту №45759А3. Ориентация сверла осуществлялась таким образом, чтобы одна из поверхностей объекта была перпендикулярна оси прибора.

Сканирование контролируемой поверхности происходило при помощи пучка электронов при таком увеличении, которое обеспечивало одновременное наблюдение большого отрезка режущей кромки.

Режущая кромка на лезвии любого инструмента является результатом пересечения двух поверхностей, в частности передней и задней, и теоретически должна представлять собой линию. Контур этой линии, т.е. форма режущей кромки, определяется взаимным расположением и формами пересекающихся поверхностей.

Вместе с тем реальная режущая кромка всегда является не линией, а переходной поверхностью, как правило, геометрической формы, которую с большей или меньшей ошибкой принято отождествлять с поверхностью, которая в нормальном сечении имеет форму дуги с некоторым радиусом.

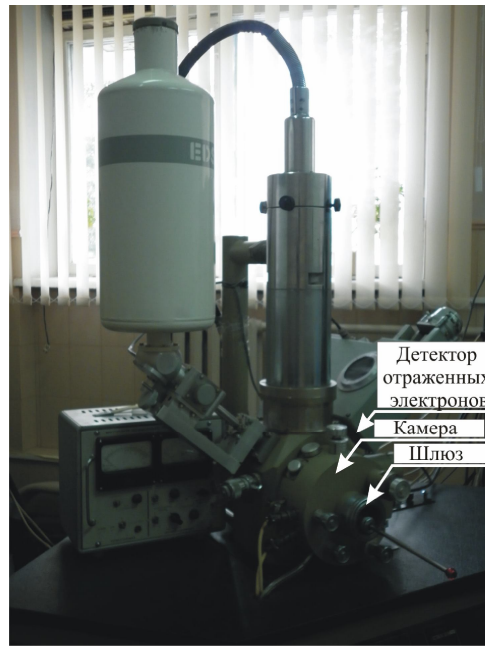


Рисунок 2.24 – Микроскоп РЭМ100-УМ

Перед началом обработки сверло было помещено в РЭМ 100УМ для измерения радиуса округления режущей кромки после заводской заточки. Величина этого радиуса формируется при заточке лезвия и в определяющей мере зависит от условий проведения заточки.

Измерение радиуса округления режущей кромки сверла проводилось через определенные промежутки времени работы инструмента в зависимости от пройденного пути резания. Измерение проводилось методом сканирования режущей кромки со стороны задней поверхности на растровом электронном микроскопе РЭМ100-УМ.

## 2.2 Выводы

1. Стойкость к изнашиванию твердосплавных сверл предложено оценивать интенсивностью изнашивания, выражаемую в увеличении фаски износа по задней поверхности за один цикл сверления;

2. Качество обработанной резанием цилиндрической поверхности отверстия в пакете предложено оценивать по отклонению от круглости на

участке ВПКМ и Металл. Критерием качества отверстия в ВПКМ считать отсутствие расслаивания, не срезанных волокон, оценку выполнять визуально;

3. Разработана технология изготовления листов ВПКМ и смешанных пакетов методом вакуумной формовки с послойной ручной укладкой слоев армирующего волокна;

4. Разработана методика измерения температурного поля инструмента в процессе механической обработки пакета ВПКМ/ Металл методами полуискусственной и искусственной термодпары, которые позволяют оценить температуру резания при сверлении ВПКМ;

5. Разработаны методики определения физико- механических и трибологических свойств ВПКМ и его компонентов, включая подготовку образцов, проведение испытаний и обработки результатов.

6. Основные метрологические показатели применяемых средств измерения обеспечили получение данных с погрешностью не более 10%.

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Наличие достоверной информации о физико – механических свойствах компонентов ВПКМ является критичным при создании конечно – элементной модели материала. В этой связи для определения выше упомянутых свойств были применены стандартизированные методики исследования (табл. 3.1)

Таблица 3.1 –Сводная таблица стандартов

Название материала	ГОСТ по испытанию на сжатие	ГОСТ по испытанию на растяжение	ГОСТ по испытанию на сдвиг	ГОСТ по испытанию на изгиб
ВПКМ	ГОСТ 25.602-80	ГОСТ 25.601-80	ГОСТ Р 50578-93	ГОСТ 25.604-82
Полимер	ГОСТ 4651-82	ГОСТ 11262-80	ГОСТ 24778-81	ГОСТ 4648-71
Сталь	ГОСТ 25.503-97	ГОСТ 1497-84	-	ГОСТ 14019-80*

#### 3.1 Определение механических свойств матрицы

Для определения механических свойств полимерной матрицы в качестве образца использовалась эпоксидная смола марки ЭД-20. Поскольку плотность, коэффициент Пуассона и модуль Юнга для данной смолы уже известны и предоставляются в справочниках, необходимым остается определение критерия разрушения, то есть построения кривой упрочнения (графика зависимости напряжения течения от логарифмической деформации).

Для приготовления образца смола перемешивается с отвердителем продаваемым вместе с нею. Для получения наиболее высоких механических свойств смолу рекомендуется смешивать с отвердителем в пропорции 1:10. Важно тщательно перемешать смолу и отвердитель, до получения однородной смеси с одинаковыми свойствами по всему объему. При перемешивании существенной является необходимость удаления пузырьков воздуха, которые после застывания будут служить концентраторами напряжения. Процесс

отвердения после начала эмульгации длится 24 часа при температуре окружающей среды 20°C. С целью подготовки полученного образца к испытанием на механические свойства необходимо придать ему форму с четко определенными геометрическими размерами.

Испытания на сжатие эпоксидной смолы проводились согласно методике ГОСТ 4651-86 (см.п.2.1.5). Исходные размеры образцов для испытания на сжатие (табл. 3.2).

Таблица 3.2 - Начальные геометрические размеры образца

	<b>Эпоксидная смола ЭД-20</b>	<b>Lorit 285</b>
Диаметр, мм	43	28,86
Высота, мм	34	21,6

Определение механических свойств образца из эпоксидной смолы на сжатие проводились на универсальной испытательной машине Р-20 с максимальной нагрузкой до 200 кН.( рис.3.1).

В зону установки был помещен исследуемый образец (рис. 3.2). На первом этапе исследуемый образец был размещен на испытательном стенде, где снизу располагается неподвижная часть прижима, так называемый пассивная часть , а сверху по направлению вниз к образцу движется активная часть. На втором этапе произошло соприкосновение образца эпоксидной смолы с активной частью прижимного механизма испытательного стенда. Третий этап характеризуется частичным деформированием образца с визуально заметным уменьшением его по высоте. На четвертом этапе происходит полное разрушение («сплюскивание») образца.

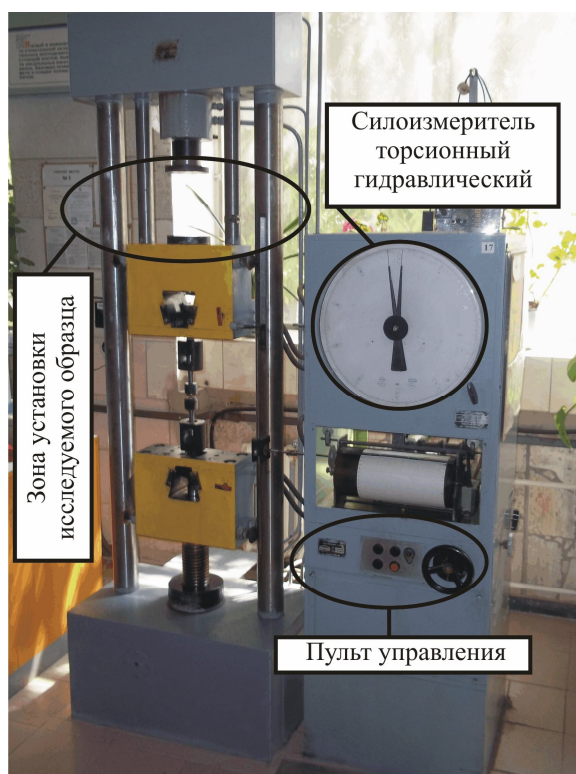


Рисунок 3.1 – Универсальная испытательная машина Р-20

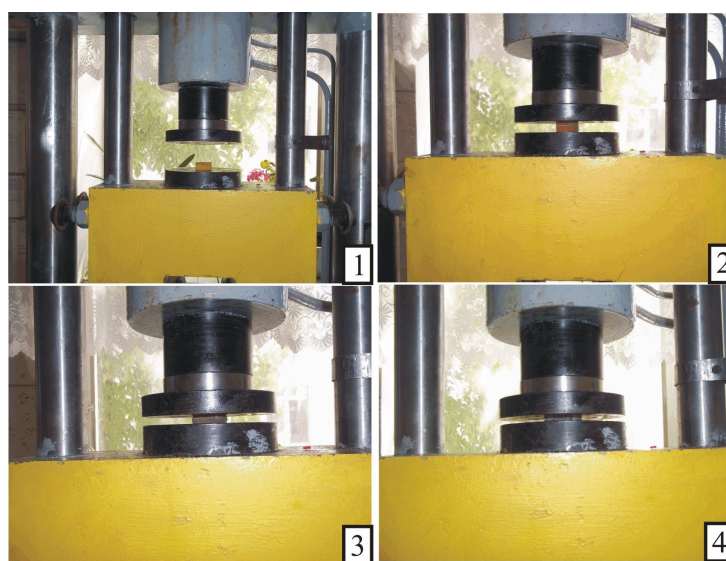


Рисунок 3.2 – Образец эпоксидной смолы, установленный на универсальной испытательной машине Р-20

Результатами испытаний является диаграмма разрушения образца из эпоксидной смолы, записана самописцем машины. Диаграмма представляет собой график зависимости деформаций нагружаемого образца от нагрузки, создаваемой испытательной машиной.

Из диаграммы видно (см. рис. 3.3), что образец начал пластически деформироваться при 44 кН, а при 152 кН на цилиндрической поверхности образовалась трещина, развитие которой привело к полному разрушению материала. Для возможности использования данных диаграммы испытаний и построения кривой упрочнения воспользуемся рекомендациями согласно ГОСТ 4651-86.

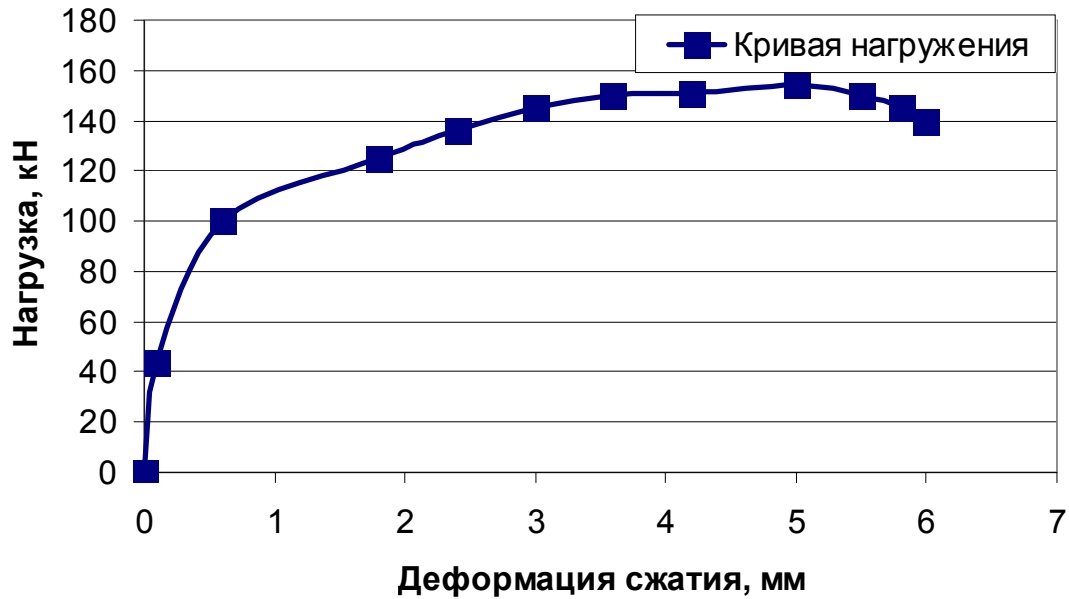


Рисунок 3.3 – Диаграмма испытаний эпоксидной смолы ЭД -20 на сжатие

Кривую упрочнения строят в координатах: ордината - напряжение течения  $\sigma$ , абсцисса — логарифмическая деформация  $\varepsilon$ . Напряжение течения  $\sigma$ , МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ), рассчитывают по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3.1)$$

где  $F$  – осевая сжимающая нагрузка, Н;

$A$ - площадь поперечного сечения, мм.

Логарифмическая деформация (укорочение),  $\varepsilon$  для образца рассчитывается по формуле:



$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k}, \quad (3.2)$$

где  $h_0$  – начальная высота образца;

$h_k$  – высота образца при нагрузке.

Рассчитаем эти характеристики для равномерно расположенных восьми точек диаграммы испытаний:

1	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{44000}{0,043} = 102 \text{ МПа}$	$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k} = \ln \frac{34}{34} = 0$
2	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{100000}{0,043} = 232 \text{ МПа}$	$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k} = \ln \frac{34}{33,4} = 0,018$ 0,6
3	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{125000}{0,0431} = 290 \text{ МПа}$	$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k} = \ln \frac{34}{32,2} = 0,054$ 1,8
4	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{136000}{0,0432} = 315 \text{ МПа}$	$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k} = \ln \frac{34}{31,6} = 0,073$ 2,4
5	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{145000}{0,0433} = 335 \text{ МПа}$	$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k} = \ln \frac{34}{31} = 0,092$ 3
6	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{150000}{0,0435} = 345 \text{ МПа}$	$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k} = \ln \frac{34}{30,4} = 0,112$ 3,6
7	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{151000}{0,0437} = 346 \text{ МПа}$	$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k} = \ln \frac{34}{29,8} = 0,132$ 4,2
8	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{154000}{0,044} = 348 \text{ МПа}$	$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k} = \ln \frac{34}{29} = 0,159$ 5

Для проверки правильности данных построим график зависимости деформации от нагрузки (см. рис. 3.3).

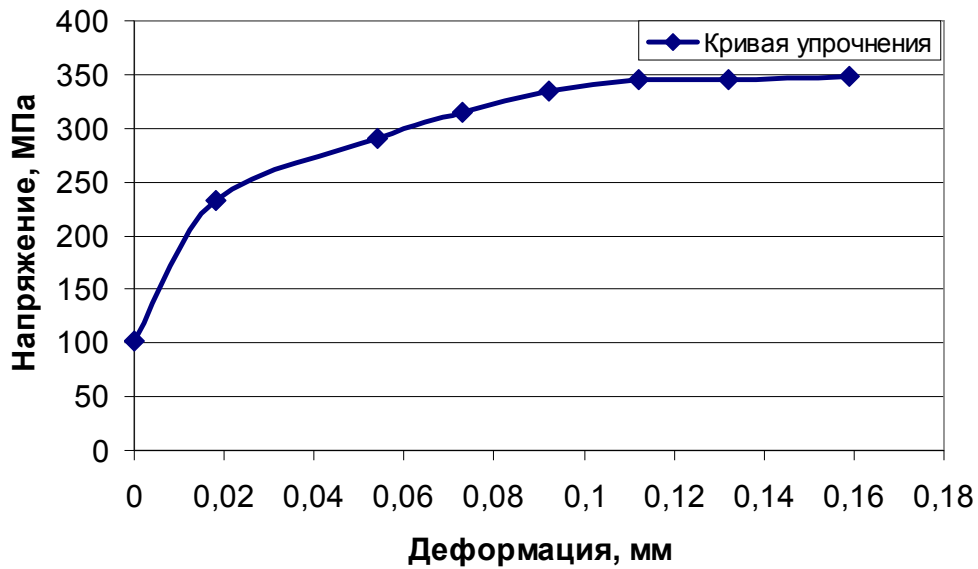


Рисунок 3.4 – Кривая упрочнения

После нагружения образца его геометрические параметры изменились. В соответствии со схемой измерения (рис.3.4) были получены данные о размерах образца после нагружения (табл 3.2).

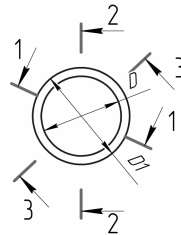


Рисунок 3.5 – Схема измерения геометрических параметров образца на сжатие после нагружения

Результаты испытаний смолы Lorit 285 на сжатие приведены в таблице 3.3 и рис.3.6.

Таблица 3.3 – Измерение пластической деформации образца эпоксидной смолы Lorit 285 на сжатие

Сечение	Мах. диаметр образца $D_1$ , мм,	Min. диаметр образца $D$ , мм,	Высота образца, мм
1-1	42,25	35,43	11,09
2-2	41,92	35,73.	11,2
3-3	41,95	34,45	11,17
Ср.арэфм.	<b>42,04</b>	<b>35,2</b>	<b>11,15</b>

Таблица 3.4 - Упругие свойства смол при испытании на сжатие

Марка материала	Скорость нагружения, мм/мин	Модуль Юнга, МПа	Коэф. Пуассона
Lorit 285	1	1,4	0,45

В ходе испытания образцов на растяжение по методике ГОСТ 11262-80 был установлен предел прочности на растяжение (табл.3.5).

Таблица 3.5 – Свойства смолы Lorit 285 при испытании на растяжение

Марка материала	Скорость нагружения, мм/мин	Предел прочности, МПа
Lorit 285	1	67

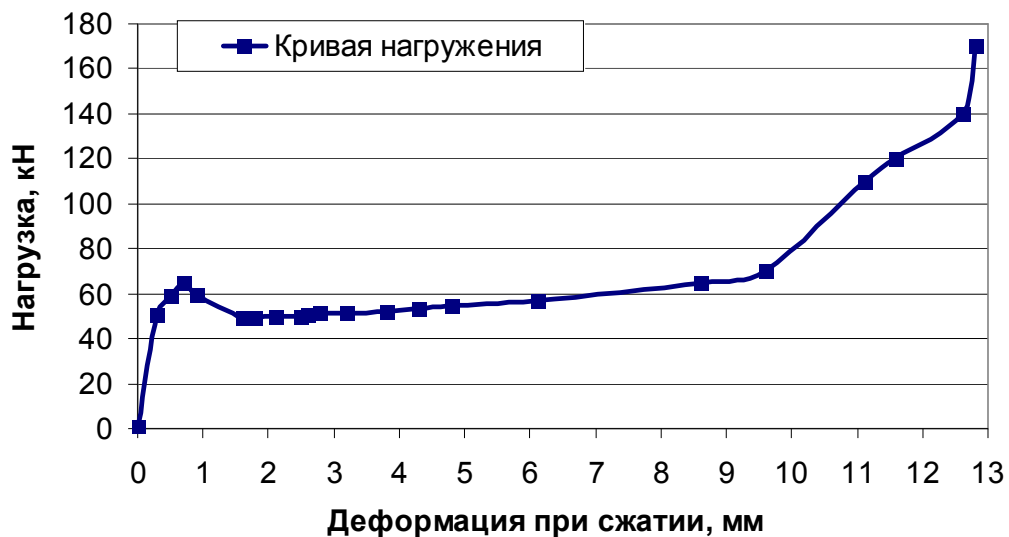


Рисунок 3.6- Кривая нагружения эпоксидной смолы Lorit 285 на сжатие

Для получения свойств волокон использовался образец углеволокна марки ИМ8. Поскольку свойства данной марки волокна известны, нам необходимо только определить критерий разрушения. Для этого достаточно получить диаграмму растяжения и провести вычисления. Для получения диаграммы растяжения на кафедре «Сопротивления материалов и машиноведения» проводились испытания на испытательной машине Р-5 с максимальной нагрузкой 50 кН(см. рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Испытательная машина Р-5

В результате проведенных испытаний на растяжение углеродного волокна была построена диаграмма (см. рис. 3.8).

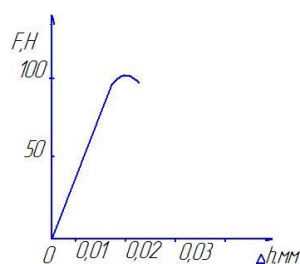


Рисунок 3.8 – Диаграмма испытаний углеволокна

Для определения критерия разрушения воспользуемся формулой:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3.3)$$

где: F – прилагаемая нагрузка, Н;

A – площадь поперечного сечения, мм.

$$\sigma = \frac{100}{0,79} = 127 \frac{\text{Н}}{\text{мм}} = 0,127 \text{ МПа}$$

Поскольку для задания свойств волокна будет использоваться карта \*ELASTIC, то определенных свойств будет достаточно.

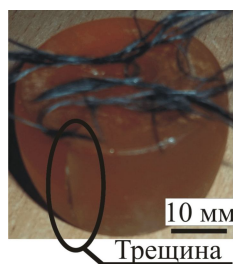


Рисунок 3.9 – Образцы после механических испытаний

### 3.2 Определение трибологических свойств волокнистых полимерных композиционных материалов

Комплекс трибологических свойств материалов, которые находятся в процессе резания в контактном взаимодействии, состоит из уравнений, которые связывают температуру и нормальные напряжения на контактной поверхности с касательными напряжениями. В исследовании рассматривались две пары материалов

- твердый сплав - ВПКМ (углепластик)
- твердый сплав – эпоксидная смола

Испытания проводились при нормальной температуре на адгезиометре, который реализует трение сферического индентора из инструментального материала при его перемещении относительно образца из обрабатываемого материала при разных давлениях в условиях жесткого нагружения (табл. 3.5- 3.6). Индентором в обоих случаях выступал твердосплавный шар диаметром 9,6 мм.

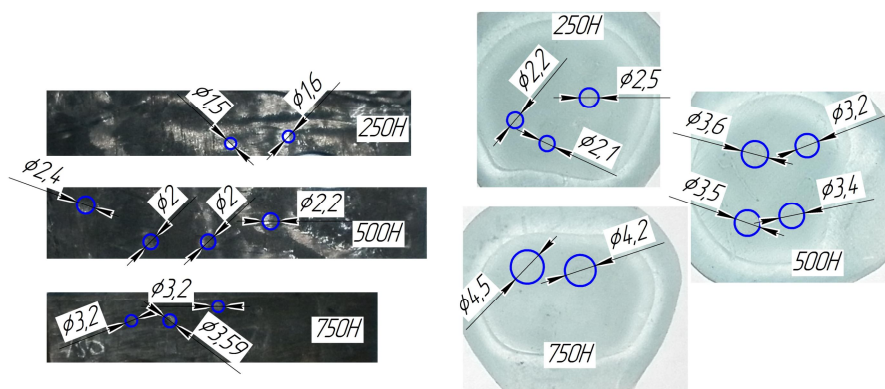


Рисунок 3.10 – Образцы после испытаний на трение

На рисунке 3.10 изображены образцы из смолы и углепластика, при малых осевых нагрузках, до 500Н на образце из углепластика наблюдается скольжение индентора по контртелу (углепластик). В случае с эпоксидной смолой при тех же нагрузке происходит трение индентора, а при меньших нагрузках 250-400Н скольжение. Этот эффект связан с физико-механическими свойствами карбонового волокна, высоким модулем упругости.

На приведенном ниже рисунке показан пример диаграммы изменения осевой силы и момента трения при испытании углепластика твердосплавным индентором с нагрузкой равной 750Н. Данные величины снимаются с адгезиометра при помощи программы Power Graph 3.3. После нагружения образца необходимой величиной осевой силы, включалось вращение, и записывались данные адгезиометра величина момента вращения и осевой силы производилась в зоне стабилизации.

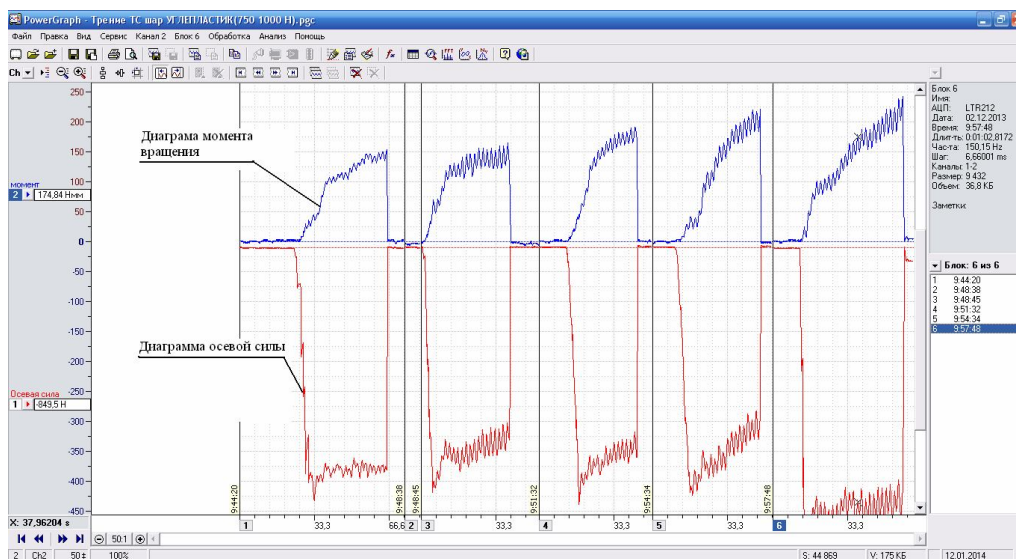


Рисунок 3.11 – Диаграмма данных адгезиометра

Данные полученные в результате эксперимента представлены в табл. 3.6 - 3.7,. Диапазон нагрузки (осевой силы) равен 250-750Н для эпоксидной смолы и 250-1000Н для углепластика. Величина нагрузки выбрана исходя из поискового эксперимента по сверлению углепластика.

Меньшая величина осевой силы прилагаемой к образцам из эпоксидной смолы обусловлена тем что происходит механическое разрушение, растрескивание, испытываемого образца.

Таблица 3.6 – Результаты испытаний углепластика на адгезиометре

Опыт	Осевая сила, Н	Момент, Н*мм	Диаметр отпечатка, мм
1	264,6	7,5	1,60
2	246,6	5,2	1,50
3	328,3	14,1	1,70
4	269,5	7,5	1,60
5	447,6	31,96	2,00
6	753,1	67,38	2,20
7	486,8	28,4	2,00
8	571,7	80,8	2,10
9	736,3	135,3	2,20
10	677,7	131,6	2,30
11	700,8	154,6	2,20
12	710,6	145,9	2,30
13	864,2	165,4	2,20
14	831,53	161,6	2,70
15	952,42	214,3	2,40
16	1050,4	304,5	2,30

Таблица 3.7 – Результаты испытаний эпоксидной смолы на адгезиометре

Опыт	Осевая сила, Н	Момент, Нмм	Диаметр отпечатка, мм
1	215	15	1,8
2	281	20	1,8
3	160	17	1,6
4	165	15	1,6
5	495	47	2,4
6	530	112	2,5
7	390	80	2,4
8	445	123	2,5
9	714	82	3,2
10	730	71	3,2
11	560	60	3,1
12	550	80	3,1

После получения результатов на адгезиометре и механических испытаний материалов было рассчитано модель адгезионной составляющей трения. Задача была решена в среде программы MatLab (рис. 3.12, 3.13).

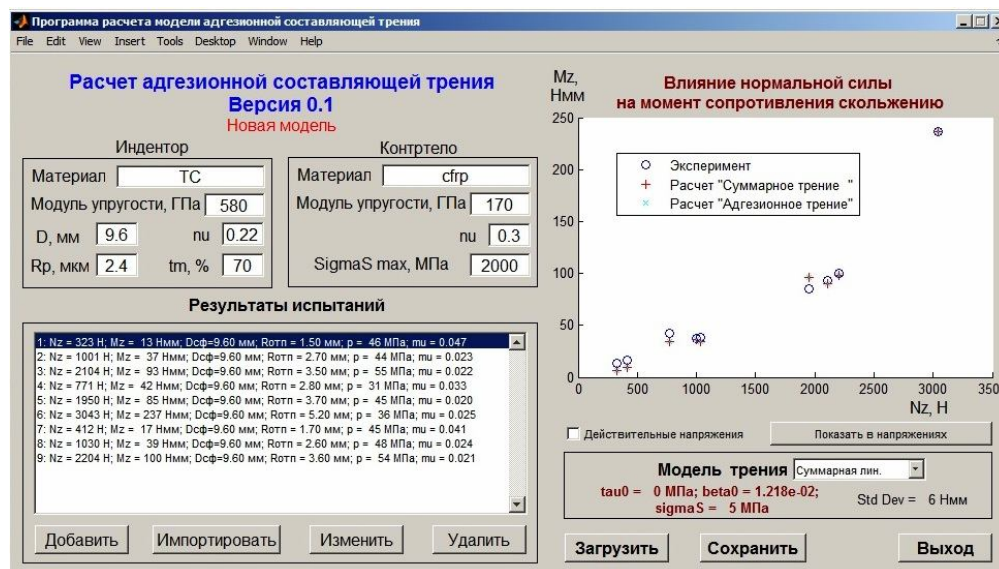


Рисунок 3.12 – Расчет модели адгезионной составляющей трения для углепластика

Приведем модель трения в виде формулы для пары материалов твердый сплав – углепластик.

$$\beta_0 = 1,218e^{-0,2} \quad (3.4)$$

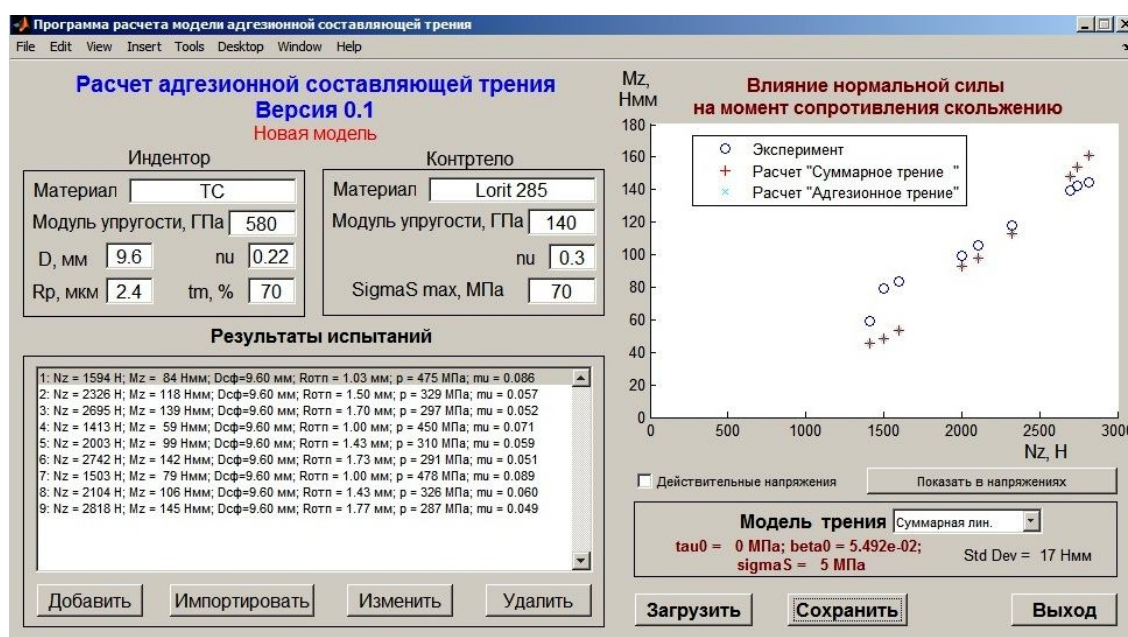


Рисунок 3.13 – Расчет модели адгезионной составляющей трения для эпоксидной смолы Lorit -285

Приведем модель трения в виде формулы для пары материалов твердый сплав – эпоксидная смола Lorit -285.

$$\beta_0 = 5,492e^{-0,2} \quad (3.5)$$



### 3.3 Выводы

1. Реализована методики определения физико - механических свойств ВПКМ и эпоксидной смолы. Проведены испытания и определены механические свойства ВПКМ и матрицы (смолы);

Материал	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа
Смола Lorit 285	1,5	0,45	56	67
Смола ЭД -20	45	0,2	348	-
Углеволокно*	422	0,3	-	450

2. Проведены испытания и определена для ВПКМ (углепластик) и эпоксидной смолы Lorit 285 адгезионная составляющая трения.

## **4 КОНЕЧНО – ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ РЕЗАНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПАКЕТОВ С ИХ ПРИМЕНЕНИЕМ**

### **4.1 Мировой опыт в сфере моделирования процессов обработки волоконистых полимерных композиционных материалов**

Созданию моделей и исследованию на их основе процессов резания ВПКМ посвящены работы многих исследователей. Усилия ученых разных школ можно условно разделить на ряд направлений, в частности: создание эмпирических моделей и моделей на основе искусственного интеллекта, аналитических и численных моделей.

Экспериментальным исследованиям процессов резания ВПКМ и построению эмпирических моделей этого процесса к настоящему времени посвящено большинство исследований. Значительный вклад в изучение физики процесса резания КМ внесли работы ученых научной школы М. Ф. Семко: Дрожжина В. И. [53], Везуба Н. В. [54], Кравченко Л. С. [55]. В 70-е-80-е годы прошлого столетия работы выполнялись в механическом институте (г. Санкт-Петербург) под руководством Степанова А. А. [56], Омском политехническом институте под руководством Б. П. Штучного [57], в МВТУ им. Баумана (г. Москва) под руководством Подураева В. Н. [58], в институте сверхтвердых материалов НАН Украины (Сороченко В. Г. [59]), в УкрНИИАТе (Б. В. Лупкин [60]), научными школами проф. König W. [61], проф. Davim J. P. [23], проф. Ramulu M. [49], проф. Kim D. [62] и других. Для расчета силы резания при прямоугольном ортогональном точении, сверлении, фрезеровании довольно часто применяются эмпирические модели Tanguy J. C., Schlesinger C., A.S.M.E [19].

Широкое разнообразие структур ВПКМ делает привлекательным применение моделей на основе искусственного интеллекта для описания их поведения. Выявление значимости факторов на показатели процесса

прерывистого сверления [63], построение модели осевой силы при сверлении [64, 65], моделей свойств материалов [66] и др.

Аналитические модели используются в современных исследованиях резания ВПКМ как инструмент для прогнозирования сил резания. Эти модели описаны в работах [67 - 30]. Качество обработанной поверхности, критическая для расслоения осевая сила сверления, коэффициент расслоения рассматривались в работах Tsao C. C. [68, 69], Hocheng H. [70], Lachaud F. [35], Jain S. [71] Sadat A. B. [72].

Изучение стружкообразования проводилось в основном на 2D моделях ортогонального резания Zhang L. и соавторов [40], Puw H.Y. и Hocheng H. [73]. Иногда применяется модель с условной плоскостью сдвига [74]. Механизм разрушения КМ включает четыре типа режима разрушения: разрушение волокон, выпучивание и перегиб волокон, трещинообразование в матрице при поперечном растяжении и сдвиге, дробление матрицы при поперечном сжатии и сдвиге [75]. Такое поведение КМ обуславливает значительные сложности построения аналитических моделей, приводящие к введению значительных допущений и упрощений, применения линейных теорий разрушения. Эмпирические модели и модели на основе искусственного интеллекта скрывают физические и механические аспекты происходящих явлений за общей формой уравнений регрессии или алгоритмов, реализующих нейронные сети. В этой связи лишь численные модели, несмотря на их сложность и ресурсоемкость, позволяют выявить особенности физики и механики процессов, происходящих при резании КМ. Поэтому рассмотрим достижения в создании этих моделей более подробно.

Исследований, использующих численные методы для моделирования обработки КМ, опубликовано весьма мало по сравнению с количеством таких исследований, выполненных для процессов обработки резанием металлов [76]. Исследователи используют преимущественно метод конечных элементов (МКЭ). Основные принципы построения конечно-элементных моделей процессов резания КМ такие же, как и при создании моделей резания

металлических материалов [77]. Основные отличия заключаются в описании поведения обрабатываемого материала и выборе критериев разрушения. В этом направлении следует отметить работы Arola D. и Ramulu M. [78, 75], Mahdi M. I. и Zhang L. [79], Durao L. M. и соавторов [80,81], Budan D. A. и Vijayarangan S. [82], Zitoune R. и Collombet F. [32], Rahme P., Landon Y., Lachaud F., Piquet R. [83], Bhattacharya D. и Horrigan D. P. [84], Singh I. и соавторов [85, 86], Iliescu D. [19], Böhm A. [87], Larsi L.[74], Calzada K. A. [88], Venu Gopala Rao G. [89, 90], Ramesh M. V. и соавторов [91], Nayak D. и соавторов [92], Pramanik и соавт.[93], Dandekar C. и Shin Y. [94] и др. Анализ этих работ свидетельствует о том, что неоднородность состава и свойств ВПКМ требует применения специальных приемов для описания поведения ВПКМ при резании. В указанных работах исследователи применяли различные подходы к описанию поведения ВПКМ при резании. В зависимости от глубины детализации описания структуры ВПКМ могут быть выделены три уровня [74, 88]:

- макромеханический. На этом уровне реальный ВПКМ рассматривается как некий эквивалентный материал - однородный и анизотропный, - свойства которого определяются так, чтобы при макромеханическом нагружении они соответствовали бы свойствам реального ВПКМ. Кроме того, на этом уровне для моделирования процесса стружкообразования, прогнозирования сил резания и возможных повреждений в обработанной поверхности применяют макромеханические критерии отказа. Макромеханическую детализацию свойств обрабатываемого материала использовали в своих работах Arola D. и Ramulu M. [78, 75], Mahdi M. I. и Zhang L. [79], Ramesh M. V. и соавторы [91], Larsi L.[74], Zitoune R. и Collombet F. [95].

- мезомеханический, который, как правило, применяется при построении моделей резания слоистых ВПКМ. На этом уровне каждый слой такого ВПКМ рассматривается как отдельная однородная анизотропная пластина, «приклеенная» к соседним слоям, например, с помощью контактных элементов. К этим отдельным слоям слоистого ВПКМ применяются критерии макромеханического разрушения. Существуют критерии разрушения, которые

специально разработаны для элементарных однонаправленных слоев ВПКМ [96, 97]. Такой подход к детализации эффективно применили для моделирования расслоения при сверлении слоистых ВПКМ Durgao L. M. и соавторы [80, 81], Singh I. и соавторы [85, 86], Rahme P. и соавторы [83], Bhattacharya D. и соавторы [84], Budan D. A. и Vijayarangan S. [82] и др.

- микромеханический. На этом уровне компоненты КМ (волокно, матрица и граница «волокно – матрица») рассматриваются как отдельные, связанные между собой, однородные тела. Как показали решения, полученные для процессов прямоугольного резания исследованиями Nayak D. и соавторов [92], Venu Gopala Rao G. и соавт. [89, 90], Pramanik и соавт.[93], Larsi L.[74], Calzada K. A. [88], Dandekar C. и Shin Y. [94], этот подход позволяет достаточно точно прогнозировать силы резания с учетом разрушения ВПКМ на границе «волокно-матрица». Вместе с тем, он требует значительных вычислительных ресурсов.

Nayak D. и соавторы [92] с помощью разработанной ими микромеханической модели в пакете ABAQUS показали теоретически, что с изменением угла ориентации волокон  $\theta$  величина главной проекции силы резания изменяется более чем в 2 раза, достигая максимума при угле  $\theta=90^\circ$  и минимума при угле  $\theta=0^\circ$  (рис. 3.1). Calzada K. и соавторы усовершенствовали двумерную квазистатическую конечно-элементную микромеханическую модель процесса прямоугольного резания Nayak D., включив в нее не одно, а несколько волокон, как отдельные тела, когезионно связанные с матрицей [88]. Их модель дала те же качественные результаты. Следует отметить, что экспериментальные данные Wang D.H., и др. [98] также доказывают, что максимальное значение главной проекции силы резания достигается при  $\theta=90^\circ$ . Таким образом, несмотря на погрешность прогноза абсолютной величины силы резания микромеханические модели достаточно хорошо качественно описывают поведение ВПКМ при резании. Это является предпосылкой для оценки качества обработанной поверхности с помощью этих моделей.

Анализ литературных источников показал, что большинство разработанных моделей являются квазистатическими, которые позволяют прогнозировать место разрушения и формирование стружки только в первом волокне

Эти модели не могут применяться для моделирования собственно процессов разрушения и стружкообразования. Первой моделью, способной моделировать длительное образование стружки при прямоугольном резании, является модель Calzada К. (см. рис.3.1) [88].

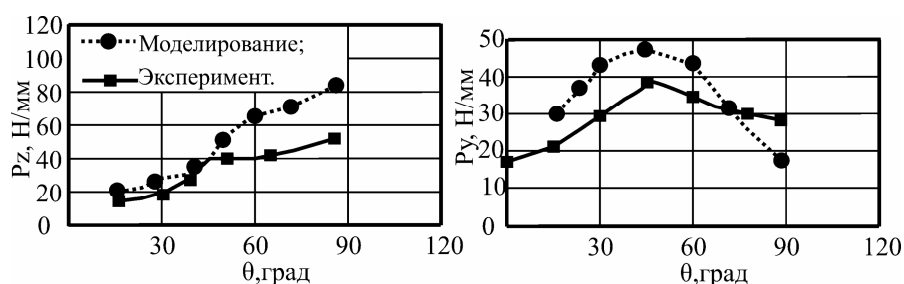


Рисунок 4.1 - Влияние угла направленности волокон на главную проекцию  $P_z$  и радиальную проекцию  $P_y$  удельной силы резания [92]

## 4.2 Создание конечно – элементной модели

Как уже упоминалось в п. 2.1 конечно- элементное моделирование было реализовано двумя блоками. Первый блок включает создание конечно – элементной модели резания ВПКМ, второй резания пакета ВПКМ/Металл. Исходя из этого, в рамках этого раздела, будет описан каждый из вышеупомянутых блоков в порядке хронологии их реализации.

Проанализировав процесс обработки разнонаправленного многослойного композиционного материала, был сделан вывод, что сверление отверстия в композите может быть заменено свободным резанием типичных участков одного однонаправленного слоя. Это обусловлено тем, что угол между волокнами во всех разнонаправленных слоях по отношению к режущему клину циклически изменяется от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  со сдвигом между слоями на  $45^\circ$  (см. рис.4.2).

То есть моделирования процесса резания слоя, с разным углом наклона волокон к режущему клину будет достаточно, чтобы проследить процессы во всем композите при сверлении (см. рис.4.3).

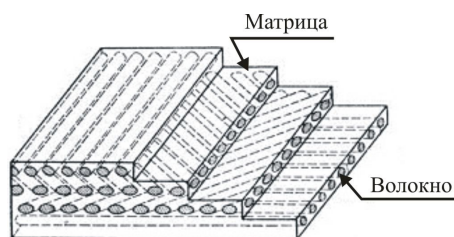


Рисунок 4.2 – Размещение волокон в слоях ВПКМ

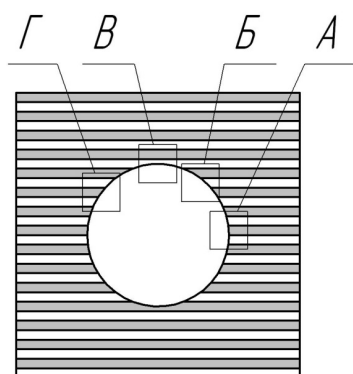


Рисунок 4.3 – Выбор типичных участков с направлением волокон  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  к режущему клину

Исходя из выбранных участков, ориентации углеродного волокна к режущему клину будут располагаться, как это показано на рис. 4.4:

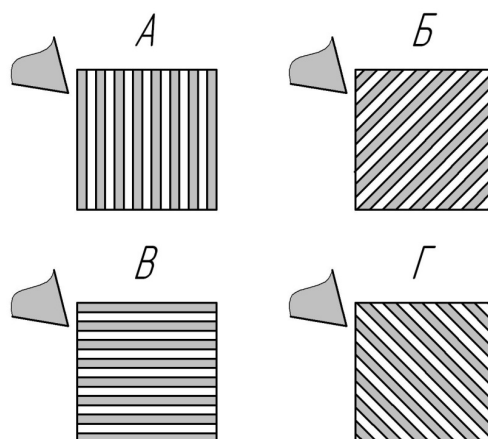


Рисунок 4.4 – Угол направленности волокон углеродного волокна относительно главного движения резания в главной секущей плоскости

Опираясь на мировой опыт, в моделировании процессов механической обработки ВПКМ, было принято решение о создании микромеханической модели, как наиболее точно описывающей процессы разрушения ВПКМ. Для этого в программе LS-DYNA было исследовано резание ВПКМ с различной ориентацией волокон однолезвийным инструментом. Расчетная схема представлена КЭ части заготовки из ВПКМ шириной  $b=0,13$  мм, длиной  $L=0,5$  мм и высотой  $h=0,5$  мм (см. рис. 4.5). Толщина срезаемого слоя  $a$  принята равной  $0,1$  мм. При создании КЭ-сетки размер КЭ-элемента был выбран равным диаметру углеродного волокна и составил  $10$  мкм [92]. Размер КЭ – сетки инструмента был принят равным  $50$  мкм. В разработанной модели использовались трехмерные КЭ в виде прямоугольных параллелепипедов с равномерным распределением напряжениями в объеме элемента. Критерием разрушения волокна были максимальные главные напряжения, а критерием разрушения матрицы – величина накопленных пластических деформаций. Связь между волокном и матрицей принята абсолютно жесткой. Для ускорения расчета инструмент принят абсолютно твердым. Температурные эффекты не рассчитывались и не учитывались в данной модели.

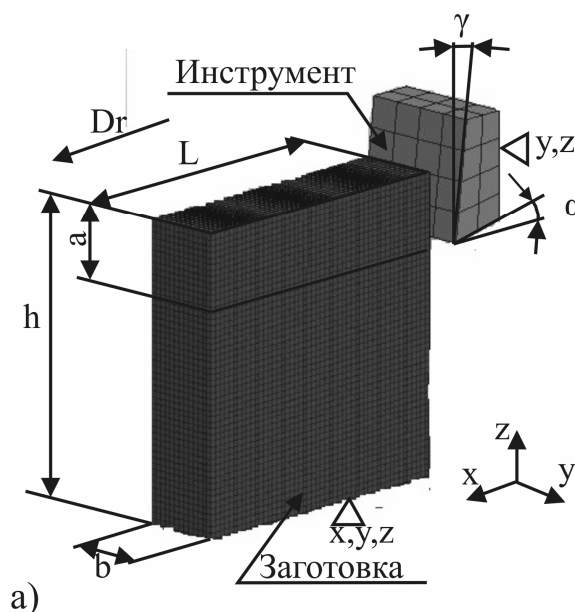


Рисунок 4.5 - Расчетная схема модели с граничными условиями

Создание Cad-моделей обрабатываемого материала и резца проводилось при помощи программы Компас 3D V11. CAD- модель представляет собой



сборку двух компонентов: режущего клина и обрабатываемой заготовки. В этой связи были отдельно созданы 3D модели резца (см. рис. 4.7) и заготовки ВПКМ (см. рис. 4.6). Далее созданные объекты были объединены в сборку. Каждая деталь была лишена необходимого количества степеней свободы. Заготовка ВПКМ была лишена шести степеней свободы, а режущий клин 5 с возможностью перемещения по оси X. На следующем этапе эта CAD- модели была импортирована в среду ANSYS V12.

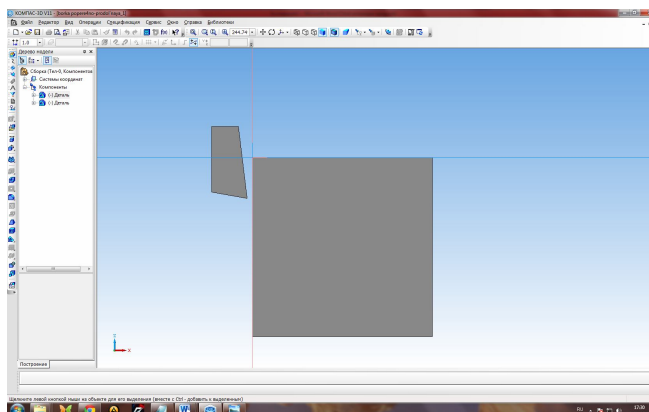


Рисунок 4.6 – Создание CAD- модели с помощью САПР Компас 3D

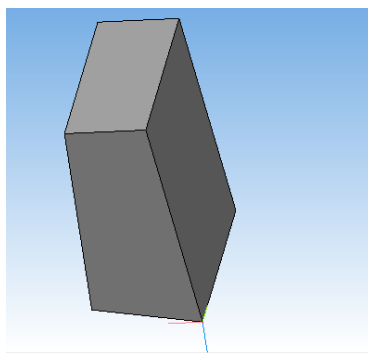


Рисунок 4.7 – Трехмерная модель режущего клина

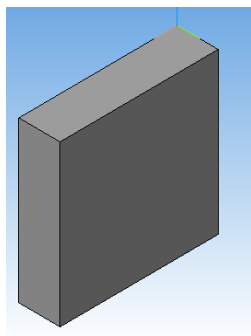


Рисунок 4.8 - Трехмерная модель ВПКМ

Как следует из основной концепции метода конечных элементов, все элементы исследуемой системы подразделяются на множество отдельных областей, называемых конечными элементами. Эти элементы соединяются между собой в вершинах (узлах). Силы действуют в этих узлах, а напряжение и деформации - в характерных внутренних точках конечных элементов, которые называются квадратурными точками (точками интегрирования). КЭ модель допускает, что напряжения и деформации могут действовать и вне данных конечных элементов (см. рис.4.9).

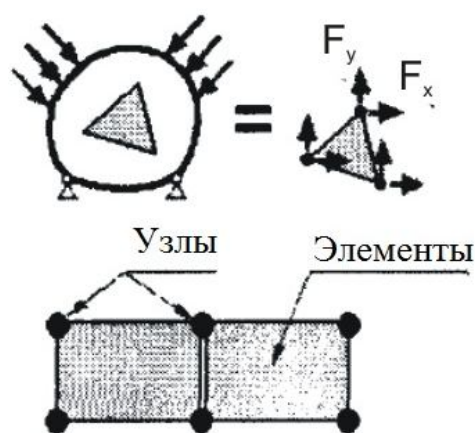


Рисунок 4.9 – Иллюстрация концепции метода конечных элементов [99]

В общем случае каждый узел имеет 6 степеней свободы: 3 поступательных в направлении соответствующих осей и 3 вращательных относительно этих самых осей. Вместе с тем в зависимости от конкретного типа элемента количество реально используемых степеней свободы может быть меньше. Доступные в настоящее время в LS-DYNA виды конечных элементов можно разделить на оболочные, объемные, балки, стержни, пружины, сосредоточения массы, демпферы (рис. 4.10).

Важной особенностью оболочных элементов является их реализация в деформированной и недеформированной формах. В виде абсолютно твердого тела (rigid body). К такому твердому телу можно присоединить другие узлы, сосредоточенные массы, пружины и амортизаторы. Пружины и амортизаторы могут иметь поступательные или вращательные степени свободы, с

возможностью задавать много опций поведения элементов, например, произвольное нелинейное поведение конечных элементов с блокировкой и разделением их соединений. Объемные элементы в программе LS-DYNA могут быть заданы 4-, 8- или 10-узловыми элементами. Применяются линейные (первого порядка) и параболические (второго порядка) конечные элементы (рис. 4.11).

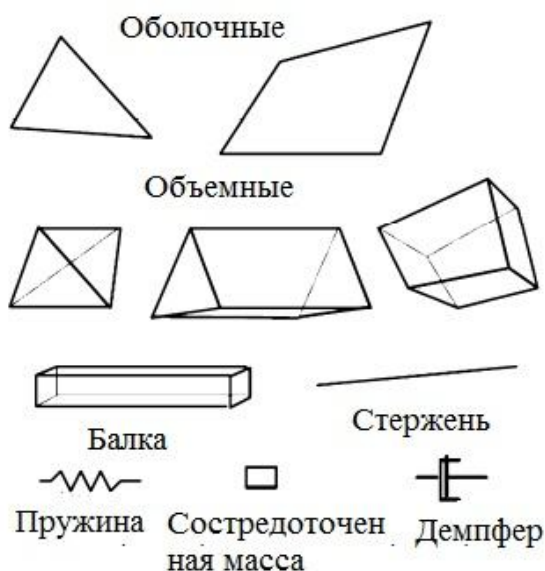


Рисунок 4.10 - Конечные элементы реализованные в программе LS-DYNA



Рисунок 4.11– Порядок конечных элементов

Линейные элементы имеют линейные стороны и узлы только в вершинах элемента. Поэтому минимальное количество узлов 3D-элемента равен 4. Параболический КЭ имеет дополнительные узлы на каждом из ребер. Именно благодаря этому стороны элемента могут быть криволинейными (параболическими). При равном количестве элементов параболические

элементы дают большую точность вычислений, так как они более точно воспроизводят криволинейную геометрию модели и имеют более точные функции формы. Однако расчет с применением конечных элементов высоких порядков требует больших вычислительных ресурсов и большего машинного времени. Близкую к параболическим точность имеют 4-узловые мембранные и 8 - узловые объемные КЭ, но для их вычислений необходимо значительно меньше ресурсов. Именно поэтому параболические элементы с 6 и 10 узлами не нашли широкого применения в пакете LS-DYNA. С другой стороны, в случае больших пластических деформаций тетраэдрические (4-узловые объемные) и треугольные (3-узловые мембранные) конечные элементы приводят к значительной потере точности по средствам так называемого «объемного запираения» КЭ («volumetric locking»), и поэтому также не используются для решения упругопластических задач в LS-DYNA [100]. В связи с такими ограничениями наиболее используемыми типами элементов является 4 - узловой мембранный элемент и 8-узловой объемный элемент (элемент-брусоч). Следует также отметить, что в LS-DYNA реализованы несколько схем интегрирования напряжений внутри 8-узлового объемного элемента: 1-точечная схема и 8-точечная схема, которые предполагают соответственно 1 и 8 квадратурных точек. Преимущество 1-точечной схемы (подинтегральных КЭ) заключается в ее низкой ресурсоемкости: вычисление его матриц требует в 8 раз меньше времени, чем вычисление матриц элемента с 8 квадратурной точками (полноинтегрированных КЭ). Вместе с тем иногда ресурсоемкость полноинтегрированных элементов может быть компенсирована его повышенной надежностью, и если их использовать экономно, то можно фактически увеличить общую скорость расчета. У элементов с 8 квадратурными точками в дополнение к большой ресурсоемкости есть и другой недостаток. полноинтегрированные элементы, используемые при решении задач пластичности и других задач, где коэффициент Пуассона приближается к 0,5, блокируются при восприятии изгиба с постоянным объемом. Чтобы исключить это блокирование, необходимо использовать при расчете средней по

всем объемом элемента давление. Если девиаторные напряжения будут незначительными по сравнению с давлением или, что еще хуже, если произойдет разрушение, которое вызывает исключение этих напряжений, то будут возникать ничем неограниченные без энергетические формы деформации сетки, которые не имеют физической природы, но значительно ухудшают численную устойчивость вычислительной процедуры.

Одним из наиболее важных этапов в конечно-элементном анализе является построение на виртуальной геометрической модели инструмента и заготовки сетки из конечных элементов. Известно два основных метода построения сетки: построение произвольной сетки (см. рис.4.12, а) и построение упорядоченной сетки (см. рис.4.12, б). Произвольная сетка может быть построена автоматически, например, с помощью средств ANSYS или COSMOSWORKS, при этом соседние элементы могут существенно отличаться по размерам и форме.

Произвольная сетка строится путем деления геометрических элементов модели на некоторое количество частей определенной геометрической формы, причем соседние элементы мало отличаются друг от друга по форме (рис. 4.6, б). В автоматически построенных сетях с большим количеством элементов количество узлов преобладает над количеством элементов. Отношения между узлами и элементами может достигать 2:1 для плоских произвольных сеток и 6:1 -для произвольных трехмерных сеток с четырехгранными элементами.

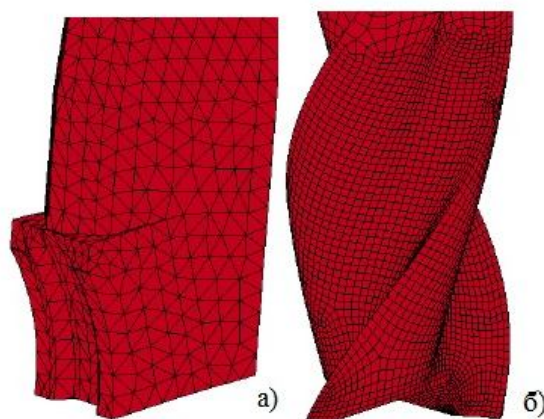


Рисунок. 4.12 – Примеры реализации произвольной (а) и упорядоченной (б) конечно – элементной сетки

Очевидно, что чем меньше линейный размер конечного элемента  $L_e$ , тем большее количество элементов в модели. При этом время вычислений экспоненциально возрастает, а погрешность анализа уменьшается. Однако погрешность уменьшается не до нуля, так как с увеличением количества элементов накапливаются погрешности округления в ЭВМ [101].

Практика расчетов с применением метода КЭ позволяет дать следующие рекомендации: упорядоченная сетка является более приемлемой, чем произвольная сеть, сетка треугольных элементов с промежуточными узлами имеет по крайней мере ту же точность, что и сетка прямоугольных элементов с 4 узлами. Необходимо помнить, что МКЭ - приближенный метод, точность которого зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Так, например, более частая сетка нужна в том случае, когда ожидается большой градиент деформаций или напряжений, например, в области условной плоскости сдвига и на контактной границе. В то же время более редкая сетка может применяться в зонах с более или менее постоянными деформациями или напряжениями, а также в областях, которые не представляют особого интереса, т.е. на внешних границах заготовки или инструмента.

Анализ литературы показал, что для реализации КЭ - моделей процесса резания в лагранжевых формулировке важным вопросом является метод реализации разрушения, от свойств которого зависят локальные значения напряжений в зонах первичной и вторичной деформаций, форма стружки, проекции силы резания и особенно сила на задней поверхности, другие показатели процесса, а также обобщенность модели процесса резания в целом. Например, каким бы общим не был критерий разрушения, реализующей конкуренцию между двумя простыми критериями в напряжениях и деформациях, его реализация разделением узлов на предварительно заданной границы не позволит спрогнозировать образование элементов стружки .

В общем случае существует четыре принципиально разные реализации разрушения: разделением узлов на предварительно заданной границы,

разделением узлов вдоль произвольной границе (метод трещины), удалением элементов и перестроением КЭ - сетки. Перестройка сетки (r-адаптация) позволяет исключить необходимость задания границы разрушения между срезанным слоем и заготовкой и постоянно поддерживать низкий уровень искажений КЭ - сетки. Это обеспечивает получение более общего решения, в т.ч. и с округленной режущей кромкой. Вместе с тем последние исследования показали погрешность и такого подхода, что проявляется в не правильном прогнозировании направления трещины в области режущей кромки искривлением внешней границе и потерей контакта на задней поверхности лезвия. За критерий инициации повторного построения КЭ - сетки используют только геометрические критерии, которые базируются или на величине искажения КЭ-сетки, или предусматривающие регулярное перестроение через заданный путь перемещения лезвия. Перестроение КЭ - сетки может использоваться как метод реализации разрушения как самостоятельно, так и вместе с методом трещины и удаление элементов.

Следует обратить внимание на моделирование элементной стружки, которое может происходить или в результате хрупкого разрушения, или в результате локализованного сдвига. В отличие от поверхности резания границы элементов не могут быть спрогнозированы заранее. Поэтому для моделирования могут применяться методы трещины или удаление элементов, а в случае локализованного сдвига - перестроения КЭ - сетки

Анализ чувствительности показателей процесса резания критерию разрушения исследовали L.W Meyer и др., Y. B. Guo и C. R. Liu, S. Hovel и другие. В этих работах показано, что модель разрушения наибольшей степени влияет на форму стружки, тангенциальную и радиальную проекции силы резания, градиент напряжений в зоне резания, в меньшей степени оказывая влияние на температуру резания. От выбора модели разрушения также зависит численное постоянство решения.

Для решения задач исследования была создана КЭ – сетка моделей резания. Для этого использовалась система конечно-элементного анализа

ANSYS V12. [77] При создании КЭ - сетки размер ячейки следует выбирать равным наименьшему элементу модели, в нашем случае, поскольку диаметр карбоновых волокон колеблется в пределах 8-12 мкм, принимаем размер ячейки 10 мкм. Для ускорения расчета и экономии ресурсов вычислительного оборудования было принято решения о дифференциации размера КЭ – сетки для инструмента и заготовки. То этой причине КЭ – инструмента были приняты равными 50 мкм. Также было учтен тот факт, что в рамках нашего эксперимента нам не был важен ни износ, ни деформации инструмента.

Система конечно-элементного анализа ANSYS V12 позволяет генерировать экспортный файл для препроцессора LS-DYNA LS-PrePost-3.2, в котором задаются дальнейшие параметры технологической системы рис. 4.13. Использование инструментов формирования конечно – элементной сетки предлагаемых в ANSYS V12, позволило сформировать во всем объеме исследуемой заготовки набор элементов кубической формы с четырьмя узлами в вершине каждой из граней.

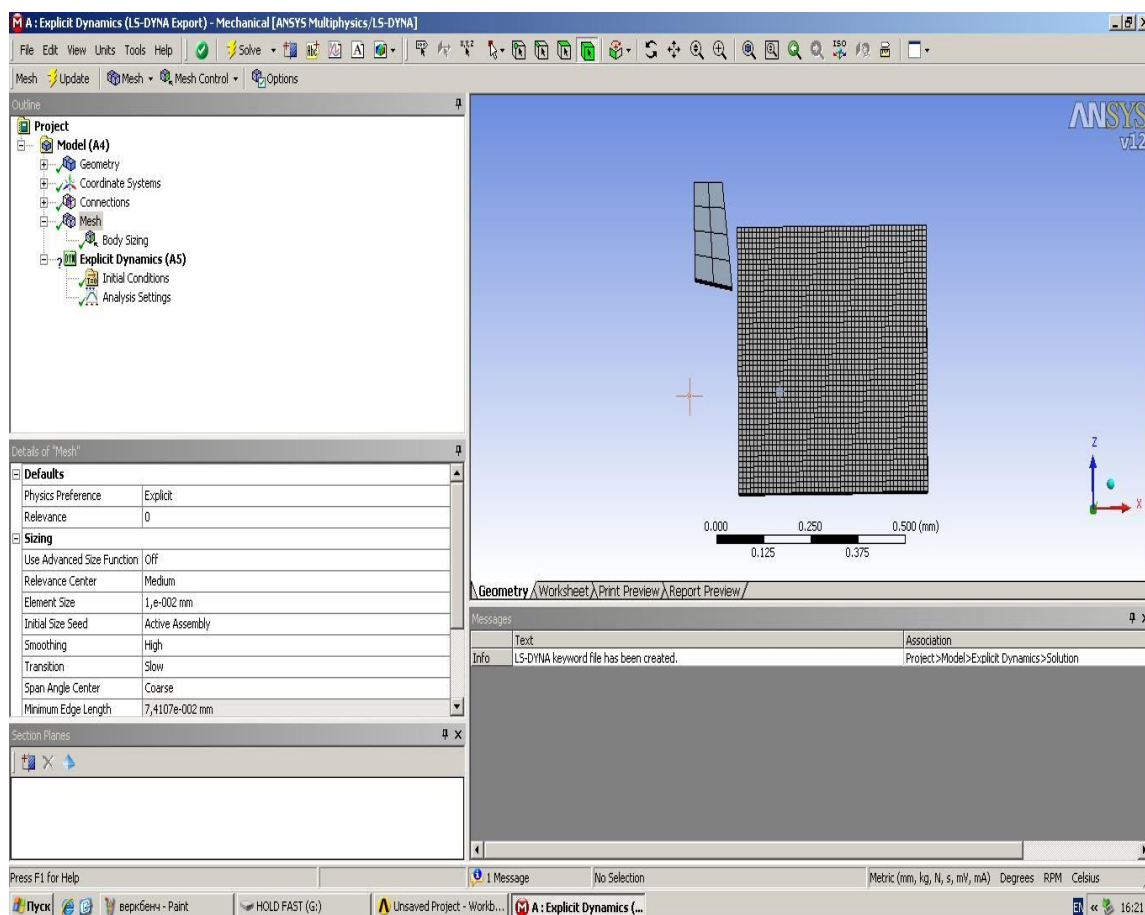


Рисунок 4.13 - Создание КЭ сетки



Созданная в ANSYS V12 была импортирована в LS-DYNA LS-PrePost - 3.2 для последующих преобразований. Исходный объект был последовательно разделен на двухкомпонентный материал (рис. 4.14). Путем последовательного задания ряду конечных элементов свойств углеродного волокна. Так на рис. 4.14 желтым выделена группа рядов КЭ которым уже присвоены механические свойства углеродного волокна, а выделенные полупрозрачным является группа рядов КЭ которым будет присвоены механические свойства углеродного волокна. Таким образом, был обработан весь объем заготовки.

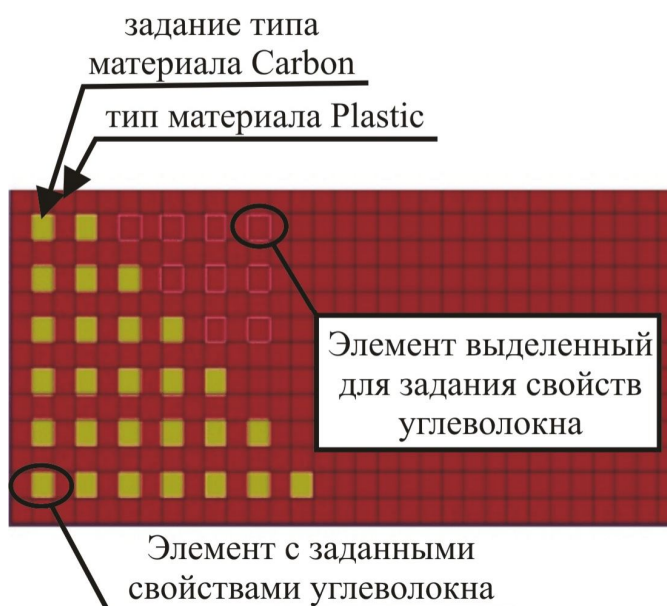


Рисунок 4.14 – Задание свойств углеволокна и матрицы группам КЭ

Описанная выше последовательность действий позволила получить совокупность рядов углеродного волокна и матрицы (рис. 4.15).

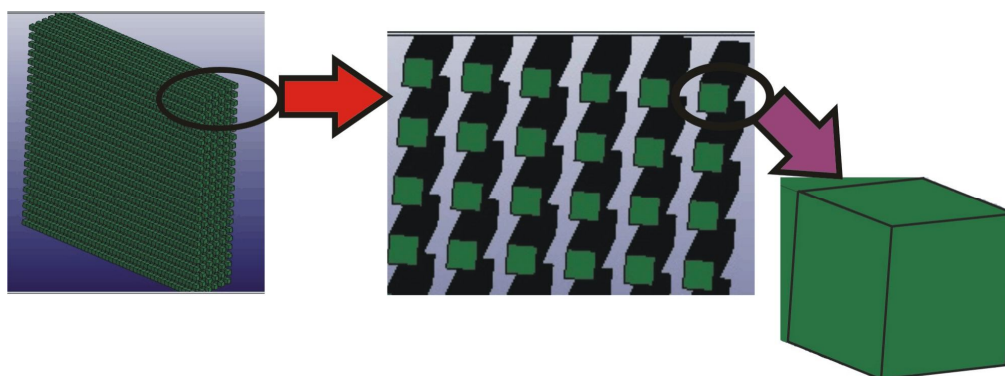


Рисунок 4.15– Структура конечно-элементной сетки

Задание граничных условий - один из ответственных этапов конечно-элементного анализа. Так, например, в модели, показанной на рис. 4.16, графически изображены граничные условия в узлах A и B, которые правят для того, чтобы перемещение (скорость или ускорение) указанных узлов модели соответствовало перемещением (скоростям или ускорением) тех же узлов натурной конструкции с учетом наложенных на них связями ограничений.

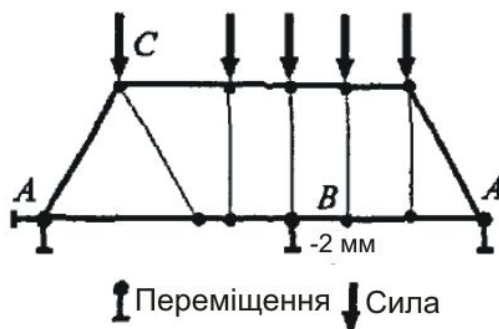


Рисунок 4.16 - Пример граничных условий

При этом перемещение (скорости или ускорения) могут приобретать как нулевые (в узле A), так и ненулевые (в узле B) значения. Существуют также граничные условия, при которых задается нагрузка (узел C) в виде сосредоточенных сил или распределенной нагрузки.

Необходимо обратить особое внимание на то, что количество граничных условий должна быть минимально необходимой (не меньше и не больше). Так, например, не следует фиксировать все степени свободы (все перемещения) в каждом узле элемента; не нужно также прикладывать силу в узле в том же направлении, в котором в данном узле зафиксирован узел. Выбор размеров элементов и граничных условий при построении сетки можно существенно упростить, если учесть принцип Сен-Венана: две статически эквивалентные системы сил создают то самое поле напряжений на расстоянии от их точек приложения, большей, чем характерный линейный размер поперечного сечения. Рассмотрим такую ситуацию. Известно, что чрезмерно большие растягивающие напряжения является основной причиной многих разрушений. В этом случае, если зона максимальных растягивающих напряжений находится

на достаточно большом расстоянии от точки приложения силы, то, исходя из принципа Сен-Венана, нет необходимости строить подробную сетку элементов вблизи этой точки.

Функцией \*BOUNDARY задается движение режущего клина вдоль оси X при этом, используя опцию \*PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID, которая предназначена для задания движения абсолютно твердых тел.

Задаваемые параметры:

ID = 1- идентификатор опции;

TITLE = move tool - название идентификатора;

PID = 2 – идентификатор детали (деталь 2- инструмент);

DOF = 1 – используемы степени свободы (1 – движение вдоль оси X);

VAD = 0 - определение задаваемого параметра движения (0- скорость);

DEATH =  $10^{28}$  – время, через которое снимается заданное движение.

Для решения задачи моделирования процесса резания в условиях образования стружки и, следовательно, новых поверхностей, не определенных на этапе создания модели, в некоторых случаях можно получить устойчивое решение контактной задачи с помощью алгоритма \*ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE, преимущество которого является возможность задания обобщенной зависимости  $\mu_d = \mu_d(v, p)$  где  $p$  - контактное давление, путем задания таблице соответствующей функции в карте \* DEFINE\_TABLE и ссылки на нее в параметре FD при FS = 2,0. Контактное взаимодействие было реализовано моделью \*ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE (рис.4.17):

Задаваемые параметры:

SSID = 2 – идентификатор подчиненного сегмента (2- заготовка);

MSID = 3 - идентификатор главного сегмента (3- инструмент);

На основе анализа работ [88, 92] коэффициент трения принимаем равным 0,5.

Методом проб и ошибок было установлено, что устойчивое решение достигается при величине коэффициента уменьшения шага интегрирования не более 0,5.

Во вкладке \*MAT рис. 4.17 задаются модели материала, так например, для инструмента мы выбираем модель \*RIGID, так как инструмент был принят абсолютно твердым, не деформируемым телом. Задание таких характеристик обусловлено тем, что на данном этапе эти данные не являются критически важными.

1	MID	RO	E	PR	II	COUPLE	M	ALIAS
1	1	9.800e-009	4.200e+005	0.3000000	0.0	0	0.0	
2	CMO	CON1	CON2					
2	0.0	0	0					
3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3		
3	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Рисунок 4.17 - Параметры ключевого слова \*MAT\_RIGID

Задаваемые параметры:

MID = 1- идентификатор детали;

TITLE = for tool - название идентификатора;

RO = 9800 кг/м<sup>3</sup> – плотность материала инструмента (для твердосплавного инструмента);

E = 420 ГПа – модуль Юнга;

PR = 0.3 – коэффициент Пуассона.

Модель \*\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY (рис. 4.18) может применяться для моделирования процесса резания на низких скоростях резания, когда можно пренебречь температурным снижением прочности обрабатываемого материала. Параметры модели могут быть получены испытаниями по ГОСТ 1497. Если нет других достоверных данных, то эта модель является первым приближением при решении любой задачи моделирования процесса резания. Для этой опции характерно задание соотношения между пластическими деформациями и пределом текучести.

Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_(TITLE) (024) ( 1 )

TITLE  
for plastic

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	4	1.900e-006	315.00000	0.2000000	0.0	0.0	0.1500000	0.0

2	C	P	LCSS	LCSR	VP
	0.0	0.0	0	0	0.0

3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0180000	0.0540000	0.0730000	0.0920000	0.1120000	0.1320000	1.0000000

4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.1020000	0.2320000	0.2900000	0.3150000	0.3350000	0.3450000	0.3460000	0.4000000

Рисунок 4.18 - Параметры ключевого слова \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY

Задаваемые параметры:

MID - идентификатор детали;

TITLE - название идентификатора;

RO = 15300 кг/м<sup>3</sup>, плотность материала инструмента;

E = 315 МПа модуль Юнга;

PR = 0.20 коэффициент Пуассона;

ES – напряжение течения с графика кривой упрочнения

EPS – логарифмическая деформация (соответственно напряжению)

Для волокна задаем модель материала \*ELASTIC рис. 4.19. Эта функция предназначена для описания поведения упругого материала..

Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

\*MAT\_ELASTIC\_(TITLE) (001) ( 1 )

TITLE  
for carbon

1	MID	RO	E	PR	DA	DB	NOT USED
	5	1.400e-006	45.000000	0.2300000	0.0	0.0	0

Рисунок 4.19 - Параметры ключевого слова \*MAT\_ELASTIC

Задаваемые параметры:

MID - идентификатор детали;

TITLE - название идентификатора;

RO = 1400 кг/м<sup>3</sup>, плотность материала инструмента;

E = 45 МПа модуль Юнга;

PR = 0.23 коэффициент Пуассона;

Опция \*BOUNDARY\_SPC\_NODE предполагает задания ограничений по степеням свободы для одного узла. Обычно это ключевое слово не используют для закрепления абсолютно твердого инструмента, хотя это и возможно. В каждом из полей "DOF" ставят «1» против той оси, где необходимо ограничение степени свободы, и «0» - там, где ограничений нет. Опция \*BOUNDARY\_SPC\_SET отличается от предыдущего тем, что выполняет ограничения степеней свободы для нескольких узлов, ограниченных в списке \*SET\_NODE. Поскольку количество узлов большое, то список удобно формировать выделением узлов прямоугольным параллелепипедом, задаваемы опцией \*DEFINE\_BOX, с использованием опции \*SET\_NODE\_GENERAL «options = BOX». Прямоугольный параллелепипед задается координатами своих диагональных узлов. Таким образом, при помощи опции «SPC» заготовка была лишена шести степеней свободы. Для исследуемой нами модели граничные условия заданы жестким защемлением заготовки по основанию (рис. 4.20). На боковых границах заготовки было задано ограничение на перемещение по нормали к ней. Следующим шагом стало задание скорости движения инструмента. Используя параметр «LCID» опции \*BOUNDARY, где в ячейки A1 и O1 задаться скорость по абсциссе и ординате соответственно. Поскольку перемещение режущего инструмента ограничивается поступательным движением вдоль оси X, в ячейку O1 вписываем 600, что соответствует скорости в 10м/с, согласно справочнику для твердосплавного инструмента.

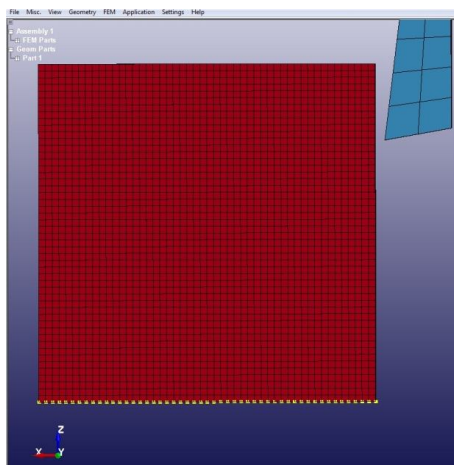


Рисунок 4.20 - Наложение граничных условий на заготовку с помощью опции «SPC»

При задании скорости резания идентификационный номер «LCID» импортируется во вкладку \*BOUNDARY. Как следствие, формируется связь между скоростью и направлением движения.

После ввода всех параметров в препроцессоре модель полностью готова к проведению виртуального эксперимента.

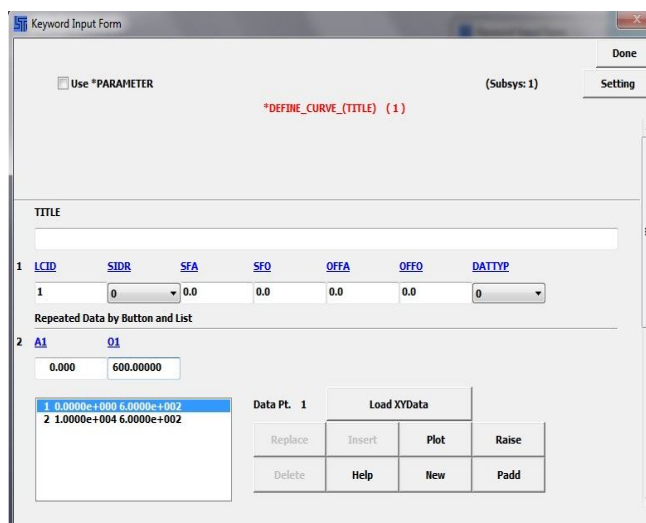


Рисунок 4.21 - Задание скорости режущего инструмента

Для проведения обработки файл, с моделями сохраненный в формате «.k» переносится в систему конечно-элементного анализа LS-DYNA (Приложение 3). Для этого выбирается каталог с указанным файлом и непосредственно сам файл. После чего для запуска расчета нажимается кнопка «Run» и система автоматически проводит расчет (Приложение А).

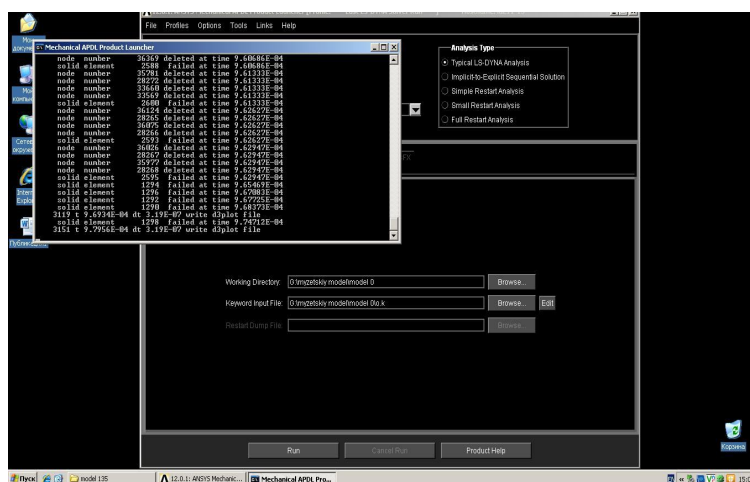


Рисунок 4.22 – Расчет моделей в системе конечно-элементного анализа LS-DYNA

По завершению расчета системой в выбранном ранее каталоге сохраняются файлы с результатами обработки, которые настроены на работу в постпроцессоре LS-PrePost-3.2.

Для определения механизма разрушения ВПКМ при обработке лезвийным инструментом при различных углах направленности волокон  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ . Были созданы, конечно - элементные модели резца и заготовки. Обработка выполняется режущим клином с передним углом  $\gamma=7^\circ$  и передним  $\alpha=10^\circ$ . Толщина срезаемого слоя составляет 0,1 мм. Определение силы резания выполнялось во всех точках исследуемой области. План виртуального эксперимента приведен в таблице:

Таблица 4.1 - План виртуального эксперимента

ρ, мм	V, м/хв	θ, град	γ, град	α, град	Участки заготовки							
					1		2		3		4	
					$Pzmi$ $n, H$	$Pzm$ $ax, H$	$Pzmi$ $n, H$	$Pzm$ $ax, H$	$Pzmi$ $n, H$	$Pzm$ $ax, H$	$Pzmi$ $n, H$	$Pzm$ $ax, H$
0,05	30	0	7	10	0	10	10	160	160	180	-30	45
		45			0	0	130	0	130	-35	40	
		90			0	0	10	160	70	160	-40	120
		135			0	0	0	130	40	140	0	40



На рис. 4.23 проиллюстрирована работающая модель резания ВПКМ для образца с углом ориентации волокон  $45^\circ$ , результаты моделирования для других образцов (см. приложения Б). На первом этапе режущая кромка только касается поверхности. На этапе 2 режущие кромки начинают резание слоя ВПКМ, что показано на графике ниже ростом силы резания. Третий этап характеризуется стабильной работой инструмента и колебанием сил резания в пределах от 80 до 130 Н/мм. Осевая сила сохраняется неизменной вплоть до уменьшения толщины обрабатываемого слоя и начал четвертого этапа. Четвертый этап характеризуется окончанием процесса резания и выходом режущего клина из материала.

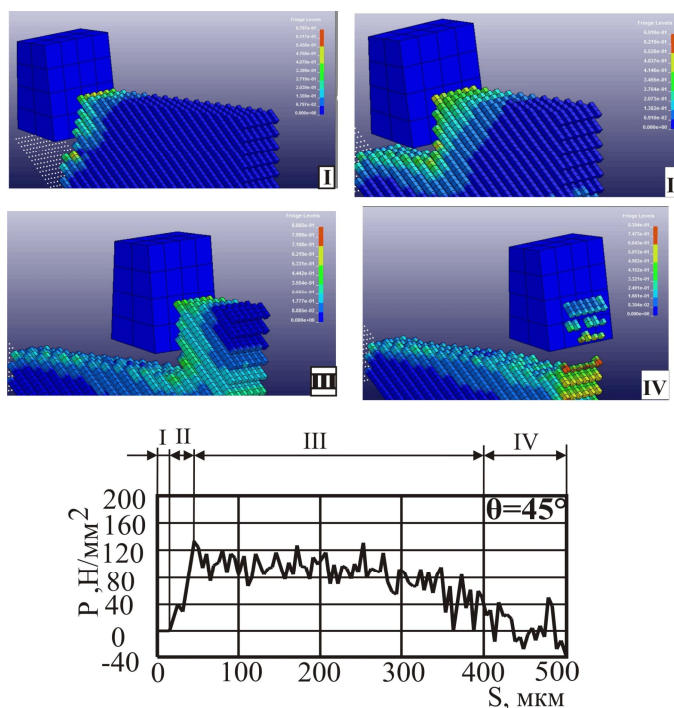


Рисунок 4.23 – Модель резания ВПКМ с углом направленности волокон  $45^\circ$

Обработка результатов моделирования процесса прямоугольного резания ВПКМ позволяет сделать следующие выводы:

1. Используя метод конечных элементов разработана модель процесса резания при сверлении в главной секущей плоскости главной режущей кромки. Модель разработана на микромеханическом уровне: матрица и волокна рассматривались как отдельные материалы с различными определяющими уравнениями, уравнениями и критериями разрушения.

2. Разработаны методики и проведены экспериментальные исследования механических свойств матрицы и волокон путем испытаний материалов на растяжение-сжатие. По результатам испытаний установлены определяющее уравнение и критерии разрушения матрицы и волокон.

3. Проведены пробные расчеты с помощью модели, которые показали работоспособность модели и возможность определения силы резания, глубины повреждения поверхностного слоя и вытягивания волокон. Время выполнения одного расчета составляло 1-2 часа.

### **4.3 Проверка адекватности модели**

Практическое применение прогнозирующих моделей рабочих процессов резания эффективно тогда, когда обеспечивается решения поставленной задачи исследования и / или оптимизации рабочего процесса в срок, значительно короче срока, необходимого для проведения экспериментальных исследований. Исходя из того, что проектирование модели связано с выполнением целого ряда этапов, на каждом из которых тратится время и вводится в модель некая погрешность.

Одной из главных проблем реализации конечно – элементных моделей является достижение их достоверности. Это обусловлено как систематической погрешностью самой модели, так и вероятными отклонениями самого процесса резания и всех его параметров от номинальных величин. В современной инженерной практике погрешность прогнозирования показателей различных процессов на уровне 20% считается вполне удовлетворительной. Но это экспертная величина. Как и формальные критерии достоверности прогнозирующих моделей процесса резания, современная теория резания дает ответа. Поэтому в работе использовалась методика формальной оценки достоверности, опираясь на общие положения теорий дифференциальных уравнений, регрессионного и дисперсионного анализов.

Как для любой математической модели, прогнозирующие конечно-элементной модели рабочих процессов резания присущи такие источники погрешностей:

- систематические погрешности математической модели;
- вероятностные погрешности исходных данных;
- систематические и вероятностные погрешности метода вычислений;
- вероятностные погрешности округления.

Систематические погрешности математической модели связаны с теми упрощениями и допущениями, которые введены в математическую модель для обеспечения ее решения, а также с теми неизвестными процесса, моделирование, которых всегда существует при описании реальных физических процессов. Комплекс допущений вносит систематическую погрешность в разработанную конечно-элементную модель. Однако следует отметить, что принятые допущения с разной степенью влияют на показатели процесса резания. Например, допущение о постоянном коэффициент трения на поверхности контакт существенно искажает распределение контактных нагрузок на контактной поверхности режущего лезвия, но при правильном выборе может совсем не влиять на величину проекций силы резания. Поэтому для каждого уровня детализации приемлемы различные допущения, которые дают, возможно, существенную систематическую погрешность в показателях процесса, не являются предметом исследований на этом уровне детализации, и не приемлемы другие, которые значительно увеличивают отклонения значений исследуемых показателей от реальности. Приемлемый уровень систематической погрешности определяется в зависимости от задач исследования. Если исследуются общие тенденции процесса, то от систематической погрешности требуется ее неизменность во всем исследуемом диапазоне факторов. Если же исследуются абсолютные значения прогнозируемой величины, систематическая погрешность считается приемлемой, если отклонение среднего значения прогнозируемого показателя отклоняется от экспериментальных данных только в пределах погрешности

эксперимента. Вероятностные погрешности исходных данных обусловлены случайными отклонениями свойств обрабатываемого и инструментального материалов, микрорельефа контактных поверхностей лезвия, его геометрии, свойств станка и т.п.. Учесть все фактические значения параметров системы резания практически невозможно. Кроме того, конечная жесткость технологической системы всегда приводит к колебаниям и отклонений мгновенных значений показателей процесса резания от их средних величин. Поэтому между результатами прогнозирования и экспериментальными данными всегда существует случайное отклонение, которое предопределяет минимальное достижимую погрешность прогнозирования. Ее количественная величина обусловлена среднеквадратичным отклонением воспроизведения эксперимента и среднеквадратичным отклонением воспроизведения результатов прогнозирования по причине случайного распределения исходных данных.

Прогнозирующие модели нелинейных динамических процессов пластического деформирования базируются на фундаментальных уравнениях теории пластичности, разрушения и теплопроводности. Для их решения в общем случае применяются численные методы, которые по своей природе предполагают наличие некоторой погрешности обусловленной дискретизацией пространства и времени, погрешностями решения уравнений, погрешностями пренебрежение членов высоких порядков малости т.д.. Это обуславливает появление систематических и вероятностных погрешностей метода вычислений. Погрешности, связанные с численным решением систем уравнений, обычно менее значимые, чем перечисленные выше источники погрешностей. Но параметры алгоритмов расчета могут существенно влиять как на эти ошибки, так и на время вычислений.

Погрешности округления свойственные всем современным ПЭВМ по причине, заранее неточного представления действительных чисел в памяти ПЭВМ. Погрешность представления значения  $a$  составляет для арифметики одинарной точности около  $10^{-7} a$ , для арифметики двойной точности - около

$10^{-16}a$ . Итак, понятно, что при большом количестве итераций погрешность может накапливаться. Поэтому следует ожидать увеличения погрешности расчета или даже потерю устойчивости вычислительной процедуры при количестве итераций  $\rightarrow 10^7$ , для арифметики с одинарной точностью и  $\rightarrow 10^{16}$  для арифметики двойной точности.

Вместе с тем для большинства задач арифметика с одинарной точностью приемлема, что позволяет сократить время расчетов практически в два раза за счет меньшей вычислительной стоимости арифметики с одинарной точностью.

Проверка адекватности задания граничных условий и механизмов разрушения возможно при помощи качественных и количественных критериев.

Под качественной адекватностью в отчете понимают соответствие тенденции изменения спрогнозированных и реальных значений показателей процесса резания с изменением условий резания. Следовательно, необходимо исследовать корреляционная связь между экспериментальными данными и данными моделирования. К сожалению, рассчитывать на то, что количество экспериментальных исследований будет достаточно велика, нельзя. Но вполне корректно предположить, что и данные эксперимента и данные моделирования распределены по нормальному закону. Для этого случая относительно высокую степень приближения нормального распределения при малых значениях коэффициента корреляции  $r$  позволяет получить простой критерий проверки гипотезы  $r = 0$ , т.е. гипотезы об отсутствии корреляционной связи между исследуемыми показателями процесса резания [102], исходя из того, что

величина  $t^{(r)}(n-2) = \frac{|\hat{r}|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{r}^2}}$  при  $r = 0$  распределена по закону Стьюдента с  $n - 2$

степенями свободы. Если выполняется условие

$$\frac{|\hat{r}|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{r}^2}} \leq t_{\alpha}(n-2) \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  - уровень значимости;  $n$  - количество опытов;  $r$  - выборочное значение коэффициента корреляции,

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mathfrak{R}_i - \bar{\mathfrak{R}})(\mathfrak{R}_i^{расч} - \bar{\mathfrak{R}}_i^{расч})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\mathfrak{R}_i - \bar{\mathfrak{R}})^2 \sum_{i=1}^n (\mathfrak{R}_i^{расч} - \bar{\mathfrak{R}}_i^{расч})^2}}, \quad (4.2)$$

,то гипотеза об отсутствии корреляционной связи должна быть принята. Обратное этому условию условие подтверждает наличие корреляционной связи между исследуемыми показателями процесса при небольших  $n$ . Учитывая необходимость одинакового характера тенденции взаимного изменения экспериментальных и расчетных данных, обеспечивается условием  $r > 0$ , критерий качественной адекватности может быть сформулировано в виде критерия подтверждения гипотезы о значимости коэффициента корреляции:

$$\frac{|\hat{r}| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{r}^2}} \leq t_{\alpha}(n-2) \cap \hat{r} \geq 0 \quad (4.3)$$

Важно отметить, что для подтверждения качественной адекватности модели в общем случае не требуется проведения экспериментальных и расчетных исследований в абсолютно одинаковых условиях. Относительно подтверждения адекватности модели процесса резания, этот факт дает возможность оценить достоверность модели, когда невозможно или экономически невыгодно проводить экспериментальные исследования в тех условиях, при которых осуществляется моделирование. Должны сходиться только значения параметра, влияние которого исследуется.

Исходя из задач и условий проводимого нами исследования в качестве критерия качественной адекватности модели, была избрана адекватность по качеству поверхности (рис.4.23).

Исходя из того, что условия контактного взаимодействия в опытах, по которым получены фотографии поверхностей, известны лишь частично, контактное взаимодействие рассматривалось в упрощенной модели Кулона - Амонтон. Средний коэффициент трения определялся для каждого опыта отдельно по данным раздела 3 и соответствующих публикаций. Из приведенных примеров видно способность модели прогнозировать поверхностные повреждения ВПКМ при различных углах направленности

волокон. Можно увидеть, что характер поверхностных повреждений зависит от угла направленности волокон. Так, с изменением угла направленности волокон изменяется величина повреждений. Схожесть характера поверхностных повреждений при моделировании и эксперименте доказывает качественную адекватность модели [77].

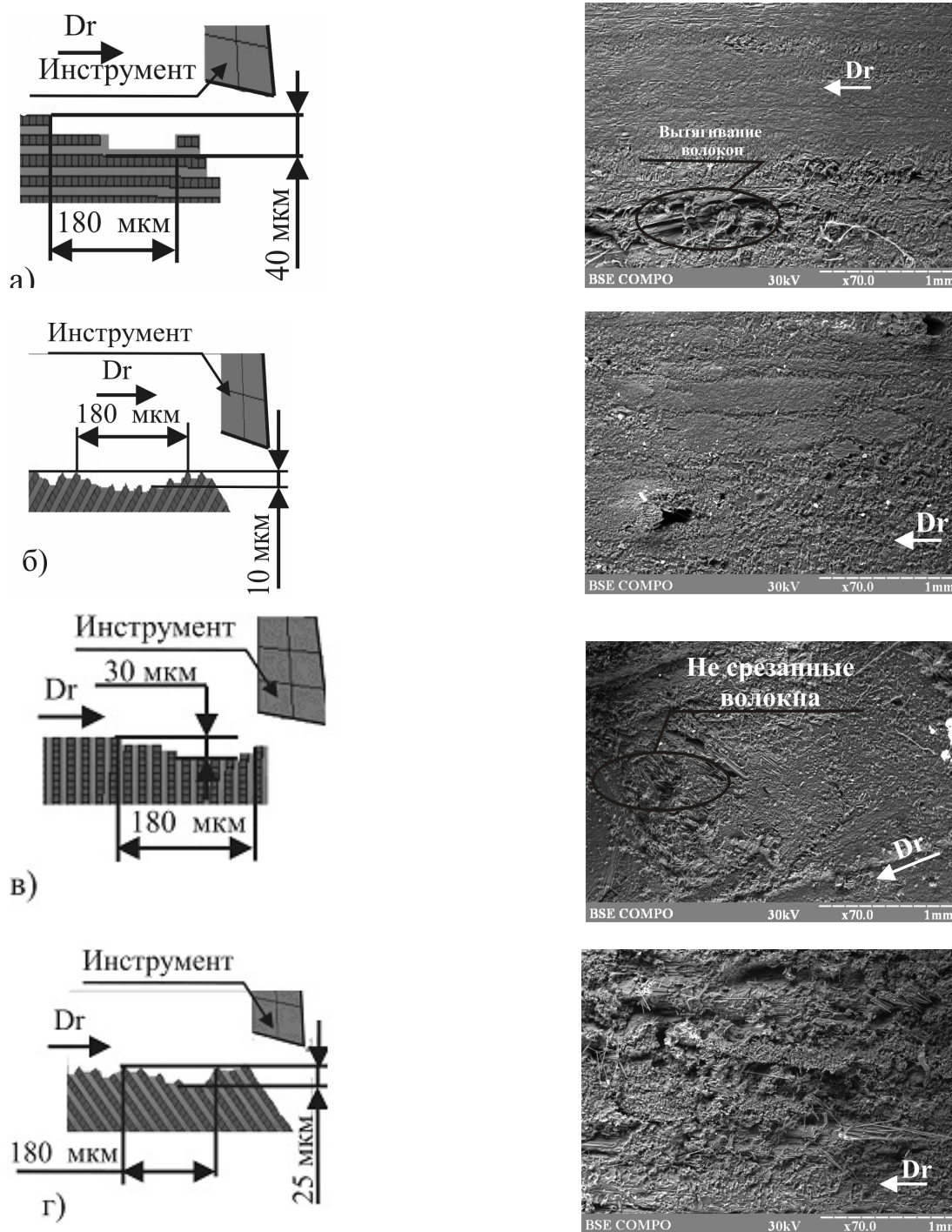


Рисунок 4.23 – Характер поверхностных повреждений ВПКМ (с лева - виртуальный эксперимент, справа – натурный эксперимент)

Процесс резания является процессом вероятностным. В каждом показателе процесса существует большая часть неопределенности. Среди основных факторов, которые способствуют этому, следует назвать вибрации, возникающие практически при всех условиях резания, и некоторую неопределенность исходных данных. Поэтому проверку количественной адекватности модели предложено выполнять путем доказательства гипотезы значимости остаточной дисперсии  $s_{\text{остат}}^2$  отклонения прогнозируемых значений изучаемого показателя от его экспериментальных значений по критерию Фишера:

$$\frac{s_{\text{остат}}^2}{\sigma_{\text{воспр}}^2} \leq F(\alpha, k, n), s_{\text{остат}}^2 = \frac{r \sum_{v=1}^n (\bar{\mathfrak{R}}_v - \mathfrak{R}_v^{\text{расч}})^2}{(k - n)}, \quad (4.4)$$

где  $\alpha$  - уровень значимости,  $r$  - количество повторений каждого из  $k$  натуральных опытов,  $m$  - количество факторов модели,  $n$  - количество модельных опытов,  $\bar{\mathfrak{R}}_v$  - групповое среднее значение показателя,  $\mathfrak{R}_v^{\text{расч}}$  - рассчитанное значение показателя.

Исходя из этого положения, допустимая абсолютная погрешность прогнозирования может быть оценена доверительным интервалом

$$\Delta_{\text{max}} = t_p(1 - \alpha, n - 1) \left( \frac{\sqrt{\sigma_{\text{воспр}}^2}}{\sqrt{r}} \right), \quad (4.5)$$

где  $t_p$  - функция распределения Стьюдента;  $\alpha$  - уровень значимости;  $r$  - количество повторений опыта, а относительная погрешность отношение -  $\frac{\Delta_{\text{max}}}{\mathfrak{R}}$ .

Погрешность воспроизведения зависит от двух факторов: погрешности экспериментального исследования по определению показателей процесса резания, по которому происходит доказательство достоверности модели, и погрешности определения исходных данных в опытах с механических и трибологических испытаний и т.д.. Учитывая большое количество параметров модели, должны быть определены, исходные данные перед началом расчета. Следует ожидать значительное влияние этой неопределенности на результат



прогнозирования. Для учета этой особенности предлагается определять дисперсию воспроизведения, сумму дисперсий двух независимых случайных величин: дисперсии воспроизведения эксперимента  $\sigma_{\mathfrak{R}_{воспр}}^2$  дисперсии воспроизведения расчета  $\sigma_{\mathfrak{R}_{воспр}}^2$ . Что обусловлено неопределенностью исходных данных:

$$\sigma_{воспр} = \sigma_{\mathfrak{R}_{воспр}}^2 + \sigma_{\mathfrak{R}_{воспр}}^2, \quad (4.6)$$

Учитывая выборочный характер проведения экспериментальных исследований дисперсия воспроизведения эксперимента могут быть рассчитаны по формуле [103]

$$\sigma_{\mathfrak{R}_{воспр}}^2 = \frac{\sum_{v=1}^k \sum_{i=1}^r (\mathfrak{R}_{vi} - \bar{\mathfrak{R}}_v)^2}{k(r-1)}, \quad (4.7)$$

где  $r$  - количество повторений каждого из  $k$  опытов.

Дисперсия воспроизведения расчета  $\sigma_{\mathfrak{R}_{воспр}}^2$ , обусловленная неопределенностью исходных данных, в свою очередь, также является суммой дисперсий  $m$  независимых случайных величин, соответствуют влияния неопределенностей каждого из исходных данных на результат прогнозирования. Следовательно, дисперсия воспроизведения расчета  $\sigma_{\mathfrak{R}_{воспр}}^2$  может быть определена по формуле

$$\sigma_{\mathfrak{R}_{воспр}}^2 = \sum_{i=1}^m \frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial x_i} \sigma_i^2. \quad (4.8)$$

Модель процесса резания, разработанная в этой работе, является совокупностью алгоритмов, реализующих решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Следовательно, определение производных может быть осуществлено только численно  $\frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial x_i}$  по следующему алгоритму [77]:

1. Определяют базовый комплекс условий обработки, для которых вычисляют погрешность прогнозирования, которая характеризуется исходными данными,  $x_i^o$  - первая точка.

2. Задается малый прирост исходных данных  $\Delta x_i$  (например, 1%).

3. Изменяя условия поочередно по каждому из  $m$  исходных данных, определяют  $m$  новым условиям обработки:

$$x_i^j = x_i^o + \Delta x_j (i = j), j = 1 \dots m$$

4. Выполняется моделирование по модели в условиях  $x_i^o$  и  $x_i^j$  и определяют величины исследуемых показателей  $\mathfrak{R}_i^o, \mathfrak{R}_i^j$ .

5. Рассчитывают приросты исследуемых показателей  $\Delta \mathfrak{R}_i^j = \mathfrak{R}_i^j - \mathfrak{R}_i^o$  и производные  $\frac{\partial \mathfrak{R}_i}{\partial x_i} = \frac{\Delta \mathfrak{R}_i^j}{\Delta x_i^j}$ .

Выполненные вычисления показали, что механизм формирования стружки при различной ориентации волокон различен. Так в модели с  $\theta=0^\circ$  было выявлено зарождение и развитие опережающей трещины, которая распространяется по границе раздела матрицы и волокна (рис.4.24). Воздействие лезвия на обрабатываемый материал распространяется перед режущей кромкой на 200 мкм. Об этом свидетельствует снижение удельной силы резания в диапазоне за 200 мкм до выхода инструмента (рис. 4.25). Формирование стружки происходит за счет отрыва срезаемого слоя от заготовки. Первичное разрушение материала происходит в матрице. Результаты показывают, что наименьшее воздействие лезвия на обрабатываемый материал в направлении главного движения наблюдается при угле направленности волокон  $\theta=135^\circ$  и составляет всего 100 мкм. Таким образом, создание таких условий на выходе инструмента из обрабатываемого материала обеспечит наименьшее повреждение кромки обработанной поверхности.

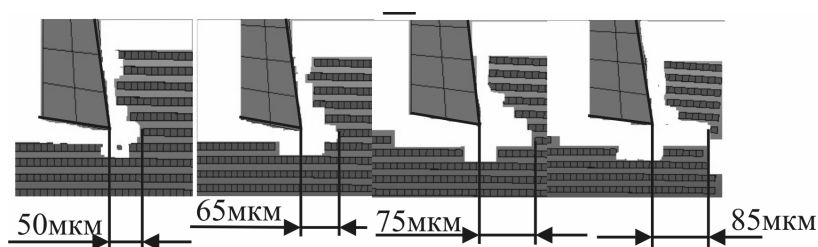


Рисунок 4.24 – Динамика формирования опережающей трещины при резании с  $\theta=0^\circ$

Стружкообразование при резании ВПКМ с углом  $\theta = 0^\circ$  происходит под действием сжимающих сил со стороны режущего клина, в то время как при резании образца с углом  $\theta = 135^\circ$  изгибающих с цикла нагружения. Так как накопления повреждений до разрушения во втором случае больше, то и амплитуда изменения силы больше.

Виртуальные эксперименты показали, что стружкообразование сопровождается периодическим разрушением обработанной поверхности (рис. 4.25 и 4.26). Хотя период повреждений по всем случаям составил примерно одинаков (около 180 мкм), глубина повреждения различалась. Наибольшая глубина повреждений зафиксирована при  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , т.е. при тех условиях, при которых сила резания максимальна. С другой стороны, наименьшая глубина повреждений соответствует углу направленности волокон  $\theta = 45^\circ$ , обеспечивающему наименьшую силу резания с наименьшей амплитудой (рис. 4.26).

Как уже упоминалось ранее направление укладки волокнистого наполнителя оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности. В п. 5.1 более подробно изложены результаты экспериментальной проверки полученных в ходе моделирования данных.

Следует отметить, что из-за изменения механизма разрушения с изменением угла направленности волокон изменяется амплитуда колебаний силы резания в цикле обработки. Наименьшая амплитуда наблюдается при  $\theta=0^\circ$ , наибольшая – при  $\theta=135^\circ$  (рис.4.27).

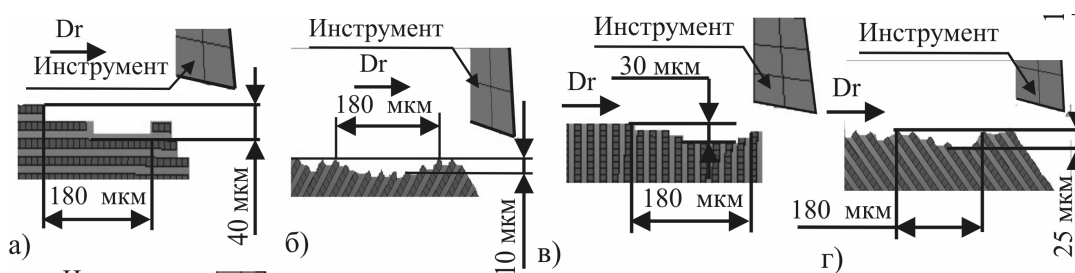


Рисунок 4.25 – Повреждения поверхности в зависимости от угла направленности волокон: а -  $\theta = 0^\circ$ ; б -  $\theta = 45^\circ$ ; в -  $\theta = 90^\circ$ ; г -  $\theta = 135^\circ$ .

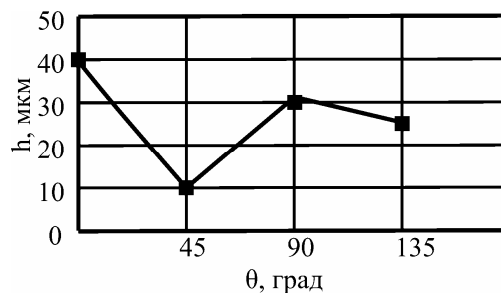


Рисунок 4.26 – Влияние угла направленности волокон  $\theta$  на глубину повреждения поверхности  $h$

Влияние угла направленности волокон на среднюю силу резания в целом повторяют тенденции выявленные Calzada K, Nayak D. (сравните рис. 4.1 с рис. 4.27). Настоящая модель не выявила значительных колебаний силы резания при  $\theta = 90^\circ$ , а значение силы при  $\theta = 90^\circ$  оказалось примерно равным значению силы резания при  $\theta = 0^\circ$ . Все это может быть следствием различия принятых в исследовании свойств обрабатываемого материала.

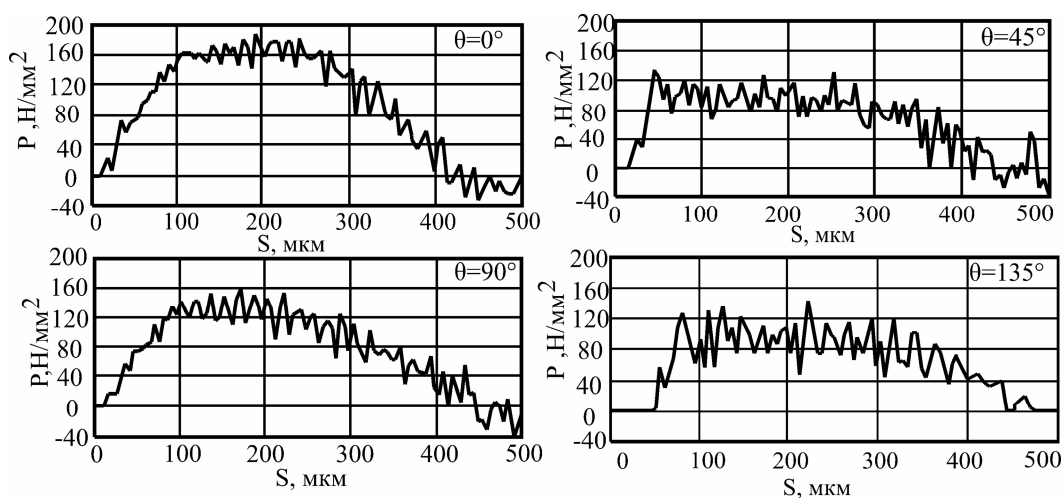


Рисунок 4.27 – Графики изменения удельной силы резания при различных углах направленности волокон ВПКМ

По итогам полученных результатов можно резюмировать, что используя метод КЭ разработана микромеханическая модель резания однонаправленного ВПКМ на эпоксидной основе с различными углами направленности волокон. Проведенные в пакете LS-DYNA модельные эксперименты показали соответствие полученных результатов расчета силы резания ранее опубликованным исследованиям.

Установлено, что угол направленности волокон влияет на среднюю величину силы резания, амплитуду ее колебаний, глубину воздействия лезвия на срезаемый слой в направлении главного движения, глубину повреждений поверхности резания. Наименьшее воздействие в направлении главного движения резания выявлено при угле направленности волокон  $135^\circ$ , а наименьшая глубина повреждения обработанной поверхности – при угле направленности волокон  $45^\circ$ . Создание ВПКМ с углом направленности волокон  $135^\circ$  на выходе инструмента из поверхностного слоя ВПКМ может обеспечить наименьшее повреждение кромки этого слоя и, тем самым, повысить качество обработанного изделия

#### **4.4 Выводы**

1. Несмотря на то, что методы исследования прочности ВПКМ с применением метода конечных элементов уже хорошо развиты, в настоящее время работы по созданию конечно-элементных моделей процессов резания ВПКМ только начинаются. Разработаны микромеханические, мезомеханические и макромеханические модели. Вместе с тем в опубликованных работах практически не уделяется внимания исследованию моделей на чувствительность к скорости резания и подаче, толщине среза, отрицательным передним углам и радиусам округления режущей кромки.
2. Используя метод конечных элементов разработана модель процесса резания при сверлении в главной секущей плоскости главной режущей кромки.

Модель разработана на микромеханическом уровне: матрица и волокна рассматривались как отдельные материалы с различными определяющими уравнениями, уравнениями и критериями разрушения.

3. Проведены пробные расчеты с помощью модели, которые показали ее работоспособность и возможность определения силы резания, глубины повреждения поверхностного слоя и вытягивания волокон. Время выполнения одного расчета составляло 1-2 часа.

## 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА И СМЕШАННЫХ ПАКЕТОВ

Влияние любого фактора на температуру резания необходимо рассматривать через его влияние на количество тепла, которое выделяется в зоне резания, что приводит к росту температуры, и на его количество, которое выводится из зоны резания, тем самым, уменьшая среднюю температуру. На температуру резания оказывают влияние те же факторы, что и на количество теплоты, выделяемое в системе резания

$$Q = P_z \cdot V \cdot \tau \quad (5.1)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$V$  – скорость резания, м/мин;

$\tau$  – время работы инструмента в зоне резания, мин

С увеличением  $V$  увеличивается мощность резания ( $P_z V$ ), а, значит, и мощность тепловых источников. Однако эта зависимость не прямо пропорциональная, так как при увеличении  $V$  составляющая  $z P$  снижается через уменьшение коэффициента усадки. Кроме того, уменьшается часть тепла, которая переходит в инструмент из-за уменьшения длины площадки контакта по  $A_\gamma$ , т.е. большая часть тепла уносится со стружкой. Поэтому рост  $T$  от  $V$  в дальнейшем замедляется.

С увеличением глубины резания  $t$  (или ширины срезаемого слоя –  $b$ ) сила резания, а, значит, мощность ( $P V$ ) растет почти прямо пропорционально, однако одновременно пропорционально увеличивается активная длина режущего лезвия и площадь контакта (рис. 5.1 *a*), через которую возрастает отвод тепла в тело инструмента. Поэтому с увеличением  $t$  средняя температура возрастает  $T, ^\circ\text{C}$  не значительно.

Под средней температурой резания  $T, ^\circ\text{C}$ , понимают среднюю температуру на поверхности контакта инструмента со стружкой и поверхностью резания.

Если обозначить средние температуры на контактных площадках  $l_1$  и  $l_2$ , как  $T_1, ^\circ\text{C}$  и  $T_2, ^\circ\text{C}$ , то средняя температура резания будет равна:

$$T = \frac{T_1 \cdot l_1 + T_2 \cdot l_2}{l_1 + l_2}, \quad (5.2)$$

При резании острым инструментом  $l_1 \approx 0$ , поэтому  $T_1 \approx T$ . Возникающая в зоне обработки температура может оказывать влияние на процесс резания из-за изменения свойств материала инструмента, обрабатываемого материала и условий взаимодействия на контактных площадках. При оценке влияния температуры на свойства обрабатываемого материала необходимо учитывать два фактора: продолжительность воздействия высокой температуры и скорость деформации. Закономерности, установленные в условиях статических испытаний, получаются после длительного прогрева образцов. Так как контактные площадки передней и задней поверхности инструмента нагреваются длительное время, закономерности изменения свойств инструментального материала в зависимости от температуры целиком применимы к режущему инструменту.

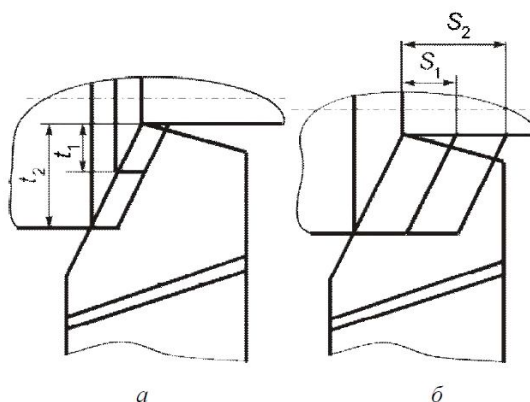


Рисунок 5.1 - Особенности влияния глубины резания (а) и подачи (б) на отвод тепла при резании

С увеличением подачи  $S$  (толщины срезаемого слоя – а)  $P_z$  возрастает, хотя не так сильно, как при росте  $t$ , а, значит, и возрастает мощность тепловых источников. Одновременно увеличивается площадь зоны контакта резца со стружкой. Однако, в отличие от случая с глубиной резания, этот участок концентрируется вблизи вершины – наиболее термически нагруженной зоны,



отвод тепла от которой более затруднен. Поэтому влияние подачи на температуру более сильное, чем глубины резания, хотя скорость роста отстает от скорости роста  $S$ .

В 1935 году М.Ф. Семко сформулировал положение о «существовании таких температур, в интервалах которых обрабатываемость металла является наилучшей».[104, 105]

В 1936 году В. Рейхель предложил методику определения стойкости резца и обрабатываемости материалов, согласно которой определенному периоду стойкости резца для пары инструмент–заготовка отвечает одна и та же температура резания, которая не зависит от комбинации элементов режима резания [106]. А.Д. Макаров [107] в своих работах указал на видимые недостатки положений В. Рейхеля и разработал теорию, согласно которой оптимальным скоростям резания ( $V_0$ ) для произвольной пары материалов инструмент–заготовка при разных комбинациях скорости резания, подачи, глубины и геометрии режущей части соответствует одна постоянная средняя температура в зоне резания. Под оптимальной скоростью понимают такую, которая отвечает максимуму пути резания или площади обработанной поверхности. При резании с такой скоростью наблюдается минимальная шероховатость обработанной поверхности, наилучшие свойства его поверхностного слоя и т.п. Из этого положения вытекает ряд важных выводов: точкам минимума кривых, выражающих зависимость интенсивности изнашивания от скорости резания при любых соотношениях остальных параметров процесса резания, соответствует одна и та же оптимальная температура резания, хотя уровень оптимальных скоростей резания может существенно колебаться.

## 5.1 Исследование влияния ориентации волокон на качество обработанной в углепластике поверхности

Исследование проводилось на станке 6P12. Закрепление и блокирование инструмента в шпинделе станка препятствовало его провороту. Базирование и закрепление образца было реализовано при помощи приспособления, смонтированного на столе станка. Движение образца осуществлялось продольным перемещением стола станка.

Исследование образцов после механической обработки было выполнено при помощи электронного микроскопа РЭМ 100У в лаборатории электронной микроскопии кафедры «Технологии машиностроения, станки и инструменты» Сумского государственного университета. За счет большой глубины резания при семидесятикратном увеличении появилась возможность обнаружить повреждения на обработанной поверхности, определить их геометрические параметры, такие как длина и ширина. Двухсоткратное увеличение было применимо для подробного осмотра дефекта и характера разрушения волокон, а также позволило получить подробную информацию о фрагменте зафиксированного ранее повреждения. Стружка, полученная в ходе обработки, была осмотрена при помощи стереоскопического микроскопа МБС-9. Были определены ее размеры.

При моделировании процесса резания под углом  $\theta=0^\circ$  и  $\eta=90^\circ$  было зафиксировано зарождение опережающей трещины и существенное вытягивание волокон до 40 мкм на участке длиной 180 мкм (рис.4.25а), сопровождаемое снижением удельной силы резания [23], в ходе экспериментальных исследований также было установлено наличие вытягивания волокон протяженностью в 1,5 мм и шириной 0,5 мм (рис. 5.1 в). Подробный осмотр обнаруженного дефекта позволил установить, что поверхность углубления, сформированного вытягиванием волокон, не однородная и изобилует большим количеством неровностей, надломанных и раскрошенных волокон. Наличие данных дефектов объясняется тем, что формирование стружки сопровождалось

межслоевым сдвигом, с малой величиной пластических деформаций, а показатели процесса резания при формировании такой стружки определяются свойствами ВПКМ и его способностью сопротивляться сдвигу в плоскости армирования. В результате механической обработки была получена элементная стружка с размером фрагментов от 2 до 5 мм (рис. 5.1б). В целом, полученные результаты подтверждают итоги моделирования для этой схемы обработки и согласуются с данными более ранних исследований [108].

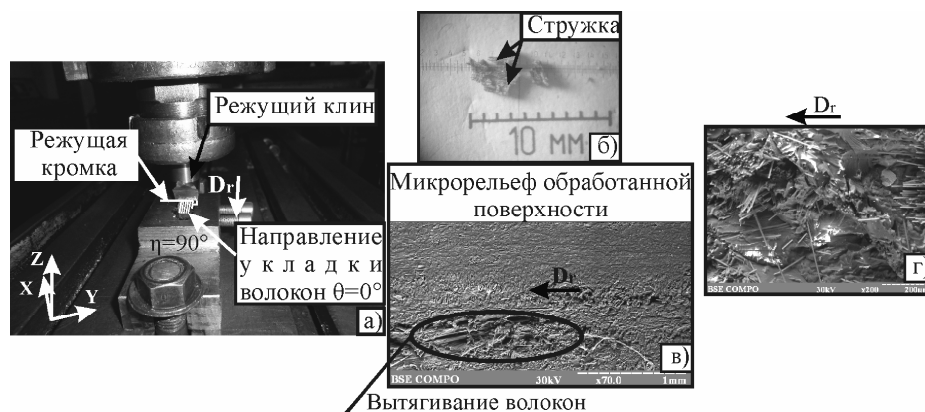


Рисунок 5.1 – Иллюстрация схемы обработки образца и поверхностных дефектов при  $\theta=0^\circ$  и  $\eta=90^\circ$

Модельный эксперимент по обработке ВПКМ с углом  $\theta=45^\circ$  характеризуется наличием не глубоких повреждений, до 10 мкм (рис.4.25 б) с периодом 180 мкм. Анализ снимков обработанной поверхности подтвердил, что резание образцов с углом  $\theta=45^\circ$  не сопровождается значительными повреждениями (рис. 5.2), тем не менее поверхность, образованная при разрушении срезаемого слоя, гладкая со значительным «размазыванием» материала матрицы вследствие контакта задней поверхности инструмента с вновь образованной поверхностью, как следствие упругого восстановления матрицы. В результате прямоугольного резания образцов с углом направленности волокон  $45^\circ$  при угле ориентации режущей кромки  $90^\circ$  были получены крупные цилиндрические элементы стружки шириной 5 мм и длиной 15 мм. Разрушение материала происходит под действием межслоевого сдвига со сжатием.

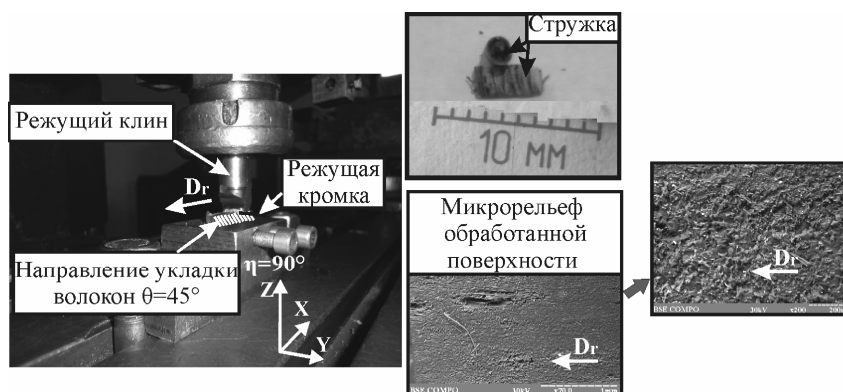


Рисунок 5.2 – Иллюстрация схемы обработки образца с  $\theta=45$  и  $\eta=90^\circ$

Применение метода конечных элементов при моделировании резания образца с углом направленности волокон  $\theta=90^\circ$  (рис. 5.3), в контексте изучения качества обработанной поверхности позволило установить, что период разрушения, как и на предыдущих схемах составил 180 мкм, в то время как глубина повреждений достигла 30 мкм. Значительного колебания удельной силы резания не наблюдалось [23]. В ходе проведения натурального эксперимента были получены крупные фрагменты стружки продольного изгиба, полученной под действием сжатия с продольным изгибом. Это, в свою очередь, спровоцировало формирование трещины сдвига вдоль границы раздела «волоконистый наполнитель - матрица» (рис. 5.3 в,г)

Как свидетельствуют результаты моделирования, обработка образцов с углом  $\theta=135^\circ$  сопровождается вытягиванием волокон до 35 мкм, значительными колебаниями силы резания (рис. 5.4), расслаиванием, сдвигом волокон и внеплоскостным перемещением. Воздействие режущей кромки на боковую сторону волокон вызывает их существенный изгиб, что запускает процесс образования трещин и формирование длинных элементов стружки (рис. 5.4). Вследствие разрушения под поверхностью резания, толщина стружки значительно больше толщины среза. Это подтверждают фрагмент стружки, полученные в ходе выполнения натурального эксперимента, достигающие в длину свыше 10 мм, а в ширину от 1 до 3 мм. Осмотр обработанной поверхности показал, что она содержит участки с вытянутыми и не срезанными волокнами длиной от 0,7 до 1,2 мм и шириной 0,5 - 0,7 мм (рис.5.4 в,г).

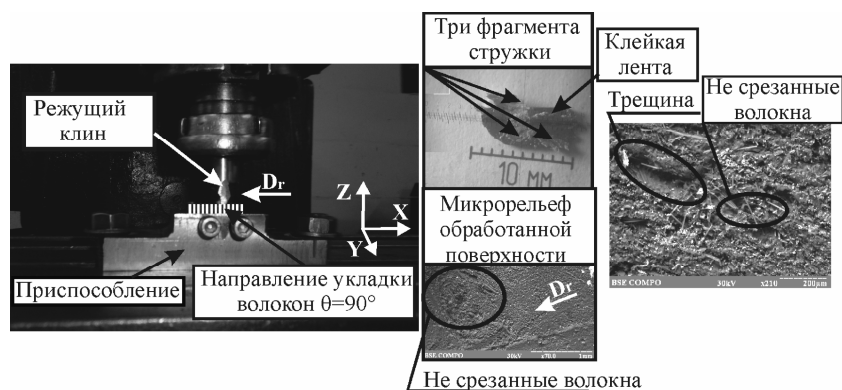


Рисунок 5.3 – Иллюстрация схемы обработки образца с  $\theta=90^\circ$  и  $\eta=90^\circ$

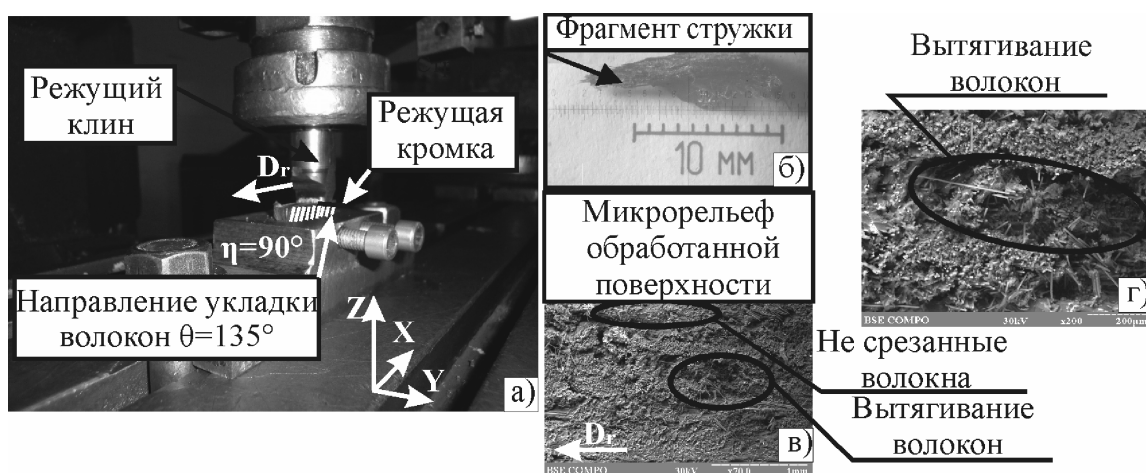


Рисунок 5.4 – Иллюстрация схемы обработки образца с  $\theta=135^\circ$  и  $\eta=90^\circ$

По итогам анализа полученных фотографий была построена диаграмма (рис. 5.5.), на которой по оси ординат отложены значения условных повреждений обработанной поверхности. Цифры условных повреждений представляют собой аппроксимированные данные о величине повреждений для каждого варианта угла направленности волокон. По оси абсцисс отложены значения углов направленности волокон в главной секущей плоскости.

Помимо представленных фотографий поверхностей, полученных при обработке образцов при  $\eta=90^\circ$ , была также выполнена механическая обработка образцов при  $\eta=0^\circ$  и  $45^\circ$ , которые приведены ниже (рис.5.6)

Как можно судить по состоянию обработанных поверхности ВПКМ, каждая из них имеет свой характер повреждений. Учитывая, что прямоугольное резание запечатленных поверхностей происходило в одинаковых условиях, при постоянных режимах резания, инструментом с не изменой геометрией из

одного инструментального материала, можно предположить, что на характер повреждений обработанной поверхности оказали влияния углы направленности волокон и ориентации режущей кромки относительно волокна.

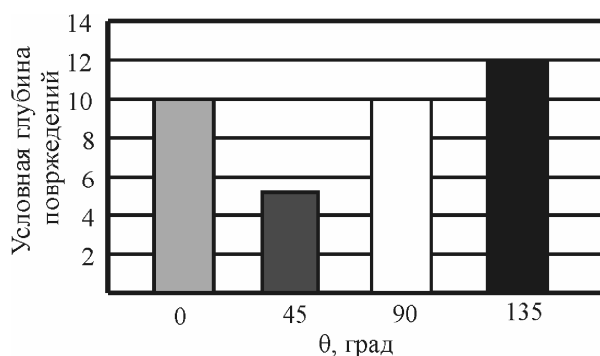


Рисунок 5.5 – График зависимости условных повреждений в зависимости от угла направленности волокон

Тем не менее, в рамках настоящего исследования не удалось установить степень влияния каждого из этих факторов на характер полученных повреждений, что может стать предметом дальнейшего изучения.

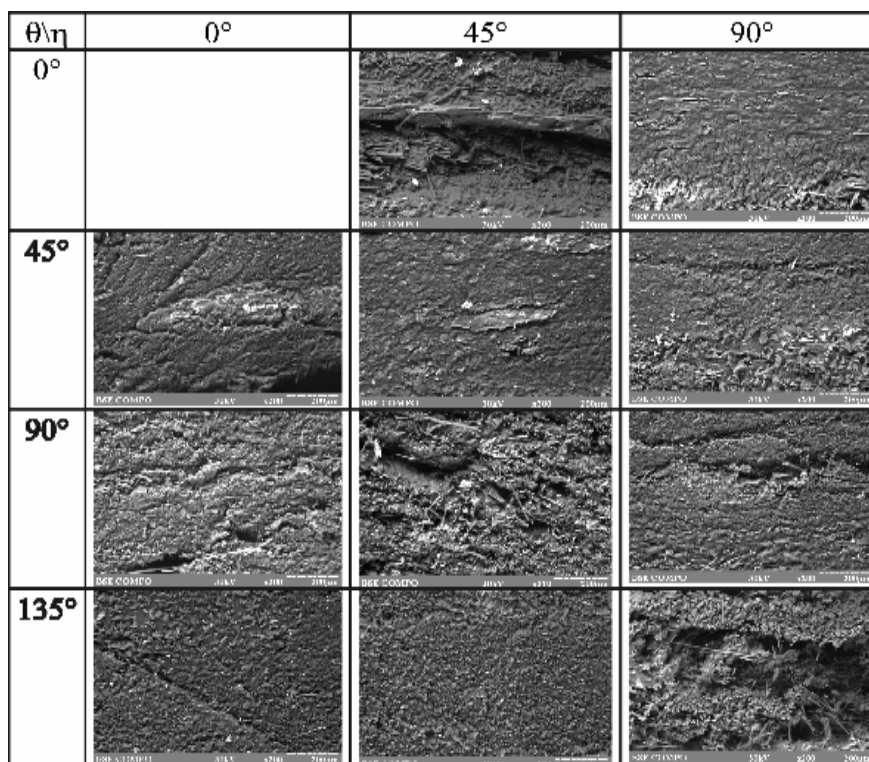


Рисунок 5.6 – Состояние поверхностного слоя ВПКМ после механической обработки при различных углах ориентации режущей кромки

## **5.2 Исследование температуры резания при сверлении углепластика**

В последнее десятилетие композиционные материалы уверенно отвоевывают во многих отраслях промышленности лидирующие позиции у таких традиционных конструкционных материалов как стали, алюминиевые и титановые сплавы [109]. Особенно это заметно в авиа- и автомобилестроении, энергетике и других отраслях. Возможность придания изделиям из волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) требуемой формы существенно снижает необходимость в таких механических операциях как фрезерование и точение. В то же время существует потребность в соединении деталей из ВПКМ с другими деталями. В этих условиях наиболее распространенными являются операции по изготовлению отверстий: сверление, рассверливание, развертывание, зенкерование. Механическая обработка ВПКМ, в частности сверление, сопряжено со значительными трудностями ввиду многокомпонентности обрабатываемого материала. Существенные проблемы связаны с обеспечением качества и точности обработанной поверхности. Снижение качества и точности отверстий в ВПКМ сопряжено с наличием таких дефектов как расслаивание, вытягивание волокон, не срезание волокон, распушивание и термическая деструкция. Последняя, существенно снижает эксплуатационные характеристики отверстия за счет формирования в процессе резания концентраторов напряжений, особенно в местах деструкции связующего вещества. На сегодня вопросы, связанные с физикой термических деструкционных процессов при сверлении ВПКМ, еще недостаточно изучены и требуют дальнейшего исследования, что является для указанных отраслей очень актуальной задачей.

Температура, возникающая при резании ВПКМ, определяет не только износ инструмента, но и качество обработанной поверхности. Наиболее достоверные данные о температуре резания возможно получить экспериментальным путем. И если в настоящее время имеется достаточно

большое количество исследований, посвященных изучению термических процессов, происходящих в системе резания при механической обработке металлов, то тепловые процессы при резании ВПКМ еще плохо изучены, что обусловлено: специфичными условиями деформирования и разрушения срезаемого слоя; сложностью измерения температуры в ВПКМ в силу закрытости зоны резания; непрерывностью изменения положения режущей кромки; неоднородностью ВПКМ, а также наличием в них не токопроводящих элементов.

В настоящее время создание методики для измерения температуры в зоне резания при обработке ВПКМ преимущественно сводится к адаптации уже существующих подходов, используемых для исследования температуры резания при обработке металлов. К наиболее распространенным относится метод термопары, основывающийся на эффекте Зеебека, который может быть реализован несколькими путями. Выделяют [110] методы: естественной, искусственной и полуискусственной термопар. Метод естественной термопары основан на том, что контактирующие тела используются в качестве термоэлектродов, а их контактная связь — в качестве одного из спаев цепи термопары. По термо-ЭДС, возникающей в цепи при контакте двух разнородных металлов, оценивают температуру на поверхности контакта.

Сущность метода искусственной термопары заключается в измерении температурного поля инструмента или заготовки при помощи двух спаянных и изолированных термоэлектродов из разнородных материалов, размещенных в технологическом отверстии в теле инструмента или заготовки на удалении места спая на 0,2 - 0,5 мм от зоны резания. Измерение температуры происходит при помощи гальванометра, фиксирующего электродвижущую силу (ЭДС) возникающую в проводниках при движении электронов от места спая к их противоположным краям.

Механизм измерения температуры резания полуискусственной термопарой, в свою очередь, заключается в измерении разницы потенциалов между двумя проводниками, одним из которых является инструментальный или



обрабатываемый материал. Например, Agariou J. S., Stephenson D. A [111] предложили такой способ измерения температуры при сверлении чугуна, согласно которому температура измеряется на нагретом стыке между сверлом и тонкой изолированной медной проволокой, размещенной в предварительно просверленном отверстии и залитой для изоляции этого термоэлектрода от заготовки эпоксидной смолой. Вместе с тем, применение этого способа в случае сверления ВПКМ ограничивается невозможностью сверления технологических отверстий большой глубины и малого диаметра, даже путем электроэрозионной обработки, т.е. этот метод для измерения температуры резания при обработке ВПКМ в традиционной постановке может являться малоэффективным.

Традиционно применяемый при обработке металлов способ естественной термопары, состоящей из двух электродов «инструмент–заготовка», основывающийся на измерении термо - ЭДС между местом контакта материалов резца и заготовки (зона резания) и токоотводящими элементами, также не может быть применен при резании ВПКМ в силу их анизотропности и, как правило, низкой электропроводности [112].

В последние годы широкое распространение получил способ изменения температуры пирометрами путем регистрации инфракрасного излучения нагретой поверхности. Основной особенностью данного метода является бесконтактная передача информации, что позволяет избежать шумов и наводок, свойственных термоэлектрическому методу измерения. Теоретической основой этого метода являются зависимость Планка и закон Вина, смысл которых сводится к установлению зависимости между температурой, длиной волны и энергетической светимостью [113]. Cong W. L., Xiaotian Z. и др., в своей работе [114] выполнили экспериментальное сравнение этого способа с применением оптоволокна для получения инфракрасного излучения непосредственно из зоны резания со способом измерения температуры методом искусственной термопары при сверлении ВПКМ. Измерение температуры проводилось в диапазоне от 0 до 150°C. С увеличением температуры разница в показаниях

пирометра и искусственной термопары росла от 10% при 60°C до 30% при 150°C, более высокая температура была зафиксирована оптоволоконным датчиком. Аналогичные результаты получил Khanna N et.al. [115] при измерении температуры резания с помощью оптического пирометра в процессе концевой фрезеровки углепластика. Несмотря на приемлемую точность, эти способы не могут быть применены для измерения температуры в области главных режущих кромок при сверлении ВПКМ, поскольку эта зона постоянно обновляется и закрыта от внешнего наблюдения. Точность пирометров существенно снижается при измерении температур ниже 300°C, которые характерны при резании ВПКМ [39].

Таким образом, практически ни один из известных способов измерения температуры резания не позволяет получить данные о температуре резания на главных режущих кромках сверла при сверлении ВПКМ. Поэтому целью настоящей работы является разработка такого способа и оценки его возможностей.

Идея предлагаемого способа измерения температуры в ВПКМ основывается на применении полуискусственной термопары. Суть нового способа заключается в закладке токопроводящих элементов (термоэлектродов) еще на этапе формовки исследуемого образца. Это позволяет обеспечить наиболее тесный контакт с компонентами ВПКМ, исключает необходимость создания технологического отверстия в образце, и, как следствие, повышает точность измерения температуры. При сверлении нагретая режущая кромка сверла контактирует с термоэлектродом, срезая его. В этот момент имеет место горячий спай, в котором возникает термо-ЭДС. Именно она и регистрируется с помощью ЭВМ. Температура спая определяет температуру на режущей кромке инструмента и термоэлектроде. В силу того, что термоэлектрод находится внутри ВПКМ, то его температура также очень близка к температуре обрабатываемого материала.

В качестве материала термоэлектродов предлагается использовать нихромовую проволоку, так как она обладает высоким коэффициентом термо -

ЭДС [113]. Диаметр проволоки должен быть достаточно малым, чтобы теплота, выделяемая при ее срезании, не вносила существенного вклада в повышении температуры в данной точке режущей кромки. С другой стороны, слишком тонкая проволока усложняет размещение электрода в заданном месте и формовку образцов, а также деформирование при ее срезании. Методом проб и ошибок была выбрана проволока диаметром 0.3 мм.

Закладка одновременно нескольких термоэлектродов создает возможность регистрации температуры одновременно в нескольких точках режущей кромки и даже на ленточках при их трении с вновь образованной поверхностью отверстия.

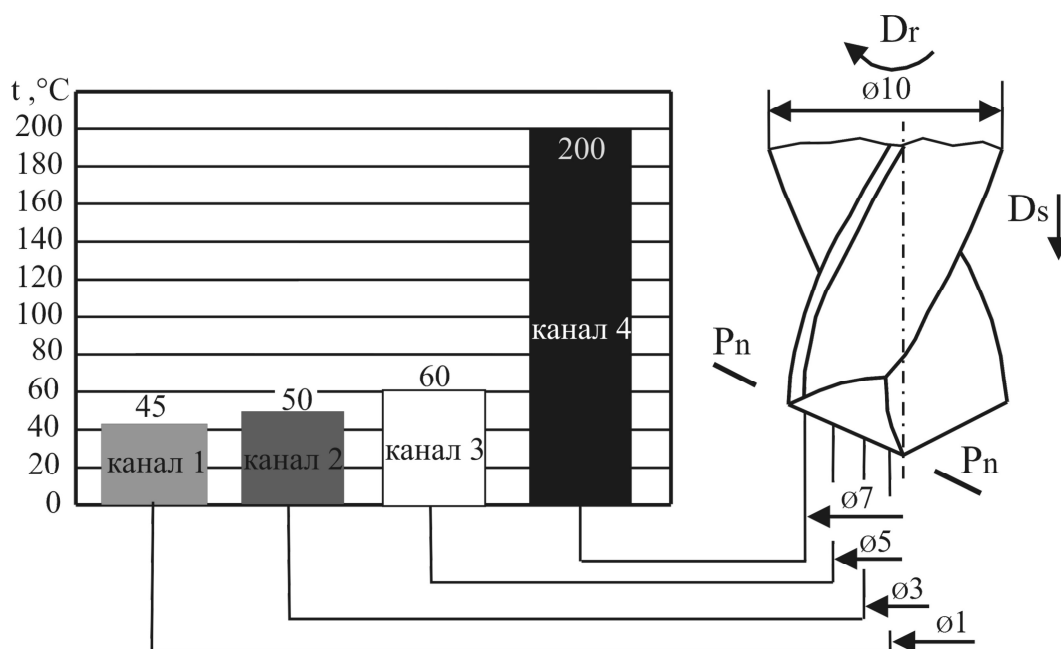


Рисунок 5.7 – Температура резания в различных точках главной режущей кромки сверла

Полученные данные поискового эксперимента по сверлению (рис. 5.7) показывают, что при заданных условиях температура резания вдоль главной режущей кромки изменяется в пределах от 45 до 200 °С, с увеличением радиуса расположения на кромке контрольных точек и, соответственно, возрастанию скорости резания в них. В то же время наблюдалась существенная неравномерность распределения температуры вдоль режущей кромки: чем больше удалена точка на режущей кромке от оси сверла, тем более интенсивно

возрастает температура резания. Так если разница между температурами резания в двух наиболее приближенных к оси точкам составляет 5 °С, то разница между температурами резания в двух наиболее удаленных от оси точках, находящихся на таком же расстоянии друг от друга, составляет 140 °С. Учитывая, что расположение электродов и, соответственно, контрольных точек было практически равномерным, причиной такой неравномерности может служить неоднородность свойств образца, вызванная, например, неравномерностью распределения углеволокна в образце. Дополнительный вклад в существенную разницу температур может вносить также и теплота, поступающая в инструмент из-за трения ленточек с обработанной поверхностью. Очевидно, что изучение этих явлений должно быть темой дальнейших исследований.

Ни один из известных способов измерения температуры, в настоящее время, не позволяет определить температуру резания на главных режущих кромках сверла при сверлении ВПКМ по причине их малой электропроводности, закрытости зоны резания, постоянного ее обновления в процессе обработки. В работе предложен способ и описана методика измерения температуры резания на главных режущих кромках сверла при сверлении ВПКМ методом полуискусственной термопары. Термопара образуется между сверлом и заранее введенными на этапе изготовления образцов нихромовыми проволоками - термоэлектродами. Проведенный поисковый эксперимент показал возможность практической реализации способа. Результаты этого эксперимента показывают, что в заданных условиях температура резания возрастает вдоль режущей кромки при удалении от оси сверла в пределах от 45 °С до 200 °С и это возрастание неравномерно. Последующие исследования с помощью представленного способа позволят изучить это явление более детально.

### 5.3 Исследование температуры резания при сверлении смешанного пакета

Исследование температурных явлений в зоне резания при механической обработке пакетов ВПКМ/металл инструментом из быстрорежущей стали выполнялось по методике п. 2.1.4. Исследование заключалось в проведении натуральных экспериментов по сверлению образцов пакета заранее определенной формы и свойств.

На этом этапе экспериментальных исследований было использовано быстрорежущее сверло марки Р6М5  $\varnothing 10$  мм с общей длиной 130 мм при длине рабочей части 90 мм. Главный угол в плане  $2\varphi = 118^\circ$ , толщина поперечной кромки составила 0,8 мм, длина главной режущей кромки равняется 5,83 мм, с высотой режущей части равной 3 мм. В данной модификации сверла термопара была удалена на 2,06 мм от главной режущей кромки см. п. 2.1.4. Параметры образцов для этих экспериментов описаны в п. 2.1.2.

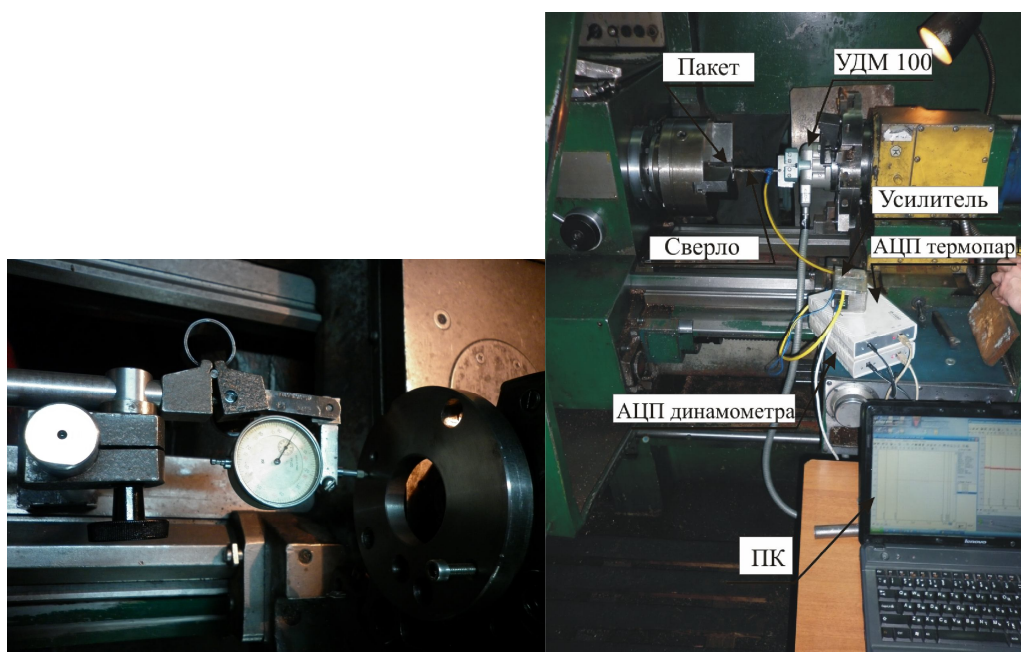


Рисунок 5.8 – Схема наладки токарного станка 16Б16Т1

Механическая обработка образцов была реализована на токарно-винторезном станке мод. 16Б16Т1 (рис.5.8), производилась на режимах

рекомендованных для обработки ВПКМ Р6М5 и описанных в более ранних исследованиях:  $V=12,5$  м/мин,  $S=0,01$  мм/об,  $S_m=5,6$  мм/мин,  $n=560$  об/мин.

Методика измерения температуры подробно описана в п. 2.1.4.

Результаты сверления пакета Металл/ВПКМ и ВПКМ показали, что температура резания при сверлении пакета зависит от порядка прохождения сверлом слоев пакета (рис. 5.9 - 5.10).

При сверлении отверстия в пакете Металл/ВПКМ наибольшая температура составила  $297^{\circ}\text{C}$ . Рост температуры фиксировался с момента касания вершины сверла к образцу. Первые 3 мм происходило врезание главной режущей кромки сверла, что сопровождалось плавным ростом температуры. На участке с 3 до 11 мм главная режущая кромка сверла полностью вошла в металл и сверло обрабатывало исключительно металл. На 9 мм наблюдается пиковое значение температуры равное  $297^{\circ}\text{C}$ . Далее в связи с уменьшением толщины металла и отводом части теплоты в обрабатываемый материал (металл) и стружку на промежутке 9-11 мм происходит снижение температуры резания. Между 11-14 мм режущая кромка работает одновременно и в металле и в ВПКМ. На участке 11.14 мм до 11.48 мм за 4.3 с происходит стремительное понижение температуры на  $17,5^{\circ}\text{C}$  с  $269$  до  $251,5^{\circ}\text{C}$  и двумя понижающими скачками на  $4^{\circ}\text{C}$  за 0,1 сек и 0,009 мм, и на  $7^{\circ}\text{C}$  за аналогичную дистанцию и временной промежуток. На участке с 14 до 24.17мм сверло работало по всей длине главной режущей кромки исключительно в ВПКМ. Самая низкая температура в ВПКМ составила  $190^{\circ}\text{C}$ , а максимальная  $213^{\circ}\text{C}$ . Снижение температуры при сверлении ВПКМ, предположительно связано с тем, что предварительно нагретое при сверлении металла сверло легче разрушает связи между эпоксидной смолой и углеволокном, что сопровождается уменьшением работы на разрушение ВПКМ в целом, и как следствие выражается в снижении температуры резания.

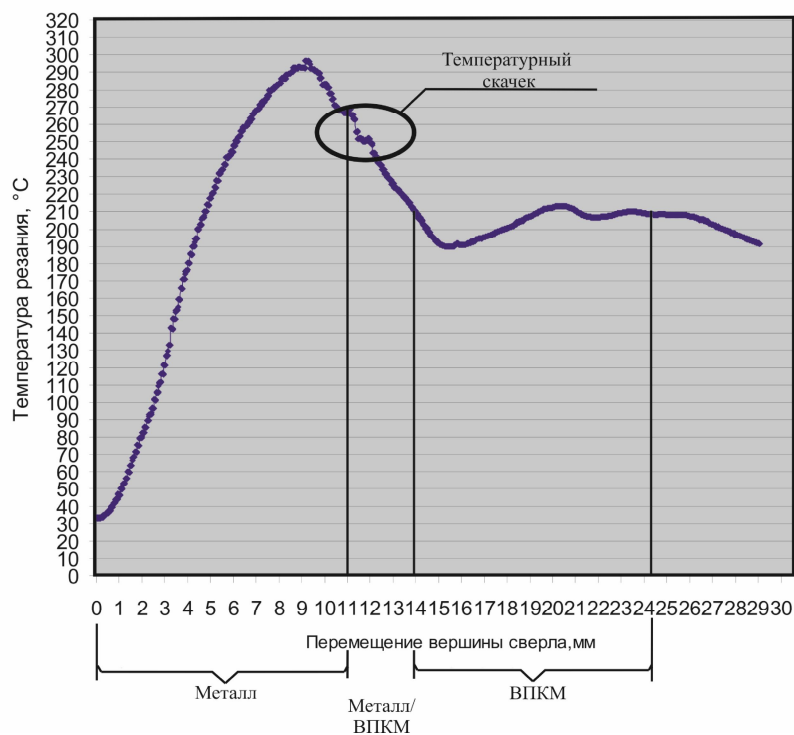


Рисунок 5.9 – График изменения температуры при сверлении пакета  
Металл/ВПКМ

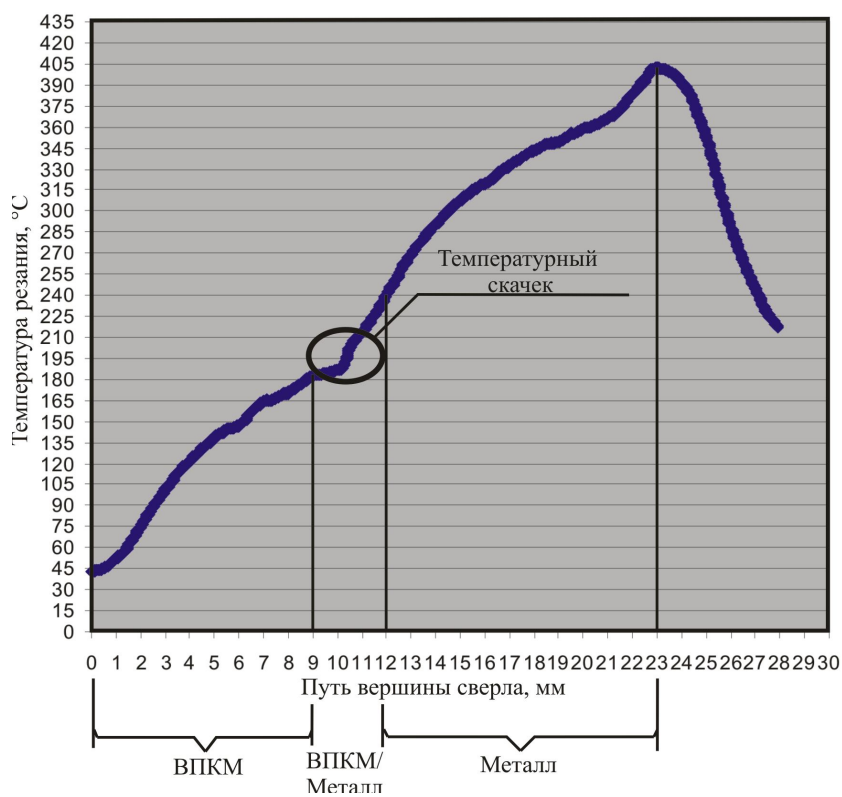


Рисунок 5.10 – Изменение температуры резания при сверлении пакета  
ВПКМ/Металл

Тем ни менее этот эффект имеет ограничения и достигнув минимальной отметки в  $190^{\circ}\text{C}$ , температура в зоне резания начинает расти. Общий путь резания, пройденный вершиной сверла, составил 75,89 м из них 34,54 м в металле и 41,38 м в ВПКМ.

Сверление отверстия в пакете ВПКМ/металл выполнялось при начальной температуре сверла  $42,5^{\circ}\text{C}$ . Кривая изменения температуры в зоне резания при сверлении пакета ВПКМ/Металл кардинально отличается от кривой температуры Металл/ВПКМ. При сверлении пакета ВПКМ/Металл также был зафиксирован скачек температуры при работе сверла одновременно в разных материалах пакета. Рост температуры был зафиксирован при работе сверла одновременно в ВПКМ и Металле на  $21^{\circ}\text{C}$  на отрезке 0,62 мм, за 6,7 сек. Дальнейшая работа сверла в Металле сопровождалась исключительно ростом температуры резания достигнув максимальной отметки в  $402^{\circ}\text{C}$ , непосредственно перед выходом сверла из пакета. При сверлении пакета ВПКМ/Металл вершина сверла преодолела путь резания в 73,79 м, из них 28,26 м в ВПКМ и 45,35 м в металле.

Таким образом, при прочих равных условиях при врезании сверла со стороны ВПКМ (первый случай) максимальная температура резания в цикле резания больше почти на  $100^{\circ}\text{C}$ , чем при врезании со стороны металла (второй случай). Это поясняется худшим отводом стружки, пакетированием стружки ВПКМ и ее низкой теплопроводностью. С другой стороны, максимальная температура резания в слое ВПКМ при врезании сверла со стороны ВПКМ на  $15-20^{\circ}\text{C}$  меньше, чем при врезании со стороны слоя металла. Это поясняется меньшим прогревом сверла и, из-за этого, лучшим отводом тепла в инструмент. Следует обратить внимание на длительность переходного процесса изменения температуры резания при переходе сверла между листами. Скорость изменения температуры резания на границе слоев меньше в первом случае, чем во втором случае ( $17,5^{\circ}\text{C}/\text{мм}$  против  $27,5^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ ). Это связано не только с большей интенсивностью тепловыделения при врезании в металл, чем в композит, но и затрудненным теплоотводом из-за пакетирования ВПКМ стружки. С другой



стороны, скорость возрастания температуры резания при врезании в верхний слой металла почти в два раза больше ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ ), чем при врезании в лист металла после сверления ВПКМ ( $17^{\circ}/\text{мм}$ ). Этот факт связан с предварительным прогревом сверла во втором случае и накоплением в нем теплоты, что снижает градиенты температуры в нем.

Интересным является «провал» температуры при врезании в ВПКМ в первом случае. Его механизм, следующий: при выходе сверла из слоя металла облегчаются условия резания, и температура снижается. Большая доля теплоты остается в стружке. По мере продвижения сверла стружка накапливается и ее тепло снова передается в сверло, обуславливая повышение температуры. Таким образом существует резерв снижения температуры резания путем обеспечения надежного стружкоотвода.

В ходе эксперимента по сверлению пакета ВПКМ/Металл и Металл/ВПКМ было получено подтверждение гипотезы о наличии температурного скачка на границе раздела двух конструкционных материалов. И хотя температурный скачок в случае с пакетом Металл/ВПКМ составляет не более 5,74%, при комбинации пакета ВПКМ/ Металл не более 5,2% от максимальной температуры резания, прогнозируется усиление этого эффекта по мере износа сверла, что безусловно отрицательно скажется на стойкости инструмента и качестве обрабатываемых отверстий.

На основе выше указанных фактов можно утверждать, что вариант обработки пакета ВПКМ/Металл является наиболее не благоприятным с точки зрения стойкости сверла. Так как сверло работает при постоянно растущих высоких температурах. По причине низкой теплопроводности ВПКМ в сверле аккумулируется тепло, накопление которого только растет при обработке металла. Не смотря на то, что при сверлении пакета Металл/ ВПКМ температурный скачек более резкий, но в сторону уменьшения температуры в зоне резания, в то время как при сверлении пакета ВПКМ/Металл в сторону увеличения температуры в зоне резания, что обязательно негативно скажется на стойкости сверла.

#### 5.4 Исследование влияния радиуса округления и фаски износа на температуру резания при сверлении смешанного пакета

На основе результатов, полученных в ходе эксперимента по сверлению пакетов Металл/ВПКМ и ВПКМ/Металл сверлом из Р6М5, был сделан вывод о том, что комбинация пакета ВПКМ/Металл является наиболее неблагоприятным вариантом сочетания материалов пакета из двух проверяемых комбинаций. В этой связи в дальнейших экспериментах была использована именно эта комбинация материалов для изучения влияния температуры в зоне резания на ресурс твердосплавных сверл.

Для эксперимента было выбрано сверло GUEHRING-SL R-RT1U 5510 К/Р95377, рекомендованное производителем для обработки пакетов с использованием углепластика. Главные углы в плане составили  $2\phi=119^\circ$ ,  $2\phi'=135^\circ$ , с толщиной поперечной режущей кромки 0,5 мм и углом ее наклона  $\psi=57^\circ$ . Как и у быстрорежущего сверла, длина главной режущей комки составили 5,82мм с режущей частью равной 3 мм, рабочая часть сверла - 43мм, при общей длине сверла - 89 мм. Термопара была размещена на удалении 1,2 мм от режущей кромки по задней поверхности сверла. Обработка велась при  $V=25.12$  м/мин,  $S=0,02$  мм/об,  $S_m=16$  мм/мин,  $n=800$  об/мин, на токарно-винторезном станке мод. 16Б16Т1.

Сверлению первой контрольной точки предшествовал осмотр режущей кромки сверла на электронном микроскопе РЭМ 100У с целью определения состояния режущей кромки и ее радиуса округления (рис. 5.11). Осмотр сверла при высоком увеличении и высокой разрешающей способности позволил зафиксировать факт отсутствия повреждений режущей кромки. По причине неравномерности главной режущей кромки значение радиуса округления определялось как среднее арифметическое по 10 точкам.

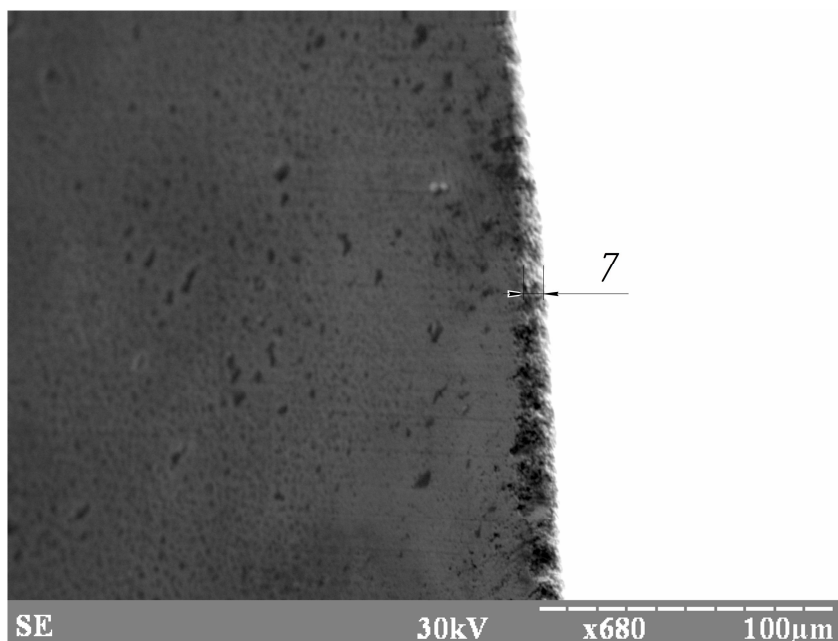


Рисунок 5.11 – Состояние режущей кромки сверла до механической обработки ( $\rho=7\text{мкм}$ )

В ходе экспериментальных исследований было выполнено 49 отверстий в пакете ВПКМ/Металл. Были получены 8 контрольных точек в которых были измерены температура и осевая сила. Ниже рассмотрим общий характер роста температуры на примере результатов сверления третьей контрольной точки (рис.5.12 – 5.13).

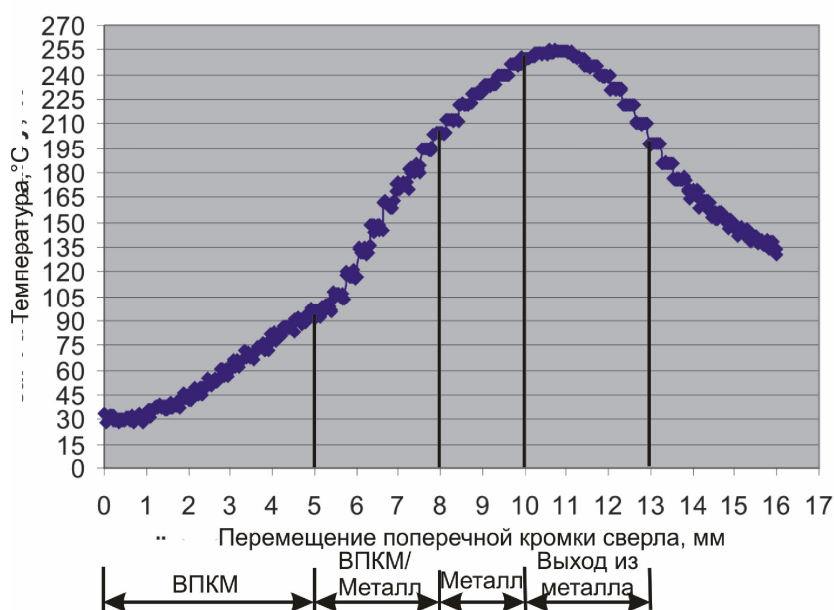


Рисунок 5.12 – Температура в зоне резания при сверлении пакета ВПКМ/Металл в третьей контрольной точке

Наибольшая зафиксированная температура при сверлении ВПКМ составила  $93^{\circ}\text{C}$  против  $200^{\circ}$ , наблюдаемых при использовании сверл из быстрорежущей стали (рис. 5.9-5.10). Плавный рост температуры на участке с 0 до 3 мм объясняется врезанием главной режущей кромки в ВПКМ с постепенным прогревом тела сверла. Дальнейший рост температуры в зоне резания обусловлен низкой теплопроводностью ВПКМ и аккумуляцией теплоты в теле сверла. Низкой теплопроводностью также обусловлено низкий отвод тепла со стружкой. При сверлении ВПКМ была получена дисперсная пылеобразная стружка, которая накапливалась в стружкоотводящих канавках сверла, еще больше усложняя отвод тепла. За 5 мм пути поперечной кромки сверла и 18,75 сек. температура и увеличилась на  $60^{\circ}\text{C}$ . На отрезке от 5 мм до 8 мм (рис.5.15) сверло одновременно обрабатывало два материала пакета. За это время температура увеличилась на  $110^{\circ}\text{C}$ . Это наблюдение позволяет сделать предварительный вывод о том, что одновременная работа сверла в двух материалах пакета увеличивает скорость изменения температуры. Это свидетельствует о более сложных условиях работы сверла. При дальнейшей обработке в металле не произошло снижение температуры, не смотря на то, что сталь обладает более высокой, по сравнению с ВПКМ теплопроводностью. Это обусловлено интенсификацией тепловыделения. Максимальная температура при сверлении металла составила  $254^{\circ}\text{C}$ , в то время как при использовании сверла из быстрорежущей стали при прочих равных условиях температура составила почти  $400^{\circ}\text{C}$ .

Врезание поперечной режущей кромки сверла сопровождается постепенным ростом осевой силы от 0 до 25 Н (рис. 5.13). На отрезке от 1 до 5 мм осевая сила стабилизируется, постепенно увеличиваясь с 24 Н до 53 Н. Колебание осевой силы на отрезке 3-5 мм может быть обусловлено неоднородностью структуры ВПКМ. Касание поперечной кромки к металлу сопровождается стремительным ростом осевой силы 388Н. Максимальная величина осевой силы при работе сверла одновременно в ВПКМ и Металле составила 404Н. Выход поперечной кромки из металла отмечен снижением

осевой силы до 90Н. Дальнейшее снижение осевой силы при выходе сверла из металла обусловлено уменьшением ширины срезаемого слоя.

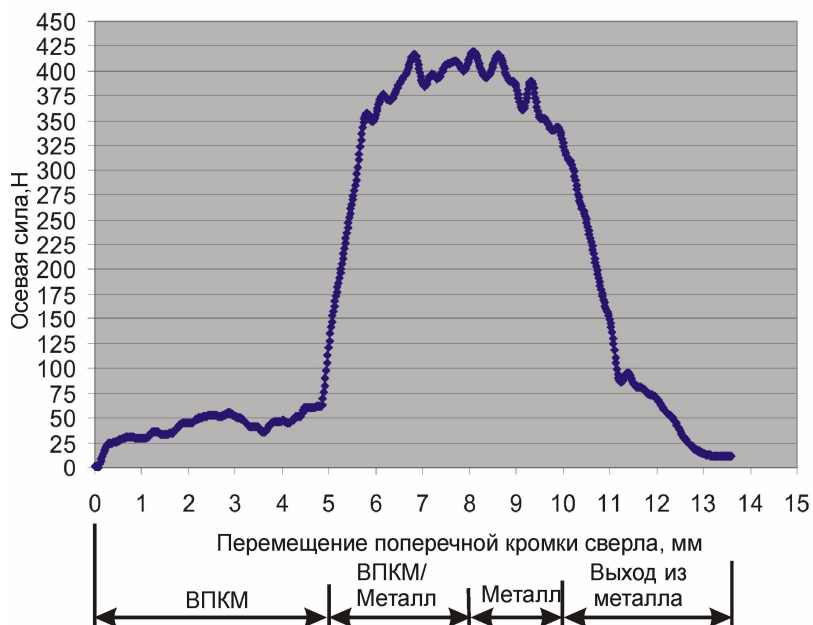


Рисунок 5.13 – Осевая сила при сверлении пакета ВПКМ/Металл сверлом из твердого сплава

Обобщение полученных в ходе экспериментальных данных позволило установить некоторые функциональные зависимости между ресурсом инструмента, осевой силой и температурой в зоне резания (рис.5.14).

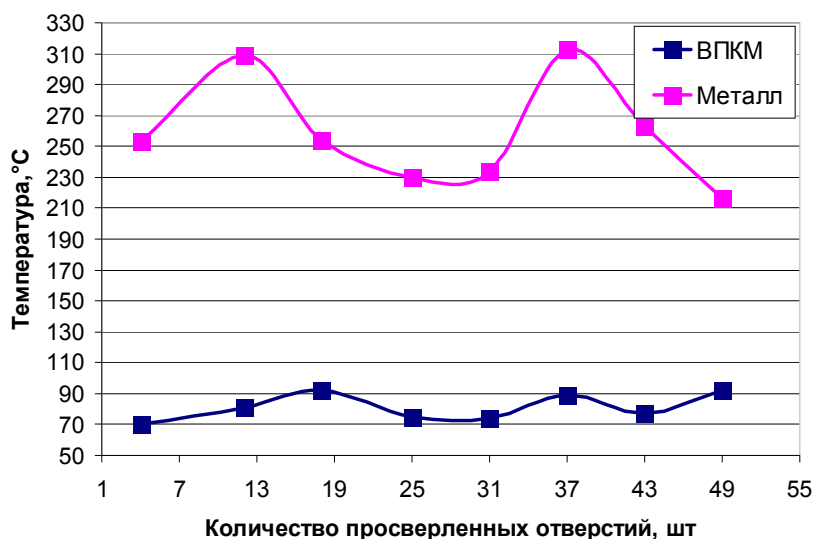


Рисунок 5.14 – Изменение температуры в зоне резания при обработке пакета ВПКМ/Металл

Процесс сверления пакета ВПКМ/Металл сопровождался обильным образованием пылевидной, мелкодисперсной стружки, которая существенно затрудняла отвод тепла из зоны резания. Малый размер сечения срезаемого слоя из-за низкой подачи создали благоприятные условия для накопления и уплотнения в зоне резания стружки ВПКМ. Сочетание вышеупомянутых факторов привело к формированию нароста на передней поверхности сверла. Формирование нароста изменяет геометрию режущих кромок сверла, увеличивая передний угол. В результате степень деформации, усадка стружки, работа и сила резания уменьшаются. Размеры нароста зависят от соотношения сил адгезии между образующейся стружкой и передней поверхностью лезвия инструмента и сил сопротивления сдвигу обрабатываемого и инструментального материалов: чем больше сила адгезии превышает напряжения сдвига, тем больше размеры нароста. Все обрабатываемые материалы можно разделить на склонные к наростообразованию и не склонные к нему. К первым относятся медь, латунь, бронза, олово, свинец, большинство титановых сплавов, белый чугун, закаленные стали, легированные стали с большим содержанием хрома и никеля; ко вторым – конструкционные, углеродистые и большинство легированных сталей, серый чугун, алюминий, силумин. Если материал склонен к наростообразованию, то размеры нароста возрастают при уменьшении твердости и повышении пластичности материала. ВПКМ и особенно эпоксидная матрица, как показали исследования физико-механических свойств, обладает высокой пластичностью и низкой твердостью. На ряду с низкой температурой деструкции при сверлении ВПКМ создаются благоприятные условия для схватывания частиц ВПКМ с передней поверхностью сверла и формирования нароста. Наслаиваясь на передней поверхности инструмента нарост препятствует отводу тепла в инструмент. Это обстоятельство обуславливает, циклическое изменение температурного поля сверла. По мере увеличения нароста температурный поток в инструмент ослабевает, что сопровождается снижением температуры. При отделении

нароста в процессе сверления исчезает препятствие на пути теплового потока, что содействует отводу тепла в инструмент (рис.5.14).

Экспериментально установлено [116], что при наиболее распространенных условиях резания сталей нарост имеет максимальную высоту при таком значении скорости резания, при котором температура  $\theta \approx 300^\circ\text{C}$ , и исчезает при значении скорости, при которой температура  $\theta \approx 600^\circ\text{C}$ . Уменьшение размеров нароста при температурах более  $300^\circ\text{C}$  объясняется значительным снижением сопротивления материала нароста пластическому сдвигу вследствие его размягчения. При относительно низких скоростях резания и температурах образуется нарост первого вида имеет форму, близкую к треугольной, мало развит по высоте, имеет небольшой радиус округления вершины. Задний угол нароста близок к нулю, поэтому он практически не выступает за заднюю поверхность инструмента.

Общий тренд осевой силы показывает ее увеличение с ВПКМ и уменьшение в металле по мере износа сверла. (рис. 5.15) Вместе с тем отдельные колебания осевой силы обусловлены, на наш взгляд, наличием нароста на режущей кромке. Этот эффект согласуется с предположением о влиянии нарост на силы резания в том числе и на ее осевую составляющую (рис.5.15). Сформированные и не отделенные после обработки ВПКМ слоя пакета нарост, изменяет геометрию режущей кромки сверла за счет увеличения переднего угла, что корректирует условия в зоне резания, формируя застойную зону вокруг режущей кромки, содействуя снижению осевой силы. Затем происходит удаление углепластикового нароста на передней поверхности сверла более твердыми и нагретыми элементами металлической стружки. Учитывая не большой путь резания, преодолеваемый поперечной кромкой сверла, увеличение осевой силы, связанное с отделением нароста сложно зафиксировать на фоне общей тенденции к уменьшению осевой силы в связи с завершением сверления и выходом сверла из зоны резания.

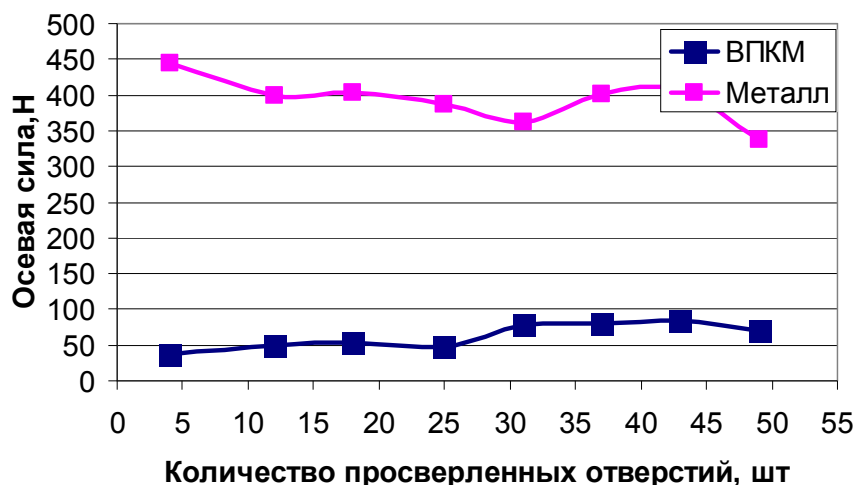


Рисунок 5.15 – Изменение осевой силы в зоне резания при обработке пакета ВПКМ/Металл (цифры на графике показывают номер опыта)



Рисунок 5.16 – Тенденция развития фаски износа при обработке пакета ВПКМ/Металл

Период приработки сверла чрезвычайно малый и равномерный износ начинается практически на первом отверстии. Средняя интенсивность износа в рассмотренных условиях составила около 1,08 мкм/отверстие. Интенсивность износа уменьшается с увеличением количества отверстий: 2 мкм/отв. при сверлении 1-5 отв. и 0,8 мкм/отв. к 49 отверстию. До 17 отверстия сколов не наблюдалось. Изменение формы режущей кромки происходило равномерно



путем непрерывного истирания по задней поверхности. После 17 отверстий на режущей кромке начали появляться сколы (рис.5.16- 5.17).

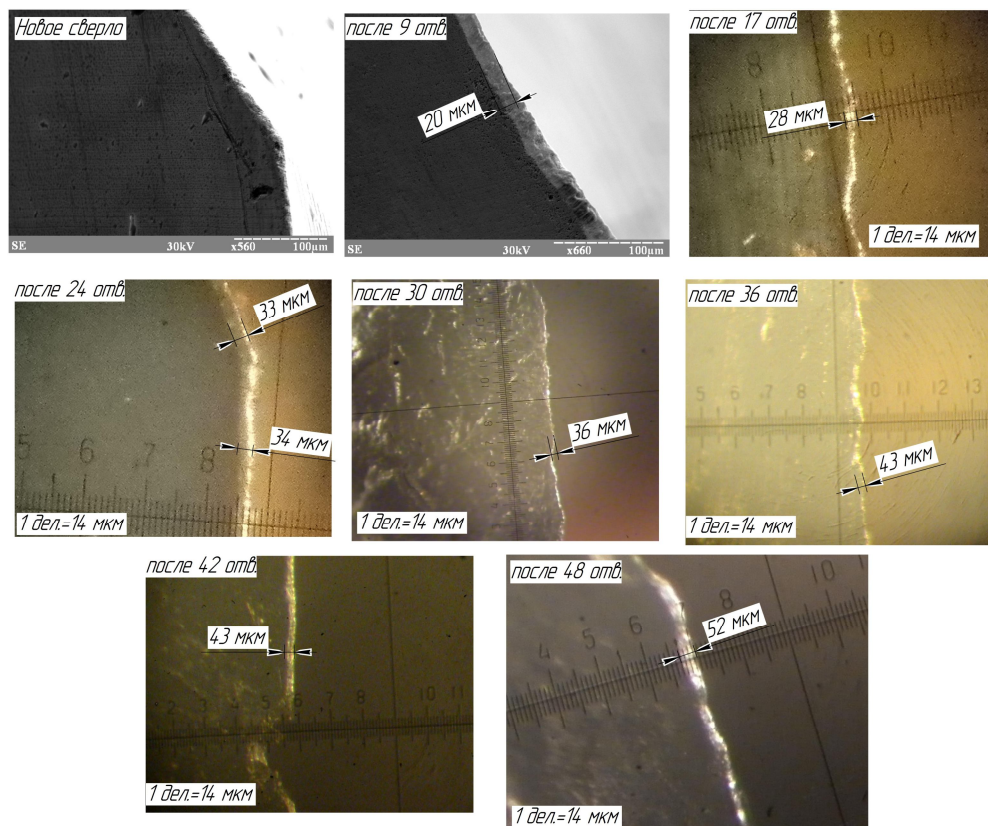


Рисунок 5.17 – Иллюстрация состояния режущей кромки и фаски износа сверла на разных этапах обработки

Нарост не повлиял на процесс износа задней поверхности. Это наблюдение позволяет подтвердить выдвинутое ранее предположение о наростообразовании первого типа. Подтверждение тому можно найти в равномерности развития износа (рис.5.17). Очевидно абразивное воздействие волокон композиционного материала на режущую кромку. Следует отметить, что износ по задней поверхности сверла не равномерен. По мере увеличения количества обработанных отверстий очевидно прогрессирование обширных повреждений режущей кромки в виде зарождения и развития сколов. Не смотря на относительно не значительный размер фаска износа, по задней поверхности, микрогеометрия режущей кромки претерпела серьезные изменения. Сколы, как следствие механизма адаптации режущего инструмента сформировали новые

режущие грани, наличие которых некоторым не определенным образом может влиять на выходные характеристики процесса резания.

Одним из критериев оценки качества отверстий являются отклонения формы, в частности отклонения от круглости (рис. 5.18).

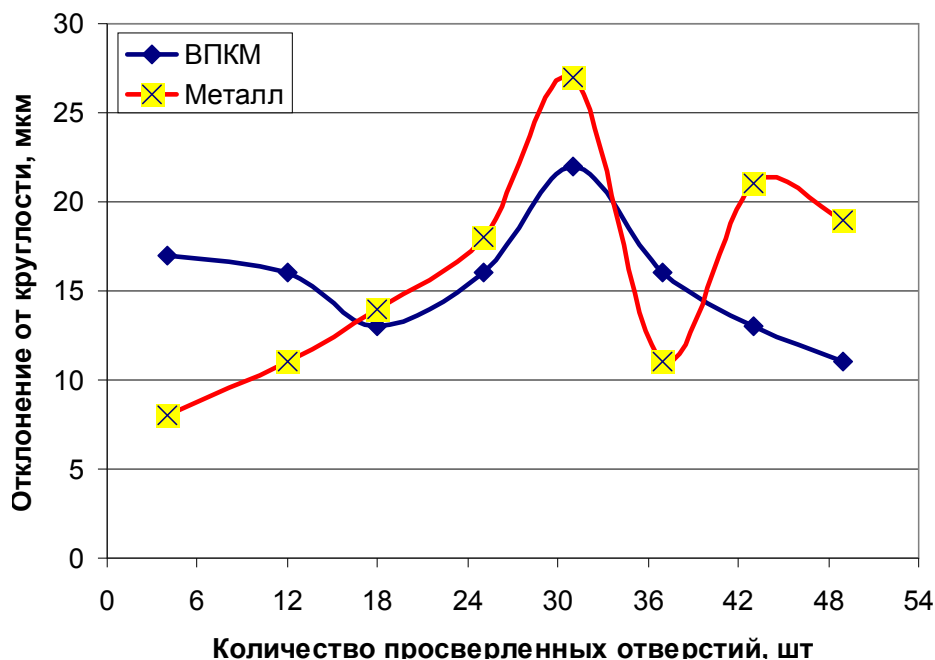


Рисунок 5.18 – Отклонение от формы цилиндрического отверстия на различных этапах обработки

По всей видимости существенные колебания отклонения от круглости обусловлены прохождением сверлом периода приработки. Данный этап износа инструмента может характеризоваться существенным влиянием случайных факторов не стабилизировавшегося режима износа. Колебание отклонения от круглости при измерении в ВПКМ может быть вызвано значительными дефектами микрогеометрии обработанной поверхности.

Измерение отклонение от круглости на стыке компонентов пакета средствами кругломера, следует признать не удовлетворительными, по причине не возможности гарантировать достоверные измерение. Существенная погрешность измерений на границе соединения ВПКМ и металла обусловлена соскальзыванием иглы кругломера, то на ВПКМ, то на металл.

Визуальная оценка отверстий на предмет наличия характерных для ВПКМ дефектов: расслаивания, не срезанный волокон, подтвердила их наличие (рис.5.19).



Рисунок 5.19 – Характерные повреждения отверстий пакета ВПКМ/Металл на различных этапах обработки

Серия отверстия 5.1- 5.5 (нумерация отверстий слева на право) была выполнена после получения первой контрольной точки. Как можно видеть, отверстия выполнены без видимых повреждений. По мере роста фаски износа начиная с серии отверстий 9.1-9.5 проявляется некоторые ухудшения качества поверхностного слоя ВПКМ, выражаемые в незначительном расслаивании верхних слоев ВПКМ и единичных не срезанных волокнах. Эти отклонения еще трудно назвать дефектами. По результатам сверления следующей серии отверстий (11.1-11.5) расслаивание верхних слоев ВПКМ становится очевидным. Уже при сверлении отв.11.1 наблюдается полное отделение и удаления фрагмента верхнего слоя композиционного материала. Характерной особенностью расслаивания верхних слоев, является наличие ореола вокруг отверстия, сформированного отделенными, но не срезанными слоями ВПКМ.

Результаты дальнейшей механической обработки пакета ВПКМ/металл подтвердили установившуюся тенденцию на развитие расслаивания верхних слоев ВПКМ (рис.5.19).

Наиболее ярко дефекты механической обработки в виде не срезанных волокон проявились в при сверлении отверстий 17.2, 19.3 и 21.3. Не смотря на не значительную фаску износу при сверлении отв. 21.3 верхние слои ВПКМ были разрушены с частичным отделением. При сверлении серии отверстий 21.1- 21.3 наблюдается стремительное ухудшение качества отверстий выражающееся в несрезанных волокнах, расслаивании и отрыве слоев ВПКМ. По нашим наблюдениям столь стремительное ухудшение качества отверстий обусловлено не только развитием фаски износа, но и интенсивным износом вершины сверла. Разрушение верхних слоев ВПКМ вызвано именно износом вершин сверла, выражаемым в увеличении радиуса округления линии сопряжения передней поверхности главной режущей кромки и задней поверхности вспомогательной режущей кромки.

Следует отметить, полученные повреждения были обусловлены не только изменения микрогеометрии сверла, и особенностями структуры ВПКМ. Не смотря на то, что волокно и матрица по отдельности имеют различные свойства и подвержены различным механизмам разрушения будучи объединенными в один материал (ВПКМ) его разрушение носит хрупкий характер. Как известно матрица подвержена пластичному механизму разрушения, а волокно хрупкому. Данный вывод был сделан по итогам анализа стружки ВПКМ и характеру повреждений отверстий 21.1-21.3.

В подтверждение тезиса о причинно – следственной связи изменения геометрии вершин сверла и характере повреждений отв. 21.1-21.3 свидетельствует факт отсутствия серьезных повреждений цилиндрической поверхности отверстия, формируемой в большей степени вспомогательной режущей кромкой сверла, нежели вершиной. Дефекты отверстий из серии 21.1-21.3 позволяют сделать вывод о неудовлетворительности качества отверстий и их дальнейшей эксплуатационной непригодности. На этом основании можно считать инструмент изношенным и не пригодным для использования в нынешнем его состоянии (рис.5.20).



Рисунок 5.20 – Характерные дефекты отверстий после сверления

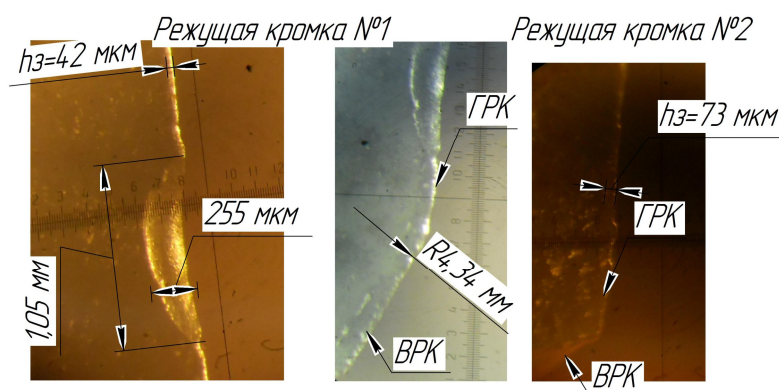


Рисунок 5.21 – Состояние главных режущих кромок сверла по итогам сверления всех запланированных отверстий

На главной режущей кромке (ГРК) №1 сформировался скол  $0,255 \times 1,05$  мм, фаска износа составила 42 мкм, в то время как износ по ГРК №2 составил 73 мкм. Оговоримся, что на рис. 5.11-5.12 изображена режущая кромка №2. Более того вершина режущей кромки №1, расположенная в точке соединения

передней поверхности, главной задней поверхности и ленточки, существенно изменила свою геометрию, приняв форму дуги с радиусом 4,34 мм.

Таким образом, несмотря на то, что сверло остается работоспособным еще при величине фаски износа 0,05 мм, в этом состоянии оно не может формировать качественные отверстия. Поэтому критерием износа сверла следует принять фаску износа 0,03 мм, обеспечивающую формирования качественных отверстий без расслоений на входе.

## 5.5 Выводы

1. Угол направленности волокон влияет на среднюю величину силы резания и амплитуду ее колебаний. Наибольшее значение силы резания наблюдается при  $\theta=0^\circ$ , а наименьшее значение силы резания зафиксировано при  $\theta=45^\circ, 135^\circ$ .
2. Повреждение обработанной поверхности также зависит от ориентации волокон. На торцевой плоскости они зависят от угла, на боковой поверхности отверстия они зависят от угла  $\theta$ . Наименьшее повреждение наблюдаются при  $\theta=45^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ .
3. При сверлении смешанных пакетов ВПКМ/ металл выделяют два основных механизма изнашивания: механический и термохимический. В некоторых случаях, наиболее неблагоприятным является сочетание абразивного, адгезионно – усталостного и химического видов изнашивания, возникающего при обработке пакета ВПКМ/ Металл;
4. Наиболее неблагоприятным сочетанием материалов пакета, с точки зрения воздействия температурных эффектов на инструмент и обрабатываемый материал является комбинация ВПКМ/ Металл. Сверление пакета ВПКМ/Металл сопровождается существенным изменением температуры в зоне резания при переходе сверла из ВПКМ в Металл. Так при сверлении ВПКМ максимальная температура составила  $93^\circ\text{C}$ , в то время сверление металла -  $255^\circ\text{C}$ . Резервом для снижения

температуры резания на 15-20°C является обеспечение надежного стружкоотвода ВПКМ стружки.

5. Одновременная обработка ВПКМ и Металла провоцирует более стремительное повышение температуры в зоне резания в сравнении с обработкой только в ВПКМ. Так при сверлении ВПКМ скорость роста температуры составила 3.2 °C/с, в то время как при работе сверла одновременно в ВПКМ/Металл 9.8°C/с;
6. На изменение температуры в зоне резания оказывают влияние увеличение фаски износа по задней поверхности и наростообразование на передней поверхности сверла;
7. На качество отверстий в пакете ВПКМ/Металл оказывает влияние температура в зоне резания и состояние главной и вспомогательной режущих кромок. С увеличением износа увеличиваются расслоения, отклонения от круглости, и глубина дефектов обработанной поверхности. Образование сколов на режущих кромках резко ухудшают качество отверстий в ВПКМ, но мало влияют на качество отверстий в металле;
8. Описанные в литературных источниках критерии работоспособности сверл, при обработке ВПКМ и металлов по отдельности, не применимы к пакетной обработке. Существенное влияние на расслаивание ВПКМ оказывает износ вершин сверла, который приводит к изменению механизма стружкообразования и как следствия смятию, а не срезанию волокон ВПКМ. Из геометрических параметров сверла наибольшее влияние на расслаивание оказывает угол при вершине  $2\phi$ .
9. Критерии износа сверл зависят от порядка слоев в пакете. При сверлении пакета ВПКМ/Металл критерием износа сверла следует принять фаску износа, обеспечивающую формирования качественных отверстий без расслоений на входе. Вместе с тем при сверлении Металл/ВПКМ критерием износа является температура на границе листов в момент полного выхода главной режущей кромки из листа металла, обеспечивая тем самым отсутствие термической деструкции ВПКМ.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Основными технологическими проблемами, которые возникают в процессе сверления пакетов ВПКМ/Металл являются трудности с обеспечением требуемого качества поверхностного слоя отверстия, повышенный износ режущего инструмента, сложность сочетание разных режимов обработки материалов пакета в одном цикле.
2. Разработан комплекс технологий и методик исследования физико-механических и трибологических свойств ВПКМ, а также исследования показателей процесса сверления, в том числе измерения температурного поля инструмента вдоль режущей кромки.
3. Используя метод конечных элементов разработана адекватная модель процесса резания при обработке осевым инструментом, в том числе при сверлении в главной секущей плоскости главной режущей кромки. Модель разработана на микромеханическом уровне: матрица и волокна рассматривались как отдельные материалы с различными определяющими уравнениями, уравнениями и критериями разрушения. Модель позволяет прогнозировать силы резания, глубину повреждения поверхностного слоя и вытягивания волокон.
4. На основе моделирования процесса резания впервые установлено и подтверждено экспериментально, что наименьшая глубина повреждений наблюдается при углах направленности волокна  $\theta=45^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ , а наибольшая при  $\theta=0^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ . По результатам механической обработки наибольшее количество повреждений в виде вытягивания и не срезанных волокон обнаружено в образцах с углами  $\theta=135^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ . Наиболее качественная поверхность, без видимых повреждений получена при обработке образца с углами  $\theta=45^\circ$  и  $\eta=90^\circ$ .
5. Характер изменения температуры резания при сверлении смешанных пакетов существенно зависит от порядка слоев в пакете. Наиболее неблагоприятным сочетанием материалов пакета, с точки зрения



воздействия температурных эффектов на инструмент и обрабатываемый материал является комбинация ВПКМ/ Металл. Сверление пакета ВПКМ/Металл сопровождается существенным изменением температуры в зоне резания при переходе сверла из ВПКМ в Металл. С другой стороны, с точки зрения расслоений наиболее неблагоприятной является комбинация Металл/ ВПКМ.

6. В силу указанных температурных эффектов критерии износа сверл также зависят от порядка слоев в пакете. При сверлении пакета ВПКМ/Металл критерием износа сверла следует принять фаску износа, обеспечивающую формирования качественных отверстий без расслоений на входе. Вместе с тем при сверлении Металл/ВПКМ критерием износа является температура на границе листов в момент полного выхода главной режущей кромки из листа металла, обеспечивая тем самым отсутствие термической деструкции ВПКМ.

Рекомендуемые ниже условия обработки пакетов ВПКМ/ металл применимы для повышения качества поверхностного слоя отверстий в конструкциях с применением композиционных материалов с углеродными армирующими волокнами на полимерной основе в сочетании с нелегированными конструкционными сталями. Данные рекомендации могут быть реализованы в рамках процессов лезвийной осевой обработки: сверления, рассверливания, зенкование, развертывания, но не применимы при спиральном фрезеровании. Установленные зависимости справедливы для сверл из мелкозернистых твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

Повышение производительности обработки отверстий в углепластике возможно повышением скорости резания до 40 м/мин, а подачи до 0.05 мм/об. При этом предельной подачей является подача расслаивания. Применение подкладных или накладных пластин делает возможным увеличение подачи, исключая расслоения на входе и/или выходе сверла. Повышение скорости резания снизит вероятность формирования и развития нароста, вместе с тем

уменьшится величина застойной зоны, что ускорит отвод стружки из зоны резания.

При сверлении смешанных пакетов минимизация влияния градиента температуры в ВПКМ и в металле возможна за счет использования промежуточного слоя между этими материалами состоящего из слоя стекловолокна. Данный эффект обусловлен меньшим, в сравнении с углепластиком, абразивным воздействием на инструмент и как следствие более низкой температурой резания. Таким образом наличие промежуточного слоя позволит уменьшить скорость роста температуры при переходе от слоя к слою при обработке пакета. Промежуточный слой может быть включен в структуру пакета на этапе формовки, что существенно не усложнит процесс создания композиционного материала.

Устранение расслаивания верхних слоев ВПКМ может быть устранено за счет использования накладных пластин в том числе и при сверлении пакета ВПКМ/металл. Это позволит увеличить предельные значения подачи и полностью использовать ресурс инструментов. Действительно рекомендуемые критерии износа для твердосплавных сверл при сверлении пакета углепластик/Металл: без накладных пластин – величина фаски на задней поверхности 0.03 мм; с накладной пластиной – величина фаски на задней поверхности не менее 0.05 мм.

При развертывании режим резания следует назначить в два раза меньше чем при сверлении, например, скорость резания - 20 м/мин при подаче в 0,02 мм/об для рассмотренного случая.

**ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК**

1. Рудой Б. Н. Композиты / Б. Н. Рудой. – М. : Московский рабочий, 1976. – 144 с.
2. Андреева А. В. Основы физикохимии и технологии композитов / А. В. Андреева. – М. : ИПРЖР, 2001. – 192 с.
3. Мао К. A new approach for polymer composite gear design / К. Мао // Wear. – 2007. – № 262. – P. 432–441.
4. Wear behaviour of acetal gears / A. Breeds, S. Kukureka, K. Mao et al. // Wear. – 1993. – Issue 166. – № 1. – P. 85–89.
5. Hooke S. J. Measurement and prediction of the surface temperature in polymer gears and its relation to surface wear / S. J. Hooke, K. Mao, D. Walton // Journal of Tribology. – 1993. – Issue 115. – № 1. – P. 119–124.
6. Справочник по композиционным материалам : В 2- х т. / Под ред. Д. Любин. – М. : Машиностроение, 1988. – Т.2. – 584 с.
7. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы / Под ред. П. Г. Бабаевского. – М. : Химия, 1977. – 472 с.
8. BS 6168:1987. Specification for nonmetallic spur gears.; introduction. 31.03.1987. – London, 1987. – 5 p.
9. Скудра А. М. Прочность армированных пластиков / А. М. Скудра, Ф. Я. Булавс – М. : Химия, 1982. – 216 с.
10. Мао К. The Performance of Dry Running Non-metallic Gears : Ph.D. thesis : 05.03.01 / К. Мао. – Birmingham, 1993.
11. Walton D. A comparison of ratings for plastic gears / D. Walton, Y. Shi // Proc. Instit.Mech. Eng. – 1989. – № 203. – P. 31–38.
12. A new experimental approach for measuring thermal behaviour in the case of nylon 6/6 cylindrical gears / E. Letzelter, M.Guingand, J. P. Vaujany, P. Schlosser // Polymer Testing. – 2010. – № 29. – P. 1041–1051.

13. Lin A. Dynamic interaction between contact loads and tooth wear of engaged plastic gear pairs / A. Lin, J. Kuang // *Int. J. of Mechanical Science*. – 2007. – № 50. – P. 205–213.
14. Tsai M. H. A method for calculating static transmission errors of plastic spur gears using FEM evaluation / M. H. Tsai, Y. C. Tsai // *Finite Element Analysis Design*. – 1997. – № 27. – P. 345–357.
15. Kurokawa M. Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone / M. Kurokawa, Y. Uchiyama, S. Nagai // *Tribology International*. – 1999. – № 32. – P. 491–497.
16. The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact / S. N. Kukureka, S. J. Hooke, M. Rao, P. Liao // *Tribology International*. – 1999. – № 32. – P. 107–116.
17. Sheikh-Ahmad J. Y. *Machining of Polymer Composites. Technology & Engineering*, 2008. – 230 с.
18. Ghidossi P. Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique : дисс. канд. техн. наук : 05.03.01 / P. Ghidossi. – Ecole, 2003. – 166 с.
19. Ilescu D. Approches experimentale et numerique de l'usinage a sec des composites carbone/эроху : дисс. канд. техн. наук : 05.03.01 / D. Ilescu. – Paris, 2008. – 219 с.
20. Основи теорії різання матеріалів: підручник / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок, В. О. Залюга. – Львів : Новий світ, 2010. – 422 с.
21. Внуков Ю. Н. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів / Ю. Н. Внуков, В. А. Залюга. – Суми : СумГУ, 2010. – 245 с.
22. Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates / A. T. Marques, L. M. Durão, A. G. Magalhães, J. M. Tavares // 16th international conference on composite materials. – Porto, 2007. – P. 1–10.
23. Davim J. P. *Machining of composite materials* / J. P. Davim. – London : Wiley, 2010. – 262 p.

24. Rawat S. Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites / S. Rawat, H. Attia // *Wear*. – 2009. – № 267. – P. 1022–1030.
25. Faraz A. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2009. – № 49. – P. 1185–1196.
26. Faria P. E. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite / P. E. Faria, J. C. Campos Rubio, A. M. Abrao // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2009. – Vol. 28, № 19. – P. 2353–2364.
27. Sedlacek J. Analysis of delamination in drilling of composite materials / J. Sedlacek, M. Slany // *Science Journal*. – 2010. – № 6. – P. 194–197.
28. Drilling Induced Damage in FRP Composite Laminates / I. Singh, D. Nayak, R. Saxena, N. Bhatnagar // *IE(I) Journal-MM*. – 2004. – Vol. 85. – P. 37–40.
29. Fernandes M. Intelligent automated drilling and reaming of carbon composites : Ph.D. thesis : 05.03.01 / M. Fernandes. – University of Wollongong, 2005. – 195 p.
30. Tsao C. C. Effect of Tool Wear on Delamination in Drilling Composite Materials / C. C. Tsao, H. Hocheng // *Int. J. of Mechanical Science*. – 2007. – Vol. 49. – P. 983–988.
31. Davim J. P. Drilling of composite materials / J. P. Davim. – New York : Nova Science Publishers, 2009. – 179 p.
32. Zitoune R. Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long fibre composite structures / R. Zitoune, F. Collombet // *Composites*. – 2007. – Vol. 38. – P. 858–866.
33. Koboević N. Metode i načini osiguranja kvalitete pri izradi otvora bušenjem u kompozitnim materijalima (Methods and Ways of Ensuring Hole Fabrication Quality During Drilling Process of Composite Materials) : Master's thesis: 05.03.01 / N. Koboević. – Dubrovniku, 2003. – 151 p.
34. Madiwal S. Analysis of surface finish in drilling of composites using neural networks / S. Madiwal // B. E, Karnatak University. – 2006. – P. 1–94.
35. Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // *Composite Structures*. – 2001. – Vol. 52. – P. 511–516.

36. Comparison of Tool Effects on Hybrid Laminates after Drilling / L. M. Durão, J. M. Tavares, A. T. Marques et al. // 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design. – Porto, 2006. – P. 1–14.
37. Durão L. M. Machining of hybrid composites : Ph.D. thesis: 05.03.01 / L. M. Durão. – Porto, 2005. – 242 p.
38. Machining carbon fibre materials:user's guide / Sandvik Coromant. – 2010. – 63 c.
39. Campbell F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites / F. C. Campbell. – Issue 1. – Elsevier Science, 2004. – 532 p.
40. Assessment of the exit defects in carbon fiber – reinforced plastic plates caused by drilling / H. Zhang, W. Chen, D. Chen, L. Zhang // Key Engineering Materials. – 2001. – № 196. – P. 43–52.
41. Chen W. Some experimental investigations in the drilling of Carbon Fibre-Reinforced Plastic (CFRP) composite laminates / W. Chen // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 1997. – № 37. – P. 1097–1108.
43. Kim D. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks / D. Kim, M. Ramulu // Composite Structures. – 2004. – № 63. – P. 101–114.
44. Brinksmeier E. Drilling of Multi-Layer Composite Materials consisting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), Titanium and Aluminum Alloys / E. Brinksmeier, R. Janssen // CIRP Annals–Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 51. – P. 87–90.
45. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills / R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider // Composites. – 2000. – Vol. 31. – P. 1107–1115.
46. Tsao C. C. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill / C. C. Tsao, H. Hocheng // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – № 45. – P. 1261–1270.
48. Zitoune R. Study of drilling of composite material and aluminium stack / R. Zitoune, V. Krishnaraj, F. Collombet // Composite Structures. – 2010. – № 92. – P. 1246–1255.

49. Ramulu M. A study on the drilling of composite and titanium stacks / M. Ramulu, T. Branson, D. Kim // Composite Structures. – Washington, 2001. – № 54. – P. 67–77.
50. Garrick R. Drilling Advanced Aircraft Structures with PCD (Poly-Crystalline Diamond) Drills / R. Garrick // SAE International. – Utah U.S.A, 2007. – P. 1–9.
51. Vijayaraghavan A. Drilling of Fiber-Reinforced Plastics : Tool Modeling and Defect Prediction / A. Vijayaraghavan. – 2006. – 46 p.
52. ASM Handbook : in 22 Vol. : ASM International, 2001. – Vol.21: Composites. – 2605 p.
53. Дрожжин В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс : автореф. дисс. докт. техн. наук : 05.03.01 / В. И. Дрожжин. – Харків : ХПИ. – 1982. – 32 с.
54. Везуб Н. В. Научные основы высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов : автореф. дисс. докт. техн. наук : 05.03.01 / Н. В. Везуб. – Х. : ХНИИТМ. – 1995. – 43 с.
55. Кравченко Л. С. Исследование процесса сверления слоистых пластмасс : автореф. дисс. канд. техн. наук : 05.03.01 / Л. С. Кравченко . – Харків : ХПИ. – 1973. – 19 с.
56. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов / А. А. Степанов. – Л. : Машиностроение, 1987. – 176 с.
57. Штучный Б. П. Обработка резанием пластмасс / Б. П. Штучный. – М. : Машиностроение, 1974. – 144 с.
58. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – М. : Высшая школа, 1974. – 587 с.
59. Сороченко В. Г. Теплообразование и температура резания при алмазно-абразивном шлифовании полимерных композиционных материалов / В. Г. Сороченко. – 2009. – Т. 38. – С. 214–224.
60. Лупкин Б. В. Механическая обработка композиционных материалов / Б. В. Лупкин, О. В. Мамлюк // Труды Международной ежегодной научно-

практической конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Славполикком). – Ялта, 2001. – С. 70–79.

61. Machining of fibre reinforced plastics / W. Konig, C. Wulf, P. Graß, H. Willercheid // *Annals of CIRP*. – 1985. – Vol. 34. – P. 537–548.

62. Kim D. Study on the Drilling of Titanium/Graphite Hybrid Composites / D. Kim, M. Ramulu // *Transactions of the ASME*. – 2007. – № 129. – P. 390–396.

63. Kentli A. Experimental study on peck drilling of GFRP and prediction of drilling-induced damage using ANN / A. Kentli // *Scientific Research and Essays*. – 2011. – Vol. 6. – P. 1546–1554.

64. Mishra R. Prediction of drilling-induced damage in unidirectional glass-fibre-reinforced plastic laminates using an artificial neural network / R. Mishra, J. Malik, I. Singh // *Proceedings of the Institut. Mech. Eng. Part B : J. Eng. Man.* – 2010. – Vol. 224. – P. 733–738.

65. Tsao C. C. Prediction of thrust force of step drill in drilling composite material by Taguchi method and radial basis function network / C. C. Tsao // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 36. – P. 11–18.

66. Kadi H. Modeling the mechanical behavior of fiber reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks – a review / H. Kadi // *Composite Structures*. – 2006. – Vol. 73. – P. 1–23.

67. On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates / N. Bhatnagar, N. Ramakrishnan, N. K. Naik, R. Komanduri // *Int. J. of Machine tools & Manufacture*. – 1995. – Vol. 35. – P. 701–716.

68. Tsao C. C. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network / C. C. Tsao, H. Hocheng // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – № 203. – P. 342–348.

69. Tsao C. C. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material / C. C. Tsao, H. Hocheng // *Int. J. of Machine tools & Manufacture*. – 2004. – Vol. 44. – P. 1085–1090.



70. Hocheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / H. Hocheng, C. C. Tsao // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – № 140. – P. 335–339.
71. Jain S. Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composites drilling / S. Jain, D. C. Yang // *Trans. ASME*. – 1993. – Vol. 115. – P. 398–405.
72. Sadat A. B. Prediction of delamination load in drilling of graphite/epoxy composites / A. B. Sadat // *Engineering Systems Design and Analysis*. – 1996. – Vol. 3. – P. 21–26.
73. Puw H. Y. Anisotropic chip formation models of cutting of FRP / H. Y. Puw, H. Hocheng // *Proceedings of ASME Symposium on Material Removal and Surface Modification Issues in Machining Processes*. – New York, 1995. – P. 259–282.
74. Larsi L. Macromechanical and micromechanical modelling of machining long fiber reinforced polymer composites : Ph.D. thesis : 05.03.01 / L. Larsi. – Paris, 2009. – 150 p.
75. Arola D. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites : a finite element analysis / D. Arola, M. Ramulu // *Int. J. of Mechanical Science*. – 1997. – Vol. 39. – P. 597–613.
76. Mackerle J. Finite element analysis and simulation of machining: an addendum. A bibliography 1996-2002 / J. Mackerle // *Int. J. of Machine tools & Manufacture*. – 2003. – Vol. 43. – P. 103–114.
77. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів : автореф. дисс. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / Д. В. Криворучко. – Харків : СумГУ. – 2010. – 40 с.
78. Arola D. Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite / D. Arola, M. Ramulu, D. H. Wang // *Composites*. – 1996. – Vol. 27. – P. 121–133.
79. Mahdi M. I. A finite element model for the orthogonal cutting of fiber - reinforced composite materials / M. I. Mahdi, L. A. Zhang // *Jornal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 113. – P. 373–377.
80. Durão L. M. Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates / L. M. Durão, M. F. De\_Moura, A. T. Marques // *Composites*. – 2006. – № 37. – P. 1325–1333.

81. Durão L. M. Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling / L. M. Durão, M. F. De\_Moura, A. T. Marques // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – Vol. 75. – P. 2767–2778.
82. Budan D. A. Quality Assessment and Delamination Force Evaluation in Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Laminates – A Finite Element Analysis and Linear Elastic Fracture Mechanics Approach / D. A. Budan, S. Vijayarangan // Journal of Engineering Manufacture. – 2002. – Vol. 216. – P. 173–182.
83. Analytical models of composite material drilling / P. Rahmé, Y. Landon, F. Lachaud, R. Piquet // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 52, № 5. – P. 609–617.
84. Bhattacharya D. A Study of Hole Drilling in Kevlar Composites / D. Bhattacharya, D. P. Horrigan // Composites Science and Technology. – 1998. – Vol. 58, № 2. – P. 267–283.
85. Singh I. Drilling of Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Plastics: Experimental and Finite Element Study / I. Singh, N. Bhatnagar, P. Viswanath // Materials & Design. – 2008. – Vol. 29, № 2. – P. 546–553.
86. Delamination in Fiber Reinforced Plastics: A Finite Element Approach / P. K. Rakesh, V. Sharma, I. Singh, D. Kumar // Engineering. – 2011. – № 3. – P. 549–554.
87. Böhm A. FEM-Simulation der Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen mit Hilfe von LS-Dyna / A. Böhm. – Stuttgart : University of Stuttgart. – 2010. – 123 s.
88. Calzada K. Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced composites : Ph.D. thesis 05.03.01 / K. Calzada. – Urbana, 2010. – 129 p.
89. Rao G. V. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – Cutting force analysis / G. V. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar // Composites Science and Technology. – 2007. – Vol. 67, № 3. – P. 579–593.
90. Rao G. V. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism / G. V. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar // Composites Science and Technology. – 2007. – Vol. 67, № 11. – P. 2271–2281.

91. Analysis of Machining of FRPs Using FEM / M. V. Ramesh, K. N. Seetharamu, N. Ganesan, M. S. Sivakumar // *Int. J. of Machine tools & Manufacture*. – 1998. – Vol. 38. – P. 1531–1549.
92. Nayak D. Machining studies of UD-FRP composites. Part 2: Finite element analysis / D Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // *Machining Science and Technology*. – 2005. – Vol. 9. – P. 503–528.
93. Pramanik A. An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: Tool–particle interaction during orthogonal cutting / A. Pramanik, L. C. Zhang, J. A. Arsecularatne // *Int. J. of Machine tools & Manufacture*. – 2007. – Vol. 47. – P. 1497–1506.
94. Dandekar C. Multiphase Finite Element Modeling of Machining Unidirectional Composites: Prediction of Fiber Debonding and Damage / C. Dandekar, Y. C. Shin // *Machining Science and Technology*. – 2008. – Issue. 5. – Vol. 130. – P. 153–160.
95. Experimental calculation of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase / R. Zitoune, F. Collombet, F. Lachaud et al. // *Composites Science and Technology*. – 2005. – Vol. 65. – P. 455–466.
96. Hashin Z. J. Failure criteria for unidirectional fibre composites / Z. J. Hashin // *Journal of Applied Mechanics: Trans. ASME*. – 1980. – Vol. 47. – P. 329–334.
97. Puck A. Failure Analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models / A. Puck, H. Schumann // *Composites Science and Technology*. – 1998. – Vol. 58. – P. 1045–1067.
98. Wang D. H. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite: Part I: Unidirectional laminate / D. H. Wang, M. Ramulu, D. Arola // *Int. J. of Machine tools & Manufacture*. – 1995. – Vol. 35. – P. 1623–1638.
99. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 525 с.
100. Belytschko T. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures* / T. Belytschko. – John Wiley & Sons Inc, 2000. – 327 p.
101. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферова. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

102. Айвазян С. А. Прикладная статистика / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1975. – 487 с.
103. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К. : Высшая школа, 1976. – 184 с.
104. Семко М. Ф. Изучение стойкости режущих инструментов исследованием тепловых явлений//Резание металлов : сб. материалов к Всеукр. конф. по резанию металлов. -Х.: Український робітник, 1935. -Вып. 1. -С. 45- 54.
105. Семко М. Ф. Теплота різання і стійкість інструменту. -Харків: ДНТБУ, 1937. -145 с.
106. Рейхель В. Методика определения стойкости резца и обрабатываемости материала. - М: Мирвая техника, 1936. -320 с.
107. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. - М: Машиностроение, 1976. -278 с.
108. Rahman M. A Review on High-Speed Machining of Titanium Alloys / M. Rahman, Z. G. Wang, Y. S. Wong // JSME International Journal: Series III. – 2006. – Vol. 49, № 1. – P. 11–20.
109. Study on Near Dry Machining of Aluminum Alloys / H. Yoshimura, T. Moriwaki, N. Ohmae, T. Nakai // JSME International Journal: Series III. – 2006. – Vol. 49, № 1. – P. 83–89.
110. A Failure Analysis of an Experimental AlMgB14 Cutting Tool / J. L. Evans, L. Deshayes, D. G. Bhat, S. A. Batzer // Microscopy and Microanalysis. – 2010. – № 11. – P. 1598–1599.
111. Machining titanium and its alloys: state-of-the-art / W. Grzesik, S. Krol, L. Čížek, J. Hubáčková // Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. – 2005. – № 1. – P. 89–97.
112. Wada T. Cutting Performance of Diamond-Like Carbon Coated Tool in Cutting of Aluminum Alloys / T. Wada // Materials Science Forum. – 2010. – Vol. 638. – P. 368–373.
113. Abele E. High speed milling of titanium alloys / E. Abele, B. Fröhlich // Advances in Production Engineering & Management. – 2008. – № 3. – P. 131–140.

- 114 Machado A. R. Machining of titanium and its alloys / A. R. Machado, J. Wallbank // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. – 1990. – Vol. 204. – P. 53–60.
115. Khanna N. Cutting Tool Performance in Machining of Ti555.3, Timetal®54M, Ti 6-2-4-6 and Ti 6-4 Alloys: A Review and Analysis / N. Khanna, K. S. Sangwan // Proceeding of CIRP PMI 2010. – 2010. – P. 1–10.
116. Розенберг А. М., Еремин А. Н. Элементы теории процесса резания металлов. -М.: Машгиз, 1956. -319 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**(СПРАВОЧНОЕ)**

Информация о данных полученных при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 0°

\$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.2 - 31Mar2012(17:35)

\$# Created on Jul-11-2012 (14:52:18)

\*KEYWORD

\*TITLE

\$# title

\*CONTROL\_ACCURACY

\$# osu inn pidosu  
1 4 0

\*CONTROL\_BULK\_VISCOSITY

\$# q1 q2 type btype  
1.500000 0.060000 -2 0

\*CONTROL\_CONTACT

\$# slsfac rwpnal islchk shlthk penopt thkchg orien enmass  
0.010000 0.000 1 1 1 0 2 0

\$# usrstr usrfrc nsbcs interm xpene ssthk ecdt tiedprj  
0 0 0 0 0.000 0 0 0

\$# sfric dfric edc vfc th th\_sf pen\_sf  
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

\$# ignore frceng skiprwg outseg spotstp spotdel spothin  
0 0 0 1 0 1 0.500000

\$# isym nserod rwgaps rwgdlth rwksf icov swradf ithoff  
0 0 0 0.000 1.000000 0 0.000 0

```

$# shldg  pstiff  ithcnt  tdcnof  ftall  unused  shltrw
    0    0    0    0    0    0  0.000

*CONTROL_ENERGY
$# hgen  rwen  slnten  rylen
    2    1    2    2

*CONTROL_HOURLASS
$# ihq  qh
    5 0.100000

*CONTROL_SOLID
$# esort  fmatrix  niptets  swlocl  psfail
    1    0    0    2    0

$# pm1  pm2  pm3  pm4  pm5  pm6  pm7  pm8  pm9  pm10
    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0

*CONTROL_TERMINATION
$# endtim  endcyc  dtmin  endeng  endmas
    0.001000    0  0.000  0.000  0.000

*CONTROL_TIMESTEP
$# dtinit  tssfacs  isdo  tslimit  dt2ms  lctm  erode  mslst
    0.000 0.500000    0  0.000  0.000    0    0    0

$# dt2msf  dt2mslc  imslc
    0.000    0    0

*DATABASE_SECFORC
$# dt  binary  lcur  ioopt
    0.010000    2    0    1

*DATABASE_SPCFORC
$# dt  binary  lcur  ioopt
    1.0000E-5    2    0    1

*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$# dt  lcdt  beam  npltc  psetid
    0.000    0    0  100    0

```

```

$# iopt
    0
*DATABASE_BINARY_RUNRSF
$#  dt    nr  beam  npltc  psetid
    5000.0000    0    0    0    0
*DATABASE_FORMAT
$#  iform  ibinary
    0    0
*DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE_ID
$#  csid                                     title
    1
$#  psid   xct   yct   zct   xch   ych   zch  radius
    1 1.4912E-8 0.130000 -0.205000  0.000  0.000  1.000000 100.00000
$#  xhev   yhev   zhev   lenl   lenm   id   itype
    0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0    0
*SET_PART_LIST
$#  sid   da1   da2   da3   da4  solver
    1  0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  pid1   pid2   pid3   pid4   pid5   pid6   pid7   pid8
    1    3    0    0    0    0    0    0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$#  id                                     heading
    1move tool
$#  pid   dof   vad   lcid   sf   vid   death  birth
    2    1    0    1 1.000000  01.0000E+28  0.000
*BOUNDARY_SPC_SET
$#  nsid   cid   dofx   dofy   dofz   dofrx   dofry   dofrz
    1    0    1    1    1    1    1    1
*SET_NODE_LIST_TITLE
NODESET(SPC) 1

```



....

## \*CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_ID

```

$#   cid                      title
      1klin-plastic
$#   ssid   msid   sstyp   mstyp   sboxid   mboxid   spr   mpr
      1     2     2     3     0     0     0     0
$#   fs     fd     dc     vc     vdc   penchk     bt     dt
      0.500000  0.000  0.000  0.000  0.000     0  0.0001.0000E+20
$#   sfs    sfm    sst     mst    sfst    sfmt    fsf    vsf
      1.000000 1.000000  0.000  0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$#   isym  erosop  iadj
      0     1     1
$#   soft  sofsc1  lcidab  maxpar  sbopt  depth  bsort  frcfreq
      1 0.100000     0 1.025000 2.000000     2     0     1

```

## \*PART

```

$# title
plastic
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav  adpopt   tmid
      1     1     4     0     0     0     0     0

```

## \*SECTION\_SOLID

```

$#   secid  elform  aet
      1     1     0

```

## \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_TITLE

for plastic

```

$#   mid   ro     e     pr   sigy   etan   fail   tdel
      4 1.9000E-6 315.00000 0.200000  0.000  0.000 0.150000  0.000
$#   c     p   lcss  lcsr   vp
      0.000 0.000   0     0  0.000
$#   eps1   eps2   eps3   eps4   eps5   eps6   eps7   eps8
      0.000 0.018000 0.054000 0.073000 0.092000 0.112000 0.132000 1.000000

```

```

$#  es1    es2    es3    es4    es5    es6    es7    es8
    0.102000 0.232000 0.290000 0.315000 0.335000 0.345000 0.346000 0.400000
*PART
$# title
klin
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
    2    2    1    0    0    0    0    0
*SECTION_SOLID
$#  secid  elform  aet
    2    1    0
*MAT_RIGID_TITLE
for tool
$#  mid  ro  e  pr  n  couple  m  alias
    1 9.8000E-6 422.00000 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#  cmo  con1  con2
    1.000000 5 7
$# lco or a1  a2  a3  v1  v2  v3
    0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
carbon
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
    3    1    5    0    0    0    0    0
*MAT_ELASTIC_TITLE
for carbon
$#  mid  ro  e  pr  da  db not used
    5 1.9000E-6 45.000000 0.230000 0.000 0.000 0
*MAT_ADD_EROSION
$#  mid  excl  mxpres  mneps  effeps  voleps  numfip  ncs
    5 1234.0000 0.000 0.000 0

```

Информация о данных полученных при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 45°

# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.2 - 31Mar2012(17:35)

## Created on Jul-11-2012 (14:51:12)

\*KEYWORD

\*TITLE

## title

\*CONTROL\_ACCURACY

## osu inn pidosu  
1 4 0

\*CONTROL\_BULK\_VISCOSITY

## q1 q2 type btype  
1.500000 0.060000 -2 0

\*CONTROL\_CONTACT

## slsfac rwpnal islchk shlthk penopt thkchg orien enmass  
0.010000 0.000 1 1 1 0 2 0

## usrstr usrfrc nsbcs interm xpene ssthk ecdt tiedprj  
0 0 0 0 0.000 0 0 0

## sfric dfric edc vfc th th\_sf pen\_sf  
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

## ignore frceng skiprwg outseg spotstp spotdel spothin  
0 0 0 1 0 1 0.500000

## isym nserod rwgaps rwgdth rwksf icov swradf ithoff  
0 0 0 0.000 1.000000 0 0.000 0

## shledg pstiff ithent tdcnof ftall unused shltrw  
0 0 0 0 0 0 0.000

\*CONTROL\_ENERGY

```

$# hgen  rwen  slnten  rylen
    2    1    2    2
*CONTROL_HOURLGLASS
$# ihq    qh
    5 0.100000
*CONTROL_SOLID
$# esort  fmatrix  niptets  swlocl  psfail
    1    0    0    2    0
$# pm1    pm2    pm3    pm4    pm5    pm6    pm7    pm8    pm9    pm10
    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
*CONTROL_TERMINATION
$# endtim  endcyc  dtmin  endeng  endmas
    0.001000    0 0.000  0.000  0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$# dtinit  tssfacs  isdo  tslimit  dt2ms  lctm  erode  mslst
    0.000 0.500000    0 0.000  0.000    0    0    0
$# dt2msf  dt2mslc  imslc
    0.000    0    0
*DATABASE_SECFORC
$#  dt  binary  lcur  ioopt
    0.010000    2    0    1
*DATABASE_SPCFORC
$#  dt  binary  lcur  ioopt
    1.0000E-5    2    0    1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#  dt  lcdt  beam  npltc  psetid
    0.000    0    0  100    0
$# ioopt
    0
*DATABASE_BINARY_RUNRSF

```

```

$#  dt    nr  beam  npltc  psetid
5000.0000    0    0    0    0

*DATABASE_FORMAT
$#  iform  ibinary
    0    0

*DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE_ID
$#  csid                                title
    1

$#  psid   xct   yct   zct   xch   ych   zch  radius
    0 -0.097416  0.000 -0.358909  0.000  0.000  1.000000 100.00000

$#  xhev   yhev   zhev   lenl   lenm   id  itype
    0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0  0

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$#  id                                heading
    1move tool

$#  pid   dof   vad   lcid   sf   vid   death  birth
    2    1    0    1 1.000000  01.0000E+28  0.000

*BOUNDARY_SPC_SET
$#  nsid   cid   dofx   dofy   dofz   dofrx   dofry   dofrz
    2    0    1    1    1    0    0    0

*SET_NODE_LIST
.....

*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#  cid                                title
    1klin-plastic

$#  ssid   msid   sstyp  mstyp  sboxid  mboxid  spr  mpr
    1    2    2    3    0    0    0    0

$#  fs   fd   dc   vc   vdc  penchk  bt  dt
    0.500000  0.000  0.000  0.000  0.000  0  0.0001.0000E+20

$#  sfs   sfm   sst   mst   sfst  sfmt  fsf  vsf

```

```

1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
$# isym  erosop  iadj
    0    1    1
$# soft  sofsc1  lcidab  maxpar  sbopt  depth  bsort  frcfrq
    1 0.100000    0 1.025000 2.000000    2    0    1
*SET_PART_LIST
$#  sid   da1   da2   da3   da4  solver
    1 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
$# pid1  pid2  pid3  pid4  pid5  pid6  pid7  pid8
    1    3    0    0    0    0    0    0
*PART
$# title
plastic
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
    1    1    4    0    0    0    0    0
*SECTION_SOLID
$#  secid  elform  aet
    1    1    0
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
for plastic
$#  mid  ro  e  pr  sigy  etan  fail  tdel
    4 1.9000E-6 315.00000 0.200000 0.000 0.000 0.150000 0.000
$#  c  p  lcss  lcsr  vp
    0.000 0.000 0 0 0.000
$#  eps1  eps2  eps3  eps4  eps5  eps6  eps7  eps8
    0.000 0.018000 0.054000 0.073000 0.092000 0.112000 0.132000 1.000000
$#  es1  es2  es3  es4  es5  es6  es7  es8
    0.102000 0.232000 0.290000 0.315000 0.335000 0.345000 0.346000 0.400000
*PART
$# title

```

klin

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	2	2	1	0	0	0	0	0

\*SECTION\_SOLID

\$#	secid	elform	aet
	2	1	0

\*MAT\_RIGID\_TITLE

for tool

\$#	mid	ro	e	pr	n	couple	m	alias
	1	9.8000E-6	422.00000	0.300000	0.000	0.000	0.000	0.000

\$#	cmo	con1	con2
	1.000000	5	7

\$#	lco	or	a1	a2	a3	v1	v2	v3
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

\*PART

\$# title

carbon

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	3	1	5	0	0	0	0	0

\*MAT\_ELASTIC\_TITLE

for carbon

\$#	mid	ro	e	pr	da	db	not used
	5	1.9000E-6	45.000000	0.230000	0.000	0.000	0

\*MAT\_ADD\_EROSION

\$#	mid	excl	mxpres	mneps	effeps	voleps	numfip	ncs
	5	1234.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000000	1.000000

\$#	mnpres	sigp1	sigvm	mxeps	epssh	sigth	impulse	failtm
	1234.0000	0.300000	1234.0000	1234.0000	1234.0000	1234.0000	1234.0000	1234.0000
	1234.0000							

\*DEFINE\_CURVE

```

$#  lcid  sidr  sfa  sfo  ffa  offo  dattyp
    1    0  0.000  0.000  0.000  0.000  0

```

```

$#      a1      o1
    0.000    600.000000
    10000.000000    600.000000

```

```
*SET_NODE_LIST_TITLE
```

```
NODESET(SPC) 1
```

```

$#  sid  da1  da2  da3  da4  solver
    1

```

Информация о данных полученных при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 90°

```
$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.2 - 31Mar2012(17:35)
```

```
$# Created on Jul-11-2012 (14:49:45)
```

```
*KEYWORD
```

```
*TITLE
```

```
$# title
```

```
*CONTROL_ACCURACY
```

```

$#  osu  inn  pidosu
    1    4    0

```

```
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
```

```

$#  q1  q2  type  btype
    1.500000  0.060000  -2  0

```

```
*CONTROL_CONTACT
```

```

$#  slsfac  rwpnal  islchk  shlthk  penopt  thkchg  orien  enmass
    0.010000  0.000  1  1  1  0  2  0

```

```

$#  usrstr  usrfrc  nsbcs  interm  xpene  ssthk  ecdt  tiedprj
    0  0  0  0  0.000  0  0  0

```

```

$#  sfric  dfric  edc  vfc  th  th_sf  pen_sf

```



```

0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$# ignore  frceng  skiprwg  outseg  spotstp  spotdel  spothin
      0      0      0      1      0      1 0.500000
$# isym  nserod  rwgaps  rwgdth  rwksf  icov  swradf  ithoff
      0      0      0 0.000 1.000000      0 0.000      0
$# shledg  pstiff  ithcnt  tdcnof  ftall  unused  shltrw
      0      0      0      0      0      0 0.000

*CONTROL_ENERGY
$# hgen  rwen  slnten  rylen
      2      1      2      2

*CONTROL_HOURLASS
$# ihq  qh
      5 0.100000

*CONTROL_SOLID
$# esort  fmatrix  niptets  swlocl  psfail
      1      0      0      2      0
$# pm1  pm2  pm3  pm4  pm5  pm6  pm7  pm8  pm9  pm10
      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0

*CONTROL_TERMINATION
$# endtim  endcyc  dtmin  endeng  endmas
      0.001000      0 0.000 0.000 0.000

*CONTROL_TIMESTEP
$# dtinit  tssfac  isdo  tslimit  dt2ms  lctm  erode  ms1st
      0.000 0.500000      0 0.000 0.000      0      0      0
$# dt2msf  dt2mslc  imsel
      0.000      0      0

*DATABASE_SECFORC
$# dt  binary  lcur  ioopt
      0.010000      2      0      1

*DATABASE_SPCFORC

```

```

$#  dt  binary  lcur  iopt
1.0000E-5    2    0    1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#  dt  lcdt  beam  npltc  psetid
0.000    0    0    100    0
$#  iopt
0
*DATABASE_BINARY_RUNRSF
$#  dt  nr  beam  npltc  psetid
5000.0000    0    0    0    0
*DATABASE_FORMAT
$#  iform  ibinary
0    0
*DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE_ID
$#  csid          title
1
$#  psid  xct  yct  zct  xch  ych  zch  radius
1 -1.490E-8  0.000 -0.215000  0.000  0.000  1.000000 100.00000
$#  xhev  yhev  zhev  lenl  lenm  id  itype
0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0  0
*SET_PART_LIST
$#  sid  da1  da2  da3  da4  solver
1  0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  pid1  pid2  pid3  pid4  pid5  pid6  pid7  pid8
1  3  0  0  0  0  0  0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$#  id          heading
1move tool
$#  pid  dof  vad  lcid  sf  vid  death  birth
2  1  0  1  1.000000  01.0000E+28  0.000

```

## \*BOUNDARY\_SPC\_SET

\$#	nsid	cid	dofx	dofy	dofz	dofrx	dofry	dofrz
	2	0	1	1	1	0	0	0

## \*SET\_NODE\_LIST\_TITLE

NODESET(SPC) 2

.....

## \*CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_ID

\$#	cid	title							
	1	klin-plastic							
\$#	ssid	msid	sstyp	mstyp	sboxid	mboxid	spr	mpr	
	1	2	2	3	0	0	0	0	
\$#	fs	fd	dc	vc	vdc	penchk	bt	dt	
	0.500000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	1.0000E+20	
\$#	sfs	sfm	sst	mst	sfst	sfmt	fsf	vsf	
	1.000000	1.000000	0.000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
\$#	isym	erosop	iadj						
	0	1	1						
\$#	soft	sofscl	lcidab	maxpar	sbopt	depth	bsort	frcfreq	
	1	0.100000	0	1.025000	2.000000	2	0	1	

## \*PART

\$# title

plastic

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	1	1	4	0	0	0	0	0

## \*SECTION\_SOLID

\$#	secid	elform	aet
	1	1	0

## \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_TITLE

for plastic

\$#	mid	ro	e	pr	sigy	etan	fail	tdel
-----	-----	----	---	----	------	------	------	------

```

      4 1.9000E-6 315.00000 0.200000 0.000 0.000 0.150000 0.000
$#   c    p   lcss   lcsr   vp
      0.000 0.000    0    0 0.000
$#  eps1   eps2   eps3   eps4   eps5   eps6   eps7   eps8
      0.000 0.018000 0.054000 0.073000 0.092000 0.112000 0.132000 1.000000
$#   es1    es2    es3    es4    es5    es6    es7    es8
      0.102000 0.232000 0.290000 0.315000 0.335000 0.345000 0.346000 0.400000
*PART
$# title
klin
$#  pid  secid   mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      2    2    1    0    0    0    0    0
*SECTION_SOLID
$#  secid  elform  aet
      2    1    0
*MAT_RIGID_TITLE
for tool
$#  mid    ro    e    pr    n  couple    m  alias
      1 9.8000E-6 422.00000 0.300000 0.000 0.000 0.000
$#  cmo    con1   con2
      1.000000    5    7
$# lco or a1  a2  a3  v1  v2  v3
      0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
carbon
$#  pid  secid   mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
      3    1    5    0    0    0    0    0
*MAT_ELASTIC_TITLE
for carbon

```

```

$# mid ro e pr da db not used
    5 1.9000E-6 45.000000 0.230000 0.000 0.000 0
*MAT_ADD_EROSION
$# mid excl mxpres mneps effeps voleps numfip ncs
    5 1234.0000 0.000 0.000 0.000 0.000 1.000000 1.000000
$# mnpres sigp1 sigvm mxeps epssh sigth impulse failtm
1234.0000 0.300000 1234.0000 1234.0000 1234.0000 1234.0000 1234.0000
1234.0000
*DEFINE_CURVE
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
    1 0 0.000 0.000 0.000 0.000 0
$# a1 o1
    0.000 600.000000
10000.000000 600.000000

```

Информация о данных полученных при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 135°

DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.2 - 31Mar2012(17:35)

\$# Created on Oct-02-2012 (14:46:21)

\*KEYWORD

\*TITLE

\$# title

\*CONTROL\_ACCURACY

```

$# osu inn pidosu
    1 4 0

```

\*CONTROL\_BULK\_VISCOSITY

```

$# q1 q2 type btype
1.500000 0.060000 -2 0

```

## \*CONTROL\_CONTACT

```
$# slsfac  rwpnal  islchk  shlthk  penopt  thkchg  orien  enmass
  0.010000  0.000    1      1      1      0      2      0
```

```
$# usrstr  usrfrc  nsbcs  interm  xpene  ssthk  ecdt  tiedprj
   0      0      0      0  0.000    0      0      0
```

```
$# sfric  dfric  edc  vfc  th  th_sf  pen_sf
  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
```

```
$# ignore  frceng  skiprwg  outseg  spotstp  spotdel  spothin
   0      0      0      1      0      1  0.500000
```

```
$# isym  nserod  rwgaps  rwgdlth  rwksf  icov  swradf  ithoff
   0      0      0  0.000  1.000000    0  0.000    0
```

```
$# shldg  pstiff  ithcnt  tdcnof  ftall  unused  shltrw
   0      0      0      0      0      0  0.000
```

## \*CONTROL\_ENERGY

```
$# hgen  rwen  slnten  rylen
   2      1      2      2
```

## \*CONTROL\_HOURLGLASS

```
$# ihq  qh
   5  0.100000
```

## \*CONTROL\_SOLID

```
$# esort  fmatrix  niptets  swlocl  psfail
   1      0      0      2      0
```

```
$# pm1  pm2  pm3  pm4  pm5  pm6  pm7  pm8  pm9  pm10
   0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
```

## \*CONTROL\_TERMINATION

```
$# endtim  endcyc  dtmin  endeng  endmas
  0.001000    0  0.000  0.000  0.000
```

## \*CONTROL\_TIMESTEP

```
$# dtinit  tssfacs  isdo  tslimit  dt2ms  lctm  erode  ms1st
  0.000  0.500000    0  0.000  0.000    0    0    0
```

```

$# dt2msf dt2mslc  imslc
    0.000    0    0
*DATABASE_SECFORC
$#  dt  binary  lcur  iopt
    0.010000    2    0    1
*DATABASE_SPCFORC
$#  dt  binary  lcur  iopt
    1.0000E-5    2    0    1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#  dt  lcdt  beam  npltc  psetid
    0.000    0    0    100    0
$# iopt
    0
*DATABASE_BINARY_RUNRSF
$#  dt  nr  beam  npltc  psetid
    5000.0000    0    0    0    0
*DATABASE_FORMAT
$# iform  ibinary
    0    0
*DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE_ID
$#  csid                                title
    1
$#  psid  xct  yct  zct  xch  ych  zch  radius
    1 -0.081041 -2.529E-9 -0.384853  0.000  0.000  1.000000 100.00000
$#  xhev  yhev  zhev  lenl  lenm  id  itype
    0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0  0
*SET_PART_LIST
$#  sid  da1  da2  da3  da4  solver
    1  0.000  0.000  0.000  0.000MECH
$#  pid1  pid2  pid3  pid4  pid5  pid6  pid7  pid8

```

```
1 3 0 0 0 0 0 0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$# id heading
1move tool
$# pid dof vad lcid sf vid death birth
2 1 0 1 1.000000 01.0000E+28 0.000
*BOUNDARY_SPC_SET
$# nsid cid dofz dofz dofz dofz dofz dofz
2 0 1 1 1 0 0 0
*SET_NODE_LIST
.....
```



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б (СПРАВОЧНОЕ)

Этапы обработки ВПКМ с углом направленности волокон  $0^\circ$

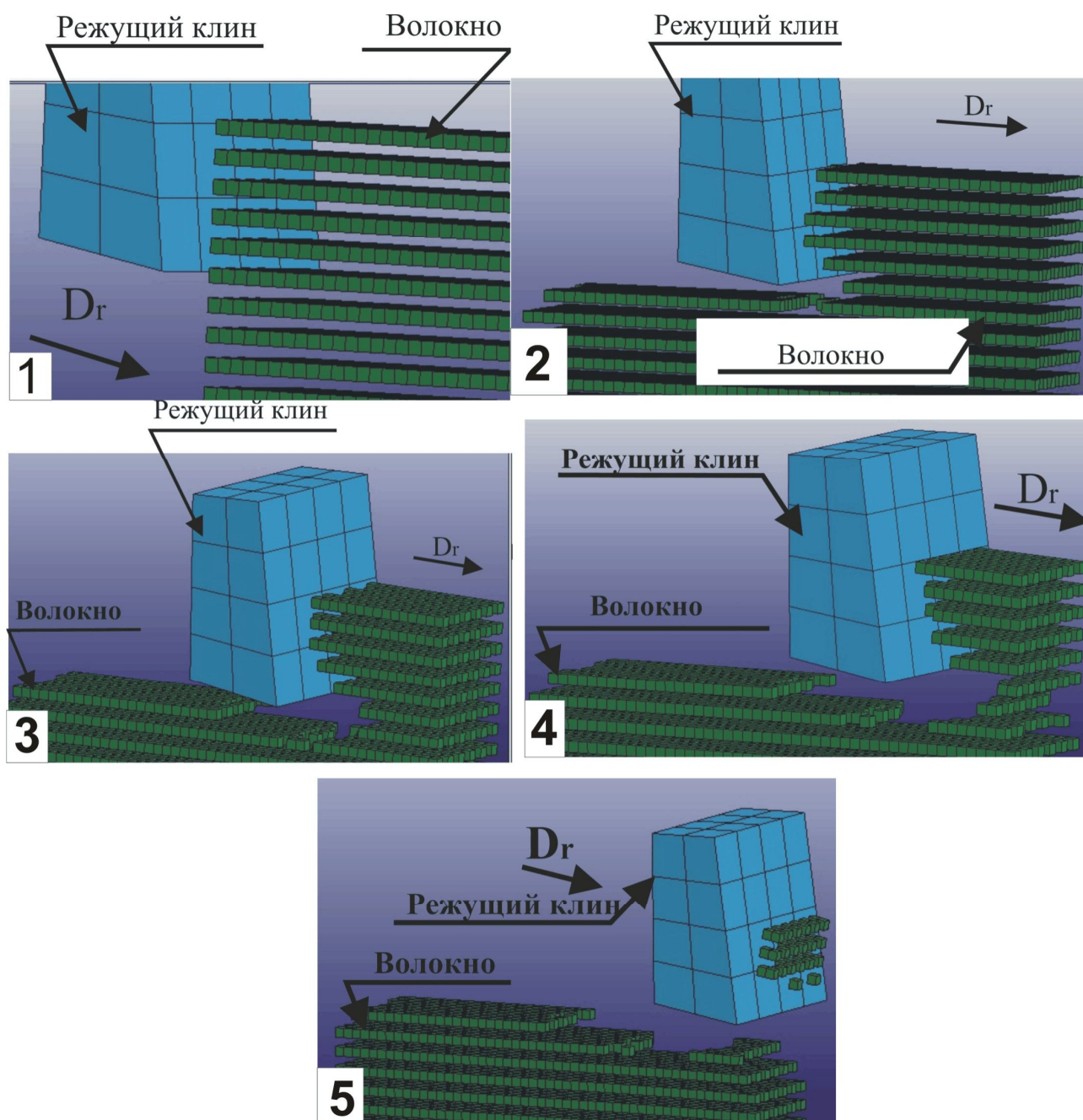
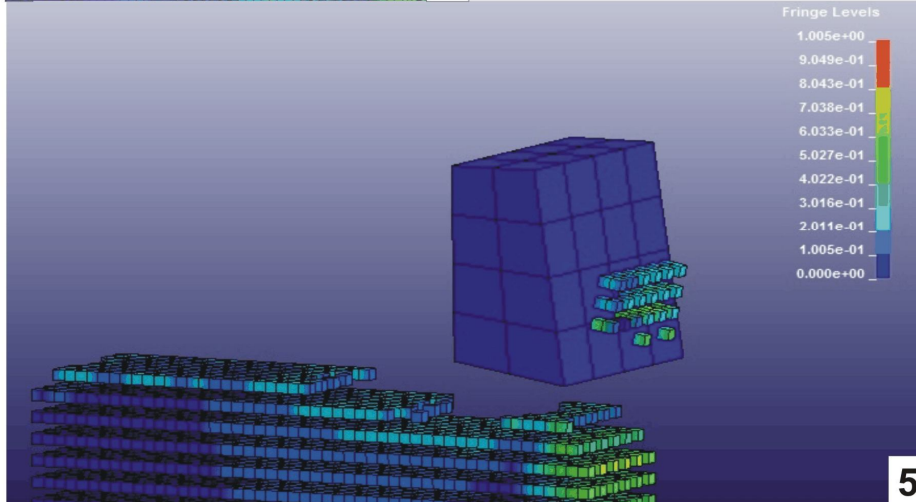
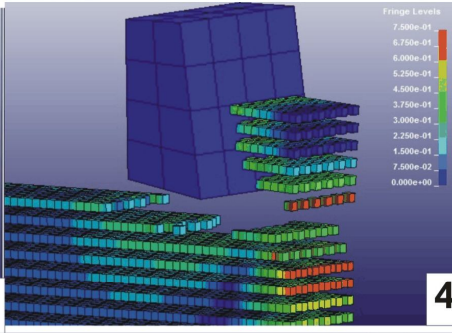
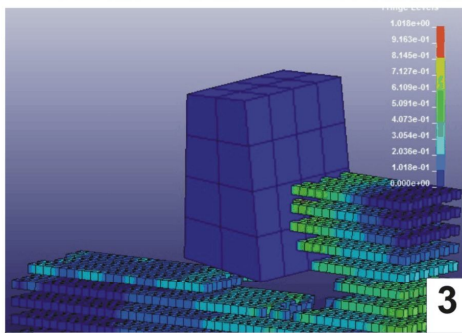
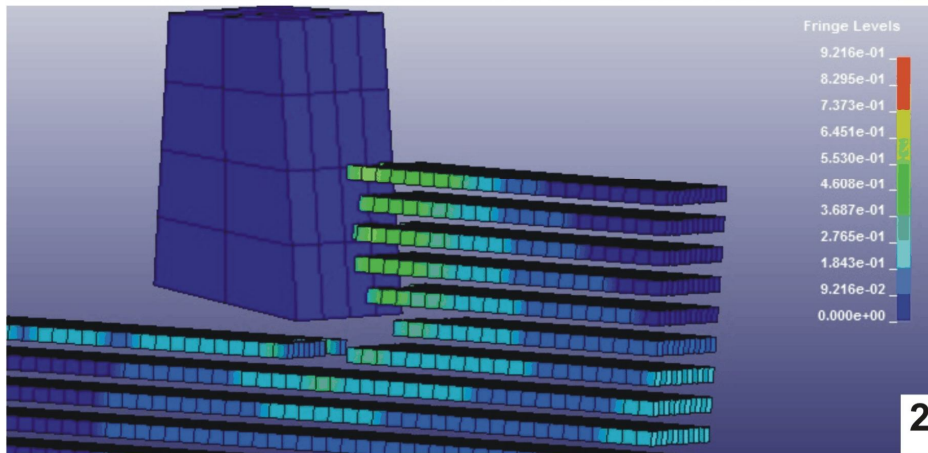
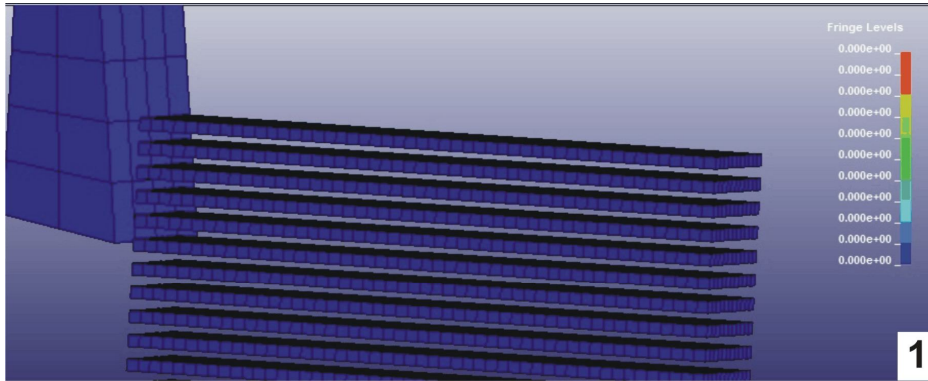


Иллюстрация полей напряжения при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 0°



## Этапы обработки ВПКМ с углом направленности волокон 45°

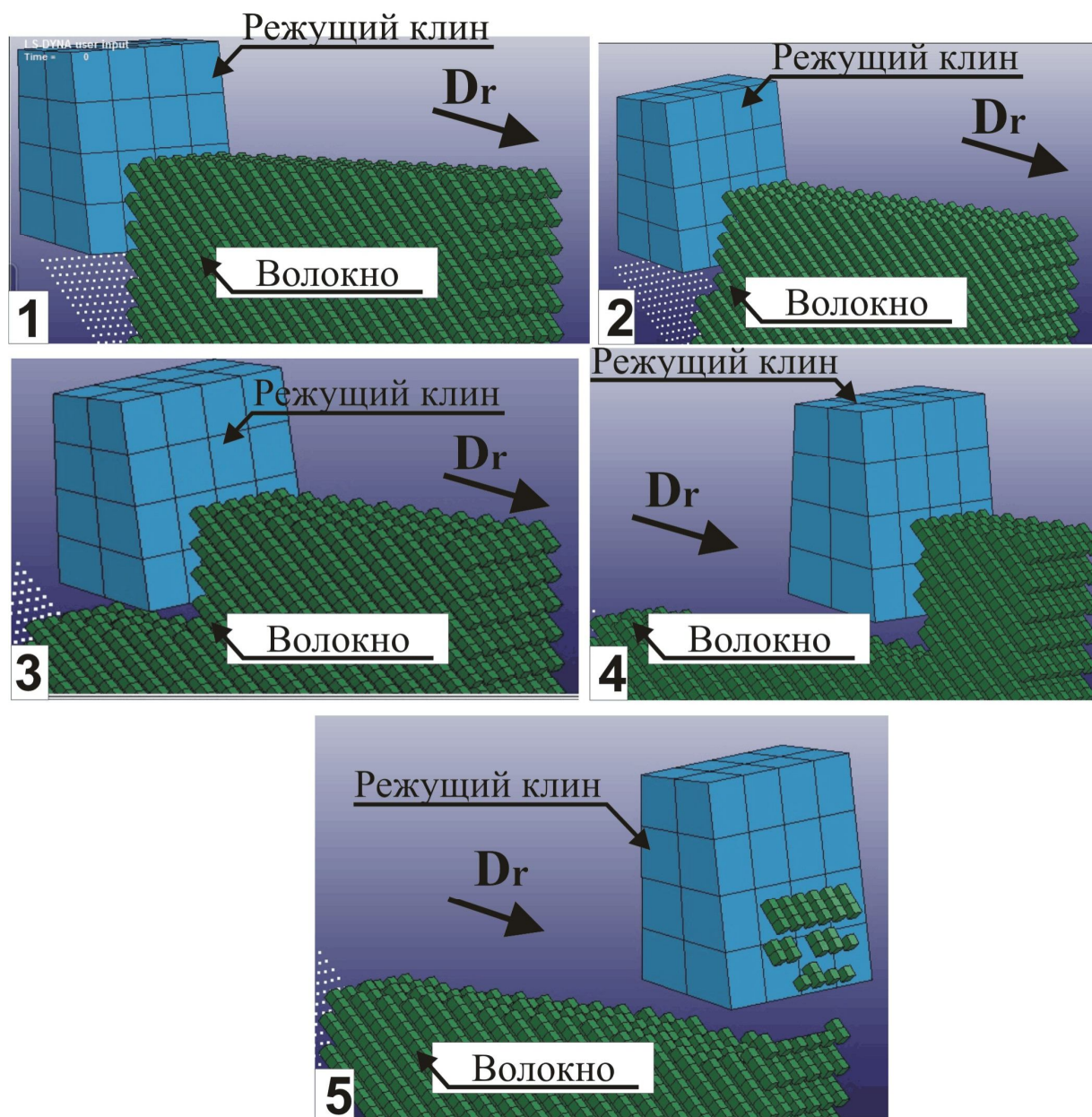
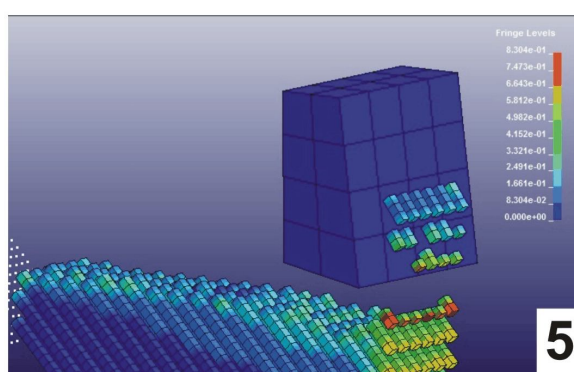
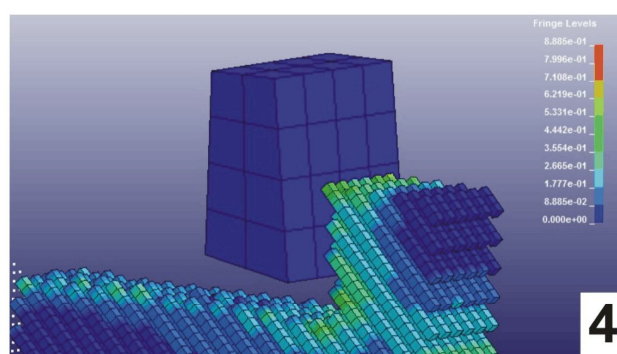
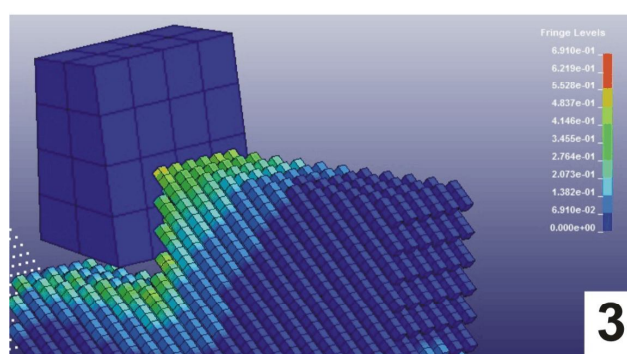
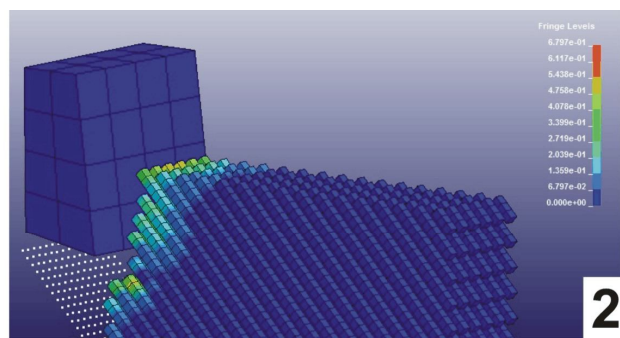
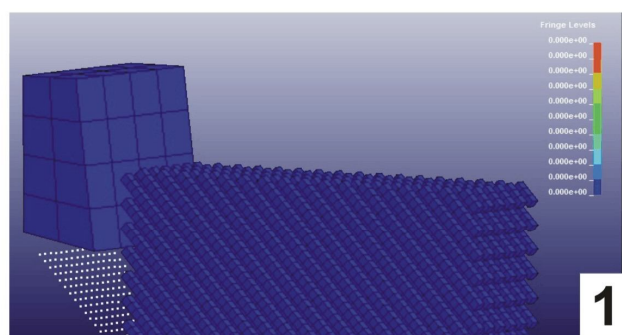


Иллюстрация полей напряжения при обработке ВПКМ с углом направленности волокон  $45^\circ$



Этапы обработки ВПКМ с углом направленности волокон  $90^\circ$

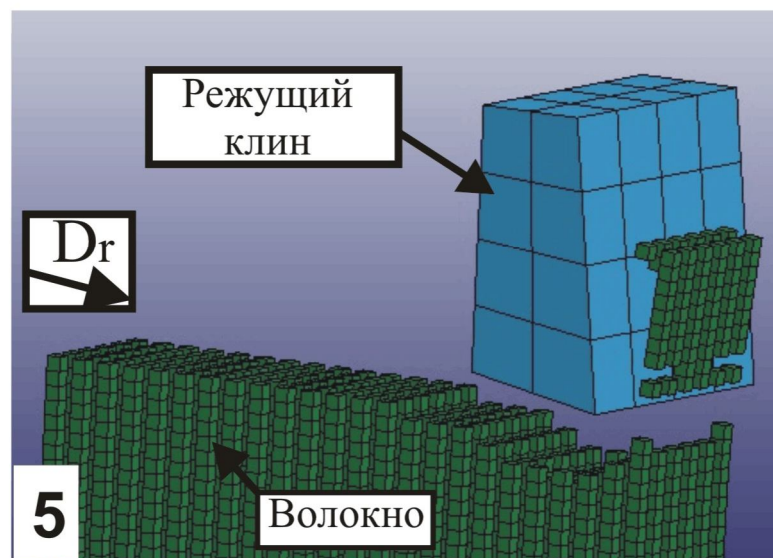
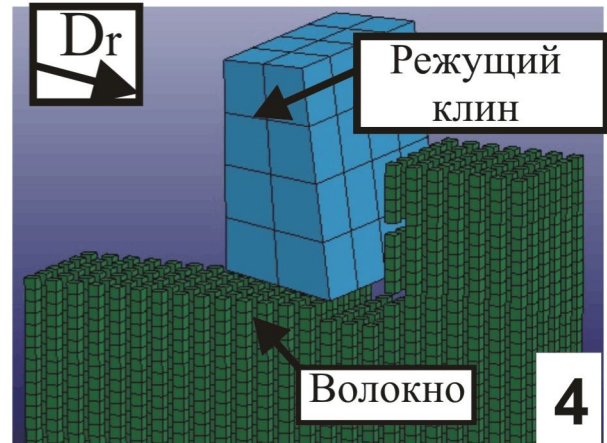
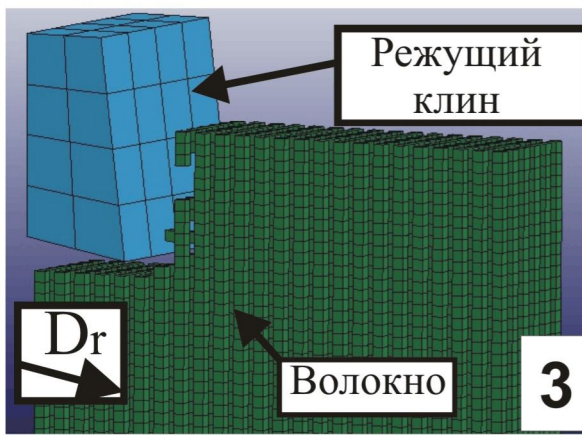
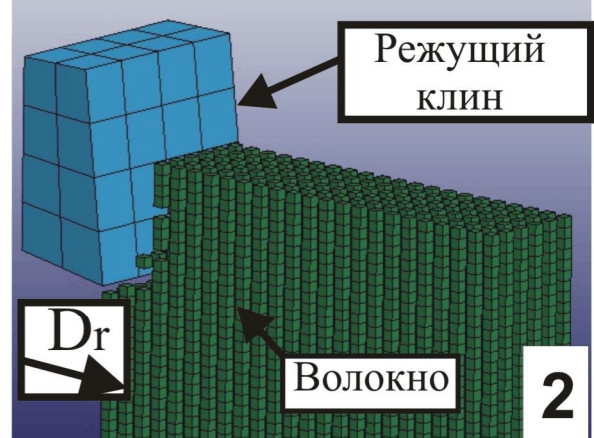
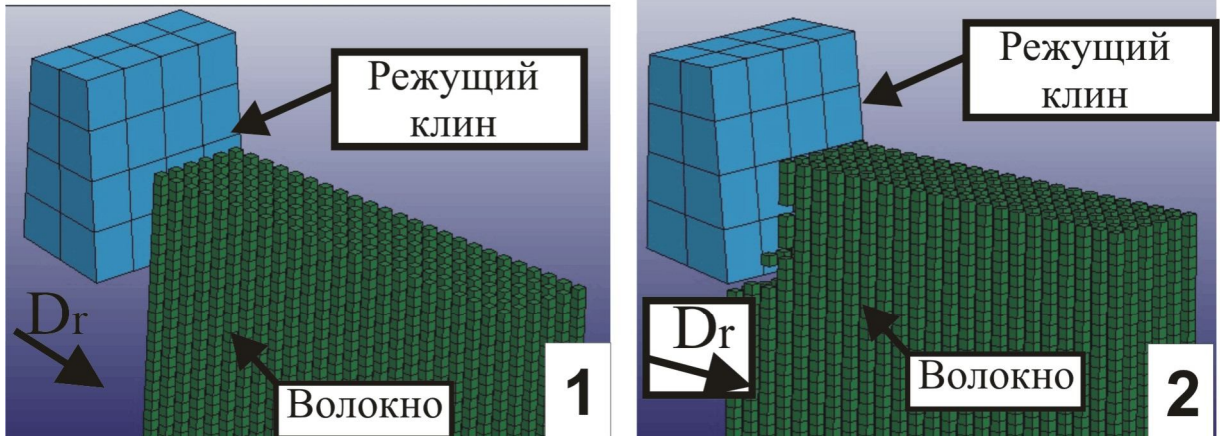
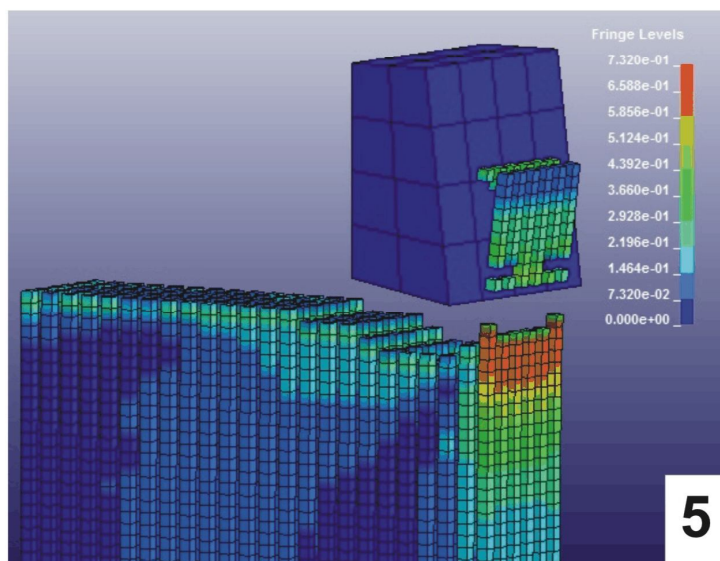
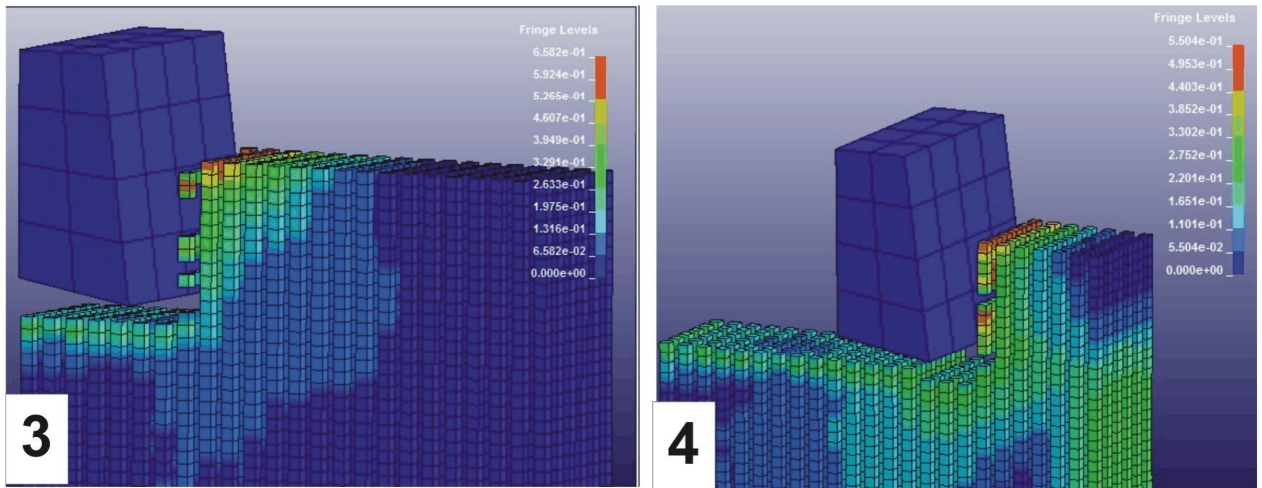
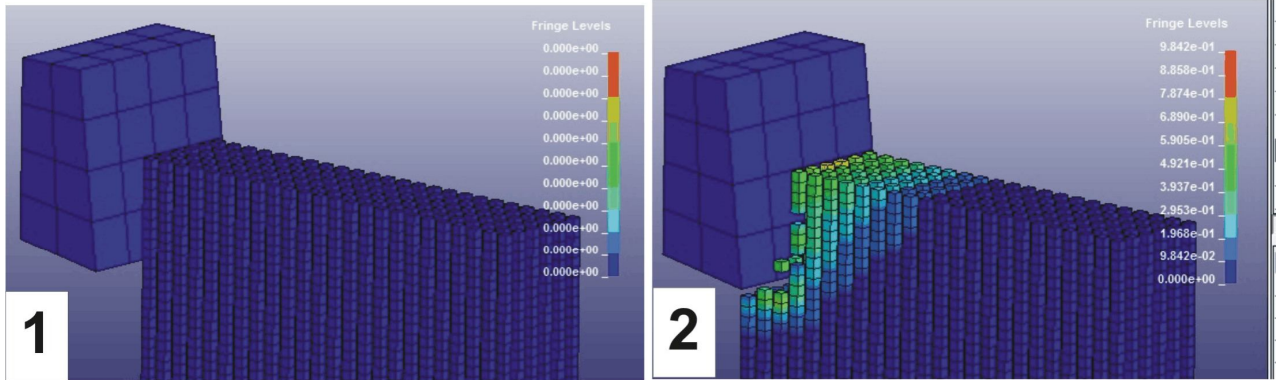


Иллюстрация полей напряжения при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 90°



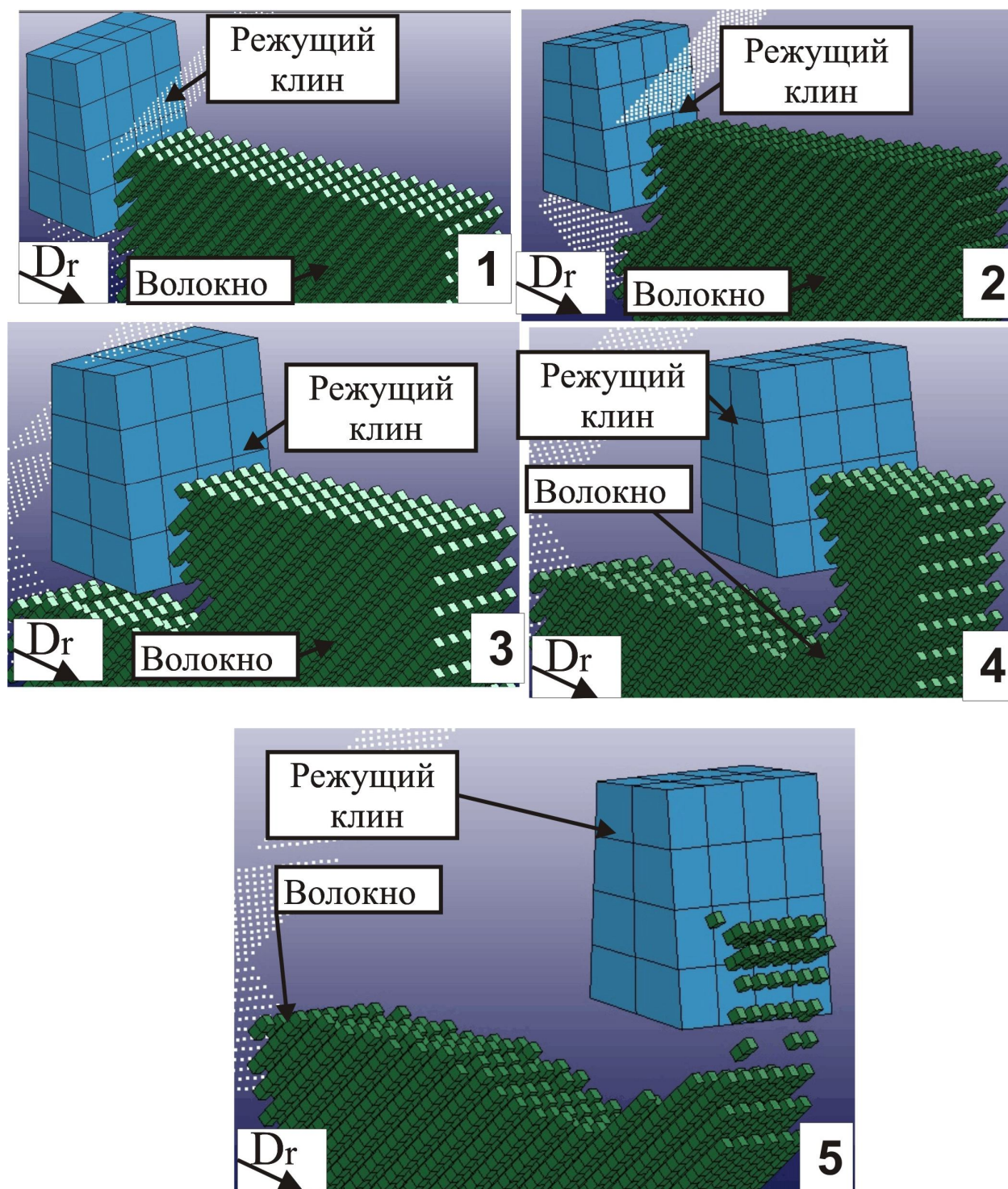
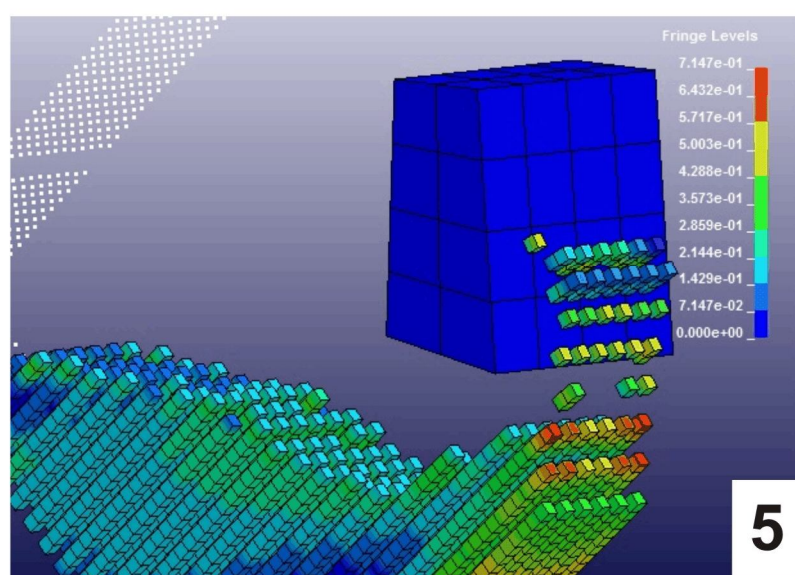
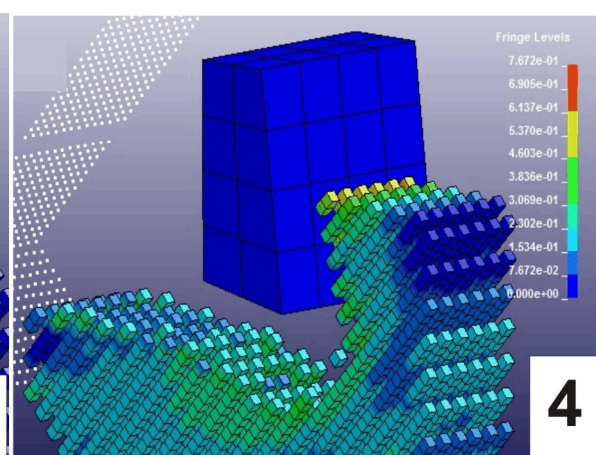
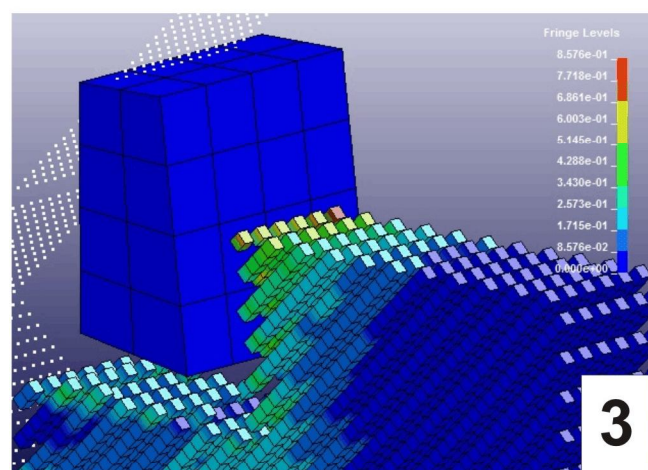
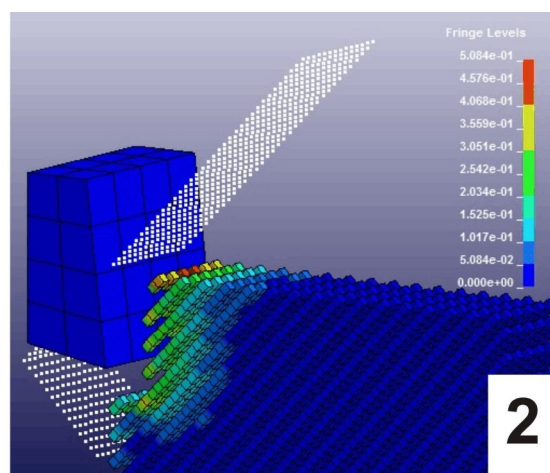
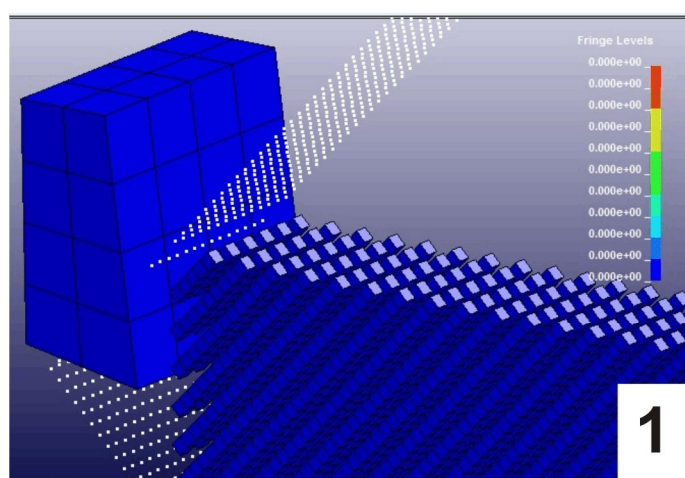
Этапы обработки ВПКМ с углом направленности волокон  $135^\circ$ 

Иллюстрация полей напряженности при обработке ВПКМ с углом направленности волокон  $135^\circ$





**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**(АКТ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОРАБОТКИ)**