

УДК 621.9.025.7.012:001.891.54

КП

№ 0112U001377

Инв. №

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА
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. наук, профессор

_____ Чёрноус А.Н.

ОТЧЕТ
ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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

Начальник НИЧ
канд. физ. - мат. Наук

(подпись)

Д.И. Курбатов

(дата)

Руководитель НИР
д.т.н., профессор

(подпись)

В.А. Залого

(дата)

Сумы 2012

Рукопись закончена 25 декабря 2012 г.

Результаты работы рассмотрены научным советом СумГУ,
протокол №4 от 27 декабря 2012 г.

СПИСОК АВТОРОВ

Руководитель НИР,
гл. науч. сотруд.,
доктор техн. наук

(подпись)

(дата)

В.А.Залого
(реферат, введение,
выводы)

Ответственный исполнитель
ст. науч. сотруд.,
доктор техн. наук,

(подпись)

(дата)

Д.В.Криворучко
(разд. 1)

Инженер 3 кат.

(подпись)

(дата)

Л.В.Голобородько
(приложение А)

Младший научный сотрудник

(подпись)

(дата)

О.А.Залого
(приложение Б)

Инженер 3 кат.

(подпись)

(дата)

В.А.Колесник
(разд. 2, разд. 3)

Ведущий инженер

(подпись)

(дата)

А.А.Нешта
(разд. 4)

РЕФЕРАТ

Отчет: 136 с., 66 рис., 7 табл., 2 приложения, 97 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 слоистых армированных композиционных материалах (САКМ) и смешанных пакетах «САКМ-металл».

Методы исследования - математическое моделирование рабочих процессов с использованием натуральных экспериментальных исследований.

В отчете на основе данных иностранной литературы рассмотрены различные аспекты технологии механической обработки отверстий в пакетах деталей, изготовленных из титановых сплавов и волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) (на основе углеволокна). Затронуты вопросы влияния различных факторов на износ инструмента при сверлении. Проведены поисковые исследования по определению механизмов разрушения при различных схемах обработки ВПКМ. Выполнено имитационное моделирование процесса сверления ВПКМ в главной секущей плоскости главных режущих кромок и определены наиболее неблагоприятные схемы резания как с точки зрения силовых характеристик процесса обработки, так и качества обработанной поверхности.

Путем сопоставлению полученных данных с данными экспериментальных исследований доказана работоспособность модели. Приведены рекомендации по совершенствованию существующей конечно-элементной модели.

СМЕШАННЫЙ ПАКЕТ, УГЛЕПЛАСТИК, ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ, АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ, СВЕРЛЕНИЕ, КАЧЕСТВО, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Отчёт выполнялся по договору № 51.20.01-01.12.13 ЗП

В нём 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 описан алгоритм проведения экспериментальных исследований, выполнен анализ результатов, изложено описание эксперимента, описаны методика подготовки образцов для исследования, оборудование и инструменты, использованные в ходе выполнения эксперимента, приведены результаты исследования.

В разделе 3 изложены теоретические предпосылки проведения имитационного моделирования, обоснована схема моделирования, определена система разрешающих уравнений, описано создание САД и конечно – элементной модели, изложена методика определения механических свойств углеродного волокна и эпоксидной смолы, обоснован выбор граничных условий и параметров решателя конечно – элементной модели, приведены результаты имитационного моделирования.

В разделе 4 выполнен анализ влияния различных факторов на процесс резания, описано влияние направленности волокон на качество обрабатываемой поверхности, выполнен анализ сил резания, разработаны рекомендации по совершенствованию существующей модели.

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ	4
1 КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ И МЕХАНИЗМОВ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ВОЛОКНИ- СТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ	8
1.1 Общие представления об износе инструментов	8
1.1.1 Виды износа	8
1.1.2 Механизмы изнашивания	9
1.1.3 Критерии износа и стойкость инструмента	12
1.2 Общие представления об износе инструментов при обработ- ке однородных пакетов волокнистых полимерных композиционных материалов / метал	14
1.2.1 Износ и стойкость сверл	14
1.2.2 Влияние различных факторов на расслаивание	19
1.2.3 Влияние режима резания	19
1.2.4 Влияние износа сверла	21
1.2.5 Влияние геометрии и конструкции инструмента	23
1.2.6 Влияние материала матрицы и формы армирования	26
1.3 Выводы	27
2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ВОЛОК- НИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ОБРАБОТКИ	29
2.1 Описание эксперимента	29
2.1.1 Цели и задачи эксперимента	29
2.1.2 Технология изготовления образцов	30
2.1.3 Методика подготовки образцов	33
2.1.4 Оборудование, инструменты и приборы	34
2.1.5 Режущий инструмент	35

2.1.6 План эксперимента.....	37
2.2 Порядок проведения эксперимента.....	39
2.3 Результаты эксперимента и их анализ	42
2.4 Выводы.....	44
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕ- РИАЛОВ	46
3.1 Мировой опыт в сфере моделирования процессов обработки волоконистых полимерных композиционных материалов.....	46
3.2 Обоснование схемы моделирования	50
3.3 Расчетная схема.....	52
3.4 Разрешающая система уравнений	53
3.5 Создание CAD – модели	60
3.6 Создание конечно – элементной сетки. Выбор типа конечно- го элемента	61
3.7 Определение механических свойств углеродного волокна и эпоксидной смолы.....	70
3.8 Начальные и граничные условия.....	78
3.9 Параметры решателя в LS-DYNA	85
3.10 План виртуального эксперимента	86
3.11 Результаты виртуального эксперимента	87
3.12 Выводы.....	87
4 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРО- ЦЕСС РЕЗАНИЯ	89
4.1 Влияние направленности волокон на показатели качества обработанной поверхности.....	92
4.2 Силы резания при обработке волоконистых полимерных ком- позиционных материалов	100
4.3 Анализ ошибок конечно – элементной модели и разработка рекомендаций по ее совершенствованию	102

4.3.1 Рекомендации по совершенствованию конечно – элементной модели прямоугольного резания композиционного материал	102
4.4 Выводы.....	104
ВЫВОДЫ.....	105
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А (Справочное).....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Справочное)	129

1 КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ И МЕХАНИЗМОВ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

1.1 Общие представления об износе инструментов

1.1.1 Виды износа

Непрерывное резание волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ), как правило, сопровождается изнашиванием по задней поверхности и увеличением радиуса округления режущей кромки в результате постепенного истирания контактных поверхностей лезвия (см. рис. 1.1). Большая часть изменений происходит на задней поверхности с формированием искривленной поверхности износа. В случаях, когда и главные и вспомогательные режущие кромки участвуют в процессе резания, максимальный износ по задней поверхности наблюдается в вершине лезвия.

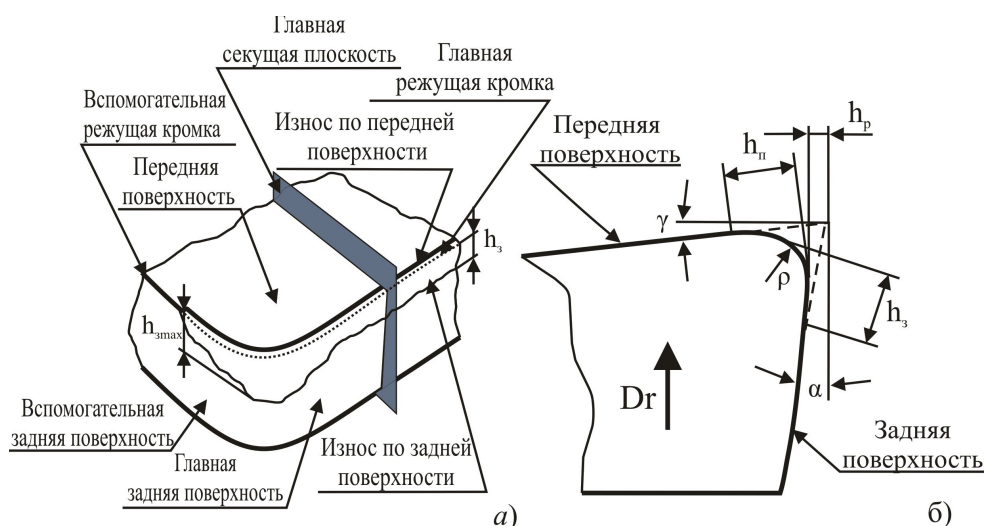


Рисунок 1.1 – Виды износа инструмента при обработке ВПКМ (а) и сечение режущего клина главной секущей плоскостью (б) [1]

В качестве характеристики изменений режущей кромки в процессе изнашивания инструментов при резании ВПКМ рассматривают ширину фаски износа на передней поверхности, радиальный износ, ширину фаски износа на задней по-

верхности, радиус округления режущей кромки (см. рис. 1.1) [2, 3, 1]. Однако из-за сильного искривления поверхности износа измерение этих характеристик с помощью оптического микроскопа затруднено и должно проводиться с особым вниманием. Часто измеряется и используется для описания износа лезвия только один параметр – ширина фаски износа на задней поверхности h_3 . Однако один этот параметр не дает информацию о профиле изношенной режущей кромки. Радиус округления режущей кромки ρ является более информативной характеристикой износа, но он более сложен в измерении. В стационарных условиях величина радиуса округления режущей кромки имеет тенденцию стабилизироваться после окончания периода приработки и может не изменяться при дальнейшей работе инструмента.

Измерение характеристик износа инструмента также проблематично в случаях сложных конфигураций инструмента, например, абразивных инструментов и инструментов для снятия заусенцев. У этих инструментов в резании участвуют множество режущих кромок и износ их часто неоднороден [1]. В таких случаях лучше косвенно измерять износ инструмента путем контроля силы резания, мощности резания, акустической эмиссии или других показателей процесса резания.

1.1.2 Механизмы изнашивания

Из всех известных механизмов изнашивания [4] отказ инструментов при резании ВПКМ вызывают, как правило, скол и выкрашивания режущей кромки, абразивное и химическое изнашивание [1]. 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 относительно низка и не способствует высокой скорости

химических реакций, то интенсивность изнашивания при резании ВПКМ определяется главным образом 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 [5, 6]. 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 обработанной поверхности [7, 8].

Следует отметить, что абразивное изнашивание по задней поверхности неоднородно вдоль режущей кромки не только по причине ее различной загруженности, но и из-за различных свойств ВПКМ в каждом малом участке ее длины. Фаска износа отражает такое изменение свойств обрабатываемой заготовки, абразивных свойств отдельных волокон и полимерных фаз в различных слоях. Действительно, описанные ранее механизмы стружкообразования определяют более интенсивное трение волокон на задней поверхности инструмента при угле направленности волокон $\theta = +45^\circ$ и оказывает меньшее влияние при угле направленности волокон θ равном 0° и 90° . Это влияние усиливается с увеличением радиуса округления режущей кромки ρ . В этом случае объем деформируемого лезвием материала увеличивается, тем самым увеличивая трение и износ на задней поверхности. Этот эффект был выявлен в работах Piescu D. [8] при исследованиях прямоугольного резания многослойного углепластика.

Зависимость интенсивности износа от направленности волокон показана на рис. 1.2 Girot F [9] также показал эту особенность при фрезеровании углепластика и стеклопластика с помощью алмазных абразивных инструментов.

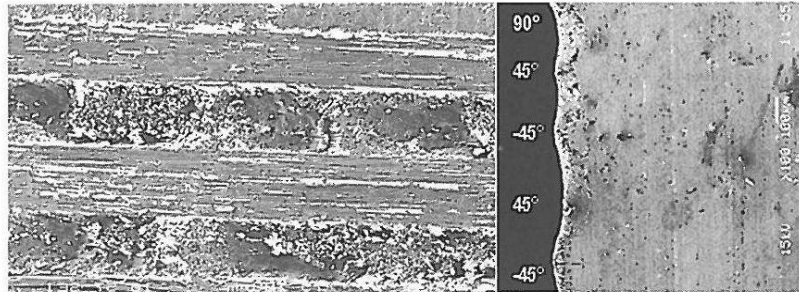


Рисунок 1.2 – Влияние направленности волокон на абразивный износ инструмента при точении углепластика твердосплавным K20 инструментом: длина пути резания 100м, $\gamma = 0^\circ$, $V = 60\text{м/мин}$, $S = 0.1\text{ мм/об}$ [889]

Химическое изнашивание инструментов при резании ВПКМ связано с химическими реакциями инструментального материала 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.д.) 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 [10]:

а) **период приработки.** В этот период наблюдается высокая интенсивность изнашивания. Причиной изменения формы лезвия в этом периоде является или выкрашивание или скол. В начале своей работы новые режущие кромки, имея малый радиус округления ρ , воспринимают силы резания по относительно малой площади контакта со стружкой. Вследствие чего возникают чрезвычайно высокие контактные давления, что в свою очередь приводит к высокой интенсивности изнашивания;

б) **период установившегося износа.** После приработки и увеличения радиуса округления режущей кромки, область контакта между инструментом и обрабатываемой заготовкой увеличивается, что приводит к снижению контактных давлений. В результате интенсивность изнашивания снижается и в течение этого периода практически не изменяется со временем;

в) **период катастрофического износа.** Когда износ по задней поверхности достигает второй критической величины, силы резания и температура начинают быстро увеличиваться. Комбинированное влияние теплового разупрочнения материалов заготовки и инструмента и увеличение контактного давления снова вызывают увеличение интенсивности изнашивания.

1.1.3 Критерии износа и стойкость инструмента

Не существует никаких конкретных рекомендаций по критериям износа при обработке ВПКМ [1]. На практике часто 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 $h_3\geq 0,3$ мм.

Критерием износа может служить радиус округления режущей кромки ρ [2]. Reimann W. [11] исследовал влияние различных величин радиуса округления режущих кромок ρ на расслоение и качество обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании углепластика и определил, что резание инструментом с $\rho\geq 50$ мкм приводит к очень плохому качеству обработанной поверхности при том, что сила резания практически не зависит от ρ при $\rho\geq 60$ мкм. Fazar A. и др. [2] наблюдали аналогичное поведение крутящего момента при сверлении углепластика различными инструментами (см. рис. 1.3). Вместе с тем, величина осевой силы в их опытах не была постоянной, что связано с увеличением силы трения между инструментом и боковой поверхностью отверстия.

На практике для оценки работоспособности используют стойкость и ресурс инструментов. Ресурс, выраженный, например, количеством обработанных отверстий данным сверлом, является экономически информативной характеристикой инструмента, однако ограничен конкретной операцией. Более универсальной характеристикой, позволяющей сравнивать различные инструменты и условия, является стойкость. Некоторые эмпирические зависимости стойкости инструментов от скорости резания можно найти, например, в работе [1]. Стойкость инструмента зависит от геометрических параметров режущего инструмента (передний γ и задний α углы) и режима резания (скорости резания V , подачи S и глубина резания t). Влияние параметров геометрии инструмента на его стойкость исходит от их влияния на интенсивность изнашивания, силу резания и прочность режущей кромки. Следует учитывать то обстоятельство что, чем больше передний и задний угол, тем меньше сила резания, и, следовательно, меньше интенсивность изнашивания. Но это же делает режущую кромку менее прочной и, следовательно, увеличивает интенсивность изнашивания. Поэтому существуют оптимальные величины γ и α , которые могут быть найдены для каждого конкретного случая экспериментальными и расчетными методами.

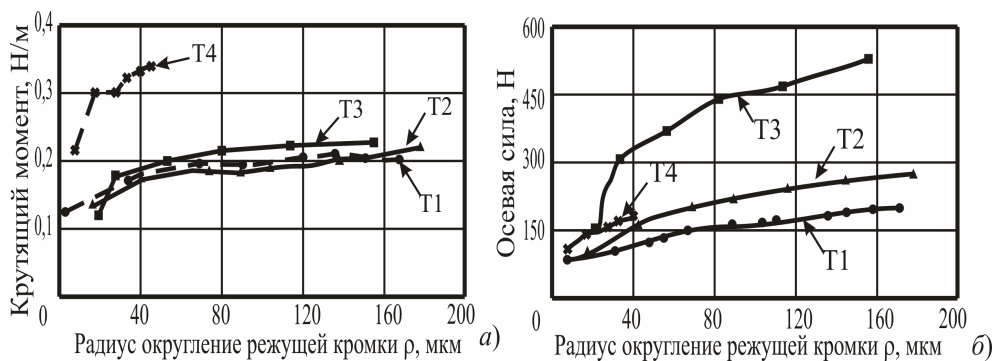


Рисунок 1.3 – Влияние радиуса округления режущей кромки на крутящий момент (а) и осевую силу (б) при сверлении углепластика [2] твердосплавными сверлами диаметром 4 мм: Т1- спиральное сверло с двухплоскостной заточкой задней поверхности; Т2 – трехперое спиральное сверло с двухплоскостной заточкой задней поверхности; Т3 - трехперое спиральное сверло со спиральной заточкой задней поверхности; Т4- комбинированное сверло

1.2 Общие представления об износе инструментов при обработке однородных пакетов волокнистых полимерных композиционных материалов / металл

1.2.1 Износ и стойкость сверл

Независимо от применяемого инструментального материала абразивное изнашивание является преобладающим механизмом изнашивания сверл при обработке ВПКМ (рис. 1.4 *д, е, ж*). 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 [10]. Эти особенности приводят к тому, что в некоторых случаях наблюдается выкрашивание режущих кромок (рис. 1.4 *а, б, в, г*) и даже адгезионно-усталостное изнашивание (рис. 1.4 *з*) твердосплавных инструментов [10, 12].

По данным Malhotra S. K. [13], Rawat S. и др. [10] при сверлении углепластиков сверлами из быстрорежущей стали и твердых сплавов износу подвергается поперечная режущая кромка, задняя поверхность главных режущих кромок, вершина и вспомогательные режущие кромки сверла (рис. 1.4).

Из-за преобладающего абразивного изнашивания при сверлении углепластика износ инструмента практически не зависит от скорости резания, но зависит от суммарной длины срезанных волокон [14]. В случаях, когда активизируются другие механизмы изнашивания, как показано в работах Inoue H. и др. [15], Kim D. и Ramulu M. [16], Lin S. C. и Chen I. K. [17], интенсивность изнашивания по задней поверхности возрастает с увеличением скорости резания из-за повышения температуры резания.

Сильное влияние на процесс изнашивания оказывает подача. При 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 инстру-

мент приводят к интенсификации абразивного изнашивания, разрушению и выкрашиванию режущих кромок [10].

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 (см. табл. 1.1).

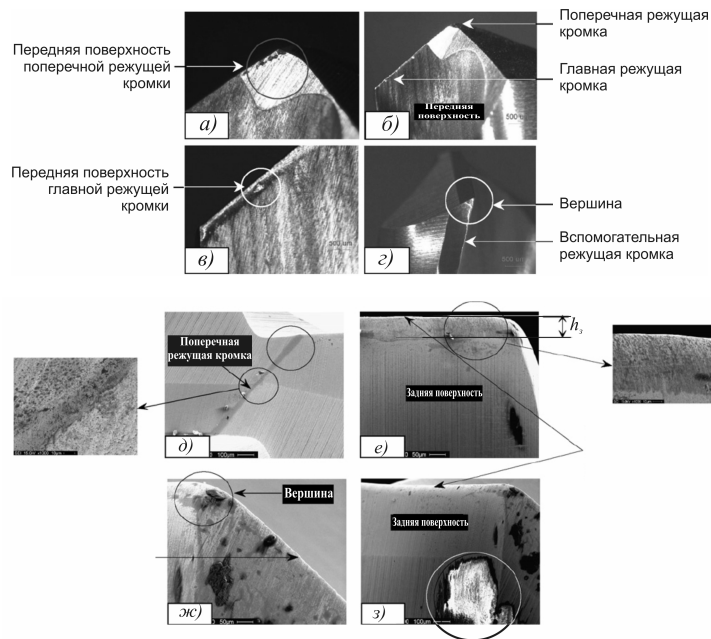


Рисунок 1.4 – Места выкрашивания твердосплавных сверл диаметром 5 мм после сверления углепластика ($n=15000$ об/мин, $s=0,1$ мм/об) [10]: а) на передней поверхности вдоль поперечной режущей кромки после сверления 10 отверстий; б) выкрашивание на передней поверхности после сверления 100 отверстий; в) выкрашивание на передней поверхности (увеличенное изображение (б)); г) выкрашивание в вершине и на вспомогательной режущей кромке после сверления 50 отверстий; д) износ поперечной режущей кромки в результате абразивного изнашивания, е) износ по задней поверхности главной режущей кромки в результате абразивного изнашивания, ж) округление вершины сверла, з) адгезия углерода на задней поверхности и в вершине сверла, которая проявлена химическим методом.

Так, например, при сверлении слоя ВПКМ может превалировать абразивное изнашивание, при сверлении алюминиевого слоя – адгезионно-усталостное изнашивание, при сверлении слоя титанового сплава – химическое изнашивание.

Такое сочетание механизмов изнашивания является наиболее опасным для лезвия, поскольку не позволяет ему приспособиться под сложившиеся условия.

Таблица 1.1 - Возможные механизмы изнашивания при сверлении смешанных пакетов [18]

Изнашивание	
Механическое	Термохимическое
<ul style="list-style-type: none"> • Абразивное - Скольжение твердой фазы по поверхности контакта инструмента со стружкой и заготовкой 	<ul style="list-style-type: none"> • Изнашивание растворением - Термически активируемые механизмы – перенос атомов через поверхность раздела сред
<ul style="list-style-type: none"> • Изнашивание расслаиванием - Последовательная нагрузка приводит к распространению трещин и отслоению алмазного покрытия 	<ul style="list-style-type: none"> • Диффузионное изнашивание - Составляющие инструментальных материалов могут диффундировать в стружку
<ul style="list-style-type: none"> • Адгезионно-усталостное (характерно для алюминия) - Вырыв частиц инструментального материала с поверхности инструмента под действием адгезионных связей 	<ul style="list-style-type: none"> • Химическое изнашивание (характерно для титановых сплавов) - Химическая реакция между материалом инструмента и заготовкой
<ul style="list-style-type: none"> • Термомеханическая усталость 	

Критерии износа являются важными параметрами процесса сверления ВПКМ. По данным Klocke F. и Wurtz C. [19] традиционный для сверления металлов критерий износа, определяемый по величине фаски износа по задней поверхности $h_3=0.3\text{мм}$, не может быть использован при сверлении ВПКМ из-за ухудше-

ния качества поверхности уже при $h_3=0.2$ мм. По их мнению [2], уменьшение остроты или увеличение ρ режущих кромок сверл может быть основным критерием износа, ограничивающий износ сверл критерием качества обработанной поверхности.

Износ сверл является основным фактором, изменяющим качество отверстия в процессе обработки. Такие факторы, как время сверления, скорость резания и подача могут влиять на качество отверстия, но в меньшей степени. Поэтому уменьшение интенсивности изнашивания сверл необходимо для сохранения приемлемого качества отверстий в процессе обработке. Снижение интенсивности изнашивания может быть достигнуто за счет выбора рациональных инструментальных материалов, геометрии инструмента и режимов сверления, которые способствуют уменьшению времени контакта сверла с заготовкой, а следовательно и температуры резания. Вместе с тем сложное влияние этих факторов на показатели процесса сверления не всегда позволяет добиться желаемого результата. При прочих равных условиях:

- Увеличение подачи уменьшает время контакта инструмента с заготовкой, но и увеличивает осевую силу. Следовательно, увеличивается вероятность расслаивания и повышается интенсивность изнашивания инструмента.
- Уменьшение подачи уменьшает осевую силу, но увеличивает время контакта инструмента с заготовкой и, следовательно, температуру резания и интенсивность изнашивания.
- Увеличение скорости резания уменьшает осевую силу и, поэтому, вероятность расслаивания, но увеличивает температуру резания и вибрации, и, следовательно, повышает интенсивность изнашивания инструмента.
- Уменьшение скорости резания увеличивает осевую силу.

При сверлении углепластиков износ сверл значительно больше зависит от скорости резания, чем при сверлении сталей и чугунов, поскольку модуль показателя степени в формуле допускаемой скорости резания для этих материалов находится в пределах 0,13 - 0,4, в то время как при сверлении углепластиков его

величина приближается 0,6. Действительно, по данным [10] скорость резания V (м/мин), допускаемая стойкостью инструмента T (мин) для твердосплавных сверл диаметром 5 мм при сверлении углепластика может быть вычислена по формуле:

$$V = 3,08 \cdot T^{0,56} \quad (1.1)$$

Осевая сила и крутящий момент являются функциями подачи, геометрии сверла, толщины обрабатываемой заготовки и величины износа инструмента (например, выраженного количеством обработанных отверстий) [2, 10, 20, 21, 22]. Осевая сила увеличивается с развитием износа. Влияние износа на крутящий момент менее заметно. Ранее было показано, что влияние износа инструмента на осевую силу изменяется на различных этапах сверления. Интересно, что чем тоньше обрабатываемая заготовка, тем больше увеличивается осевая сила, возникающая из-за износа сверла. Чем больше подача, тем существеннее влияние износа инструмента на осевую силу.

Чувствительность к износу и возможность контроля без остановки процесса сверления делает описанные силовые характеристики процесса сверления удобными для практического определения износа сверл. Это особенно важно при большой толщине обрабатываемой заготовки [23]. Например, в работе [24] при сверлении смешанного пакета ВПКМ/Ti сверлом Sandvik Coromant PT 86 Ø6,35мм с использованием машины Quackenbush 15QDA критический износ оценивался величиной осевой силы, которая составила 335 Н, что соответствовало ресурсу сверла в 100 отверстий. Износ сверла показан на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 - Режущая кромка сверла Sandvik Coromant PT 86 нового (а) и изношенного после сверления 100 отверстий в смешанном пакете ВПКМ/Ti (б) [24]: $n =$

550 об/мин, $S = 0,055$ мм/об; $d = 6,35$ мм

1.2.2 Влияние различных факторов на расслаивание

Степень влияния различных факторов на расслаивание, при сверлении отверстий, может быть представлена в порядке убывания величины воздействия в следующем порядке (см. рис. 1.6): подача, износ инструмента, геометрия и конструкция инструмента, материал матрицы и схема армирования ВПКМ, скорость резания [25]. Уменьшение вероятности расслаивания может быть достигнуто путем применения некоторых технологических приемов, таких как: применение опорной пластины, выполнение направляющего отверстия, адаптивное управление подачей, предварительный подогрев сверла и др..

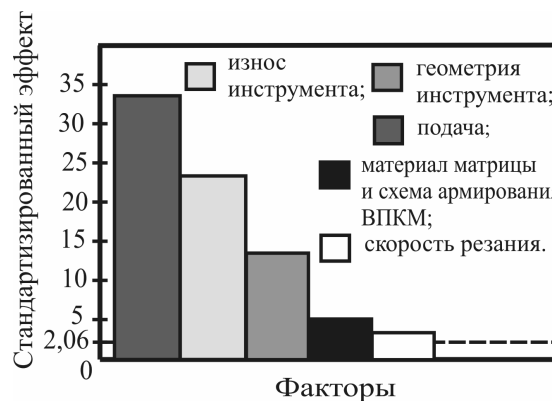


Рисунок 1.6 – Степень влияния различных факторов на величину расслаивания при сверлении углепластиков [25]: уровень значимости $\alpha=0,05$

1.2.3 Влияние режима резания

В экспериментальных работах Chen [26], Tsao и Hocheng [27,28,29], Carprino и Tagliaferi [30] и других [6, 31, 25, 32] было установлено, что подача, при прочих равных условиях, является элементом режима резания, который при сверлении наиболее существенно влияет на расслаивание ВПКМ (см. рис. 1.7).

При малой подаче внутренняя поверхность отверстия гладкая и обычно с малым расслаиванием. 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.

Это явление имеет место из-за сил, действующих в вершинах режущих кромок сверла, т.е. на уголках сопряженных лезвий, где имеет место наибольшая величина износа сверла. При большой подаче отверстие, как правило, значительно повреждается, т.е. расслаивание в этом случае распространяется на большее количество слоев, что сопровождается возникновением межслоевых трещин и интенсивным разделением слоев [33] [30].

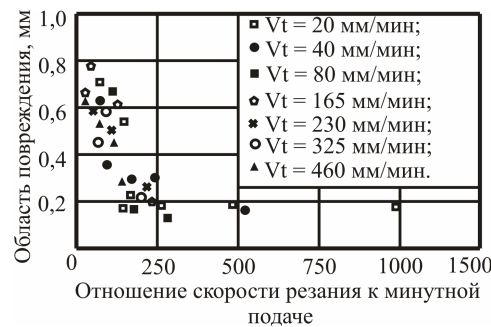


Рисунок 1.7 – Влияние отношения скорости резания

к минутной подаче на ширину области повреждения, $\Delta D = D_{\max} - D$ [30]

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 не срезание волокнистого наполнителя, в результате чего увеличивается и эллипсность отверстий [34].

При сверлении углепластиков с помощью быстрорежущих и твердосплавных сверл обычно применяются скорости резания от 20 до 150 м/мин, тогда как

величины подачи обычно меньше, чем 0,3 мм/об [35, 36]. На практике скорость резания ограничивают два фактора: максимально возможная частота вращения сверла и температура резания, определяющая термическую деструкцию. А поскольку при сборке летательных аппаратов редко используются сверла диаметром больше 10 мм, то и скорость резания на практике, как правило, не превышает 150 м/мин. Использование подач более 0,3 мм/об гарантированно будет сопровождаться расслаиванием ВПКМ. Меньшая подача с одной стороны улучшает качество отверстий, но с другой - снижает ресурс инструмента и производительность обработки.

1.2.4 Влияние износа сверла

Как уже было показано, износ сверл приводит к расслаиванию ВПКМ, и в первую очередь слоев пакета на выходе инструмента. Коэффициент расслаивания увеличивается с увеличением износа по задней поверхности сверла в результате увеличения осевой силы [45 в [31]]. Для спиральных сверл, прежде всего, характерно увеличение износа поперечной режущей кромки (см. рис. 1.8 и табл. 1.2). Такое изменение геометрии сверла приводит к некоторому увеличению критической осевой силы P_x . Однако увеличение фактической осевой силы P_x приводит, при прочих равных условиях, к увеличению расслоения [37].

Влияние износа сверла на коэффициент расслоения становится существенным при высоких скоростях резания. Повреждение поверхности прямо связано с износом сверла. Новые сверла производят блестящие чистые поверхности, в то время как изношенные сверла поверхность оплавливают.

Эта проблема может быть частично решена путем уменьшения частоты вращения шпинделя по мере износа сверл. Однако понижения частоты вращения шпинделя обычно избегают, поскольку это увеличивает осевую силу и потенциально увеличивает возможность расслаивания. Однако, если частоту вращения

шпинделя уменьшать после «прорыва» нижнего слоя, когда осевая сила уже намного ниже, то расслаивание можно избежать. Расслаивание можно избежать и при использовании комбинированного инструмента, например, сверла-развертки, что позволяет обеспечить развертывание при значительно меньшей скорости резания, чем сверление, без явных следов расслаивания [21].

Таблица 1.2 - Значения осевой силы при различных значениях фаски износа

Частота вращения шпинделя об/ мин	Подача мм/об	Коэффициент осевой нагрузки $P_{x.экс}/P_{x.гран}$					
		A	B	C	D	E	F
1000	0,01	1,71	1,86	1,96	1,87	1,91	1,97
1000	0,015	2,41	2,63	2,75	2,58	2,67	2,76
1000	0,02	2,98	3,20	3,41	3,62	3,68	3,76
1500	0,007	1,39	1,48	1,69	1,36	1,47	1,57
1500	0,01	2,09	2,44	2,58	2,07	2,28	2,53
1500	0,013	2,62	2,77	2,86	2,48	2,68	3,13
2000	0,005	1,10	1,33	1,57	1,08	1,18	1,28
2000	0,008	1,59	1,91	2,02	1,80	1,86	1,94
2000	0,01	2,00	2,21	2,49	2,34	2,43	2,55
Среднее значение		1,99	2,20	2,37	2,13	2,24	2,39

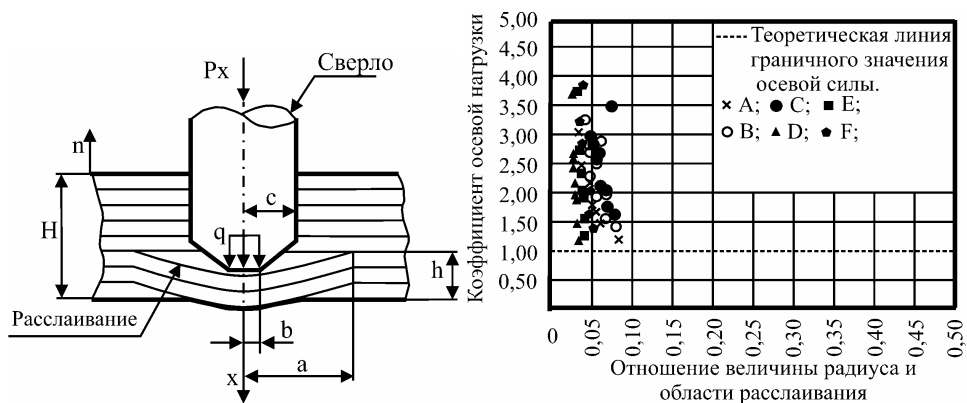


Рисунок 1.8 – Влияние фаски износа поперечной режущей кромки на величину расслаивания при сверлении углепластика в различных условиях [37]

1.2.5 Влияние геометрии и конструкции инструмента

Геометрия и конструкция инструмента влияет на все виды расслаиваний при сверлении ВПКМ.

Для любой конструкции инструмента Расслаивание наружных волокон (у поверхности входа режущего инструмента) увеличивается с увеличением переднего угла γ [7 в [31]]. Для снижения или устранения расслаивания наружных волокон (у поверхности входа режущего инструмента) необходим малый передний угол, который препятствует поднятию и отрыву первого слоя. Рекомендуемая величина переднего угла меньше 6° .

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. Этому способствует уменьшение длины контакта нижнего слоя с главными режущими кромками и изгибающих напряжений в нем (см. рис. 1.9 и 1.10). Задачу смещения точки приложения осевой силы, решают путем применения для спиральных сверл малых углов в плане, специальных методов заточки вершины спиральных сверл (например, с острием, многоплоскостная заточка), специальных конструкций сверл (например, трубчатых, комбинированных [38,32,34, 39]).

Влияние подачи на осевую силу для различных сверл показано на рис. 1.9. Наибольшую осевую силу дает спиральное сверло с нормальной заточкой, а наименьшую дают ступенчатое сверло и спиральное сверло с острием. Вместе с тем, критическая величина осевой силы для каждой конструкции сверла различна, что в совокупности обеспечивает преимущество ступенчатого сверла (см. табл. 1.3).

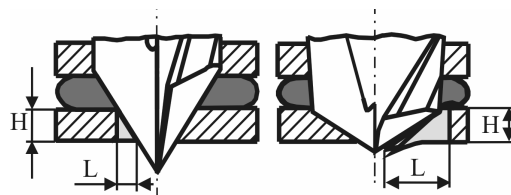


Рисунок 1.9 – Влияние угла при вершине на расслаивание [40]

Инструментальный материал существенным образом влияет на расслаивание через интенсивность изнашивания, коэффициент трения и радиус округления режущей кромки. Применение специальных методов заточки спиральных сверл из быстрорежущей стали не дает ощутимого эффекта на качество обработанной поверхности [35].

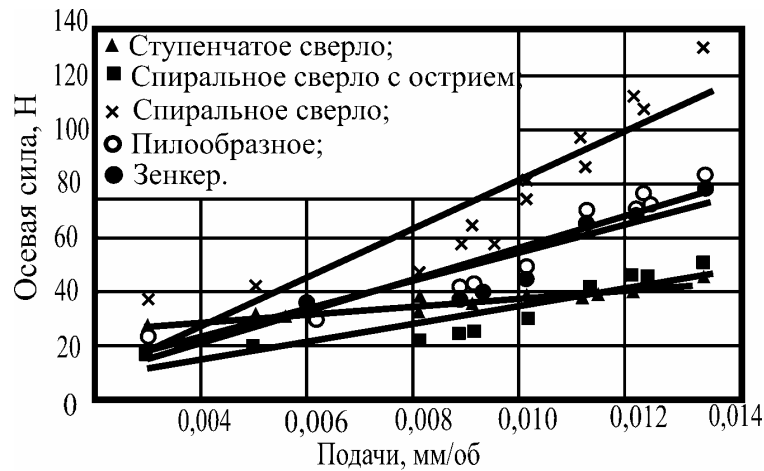


Рисунок 1.10 – Соотношение между осевой силой и подачей для некоторых специальных сверл [38]

Таблица 1.3 - Критическая осевая сила и подача, обеспечивающие сверление без расслаивания [1]

Тип сверла	Расчетная критическая осевая сила, Н	Экспериментальная критическая осевая сила, Н	Критическая подача, мм/об
Спиральное сверло	34,1	31,8	0,0047
Пилообразное сверло	38,8	30,5	0,0051
Спиральное сверло с острием	36,2	26,4	0,0069
Зенкер	48,4	42,7	0,0075
Ступенчатое сверло	31,4	29,1	0,0049

В то же время сверла с короткой перемычкой и острой режущей кромкой из твердого сплава или поликристаллического алмаза обеспечивают наименьшее расслаивание (см. рис. 1.11) [25].

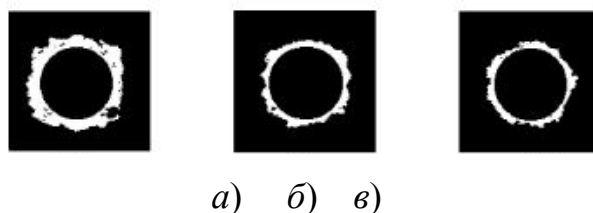


Рисунок 1.11 – Изображения, полученные методом ультразвуковой дефектоскопии, показывающие распространение расслаивания, вызванного сверлением с помощью спиральных сверл ($s = 0,01\text{мм/об}$, $n = 1000\text{об/мин}$, $d = 8\text{мм}$). с нормальной заточкой (а), с острием (б), с пилообразной вершиной (в) [27]

Поэтому твердосплавные инструменты или инструменты с применением поликристаллического алмаза являются предпочтительными для обработки ВПКМ.

Экспериментально установлено, что биение сверла (см. рис. 1.12) увеличивает расслаивание отверстия [31]. Для различных сверл Tsao С. показал, что критическая осевая сила уменьшается с увеличением биения вершины сверла. Различное биение сверл, вызванное погрешностью переточки, вызывает рассеяние размеров и увеличение расслаивания при одной и той же осевой силе. Уменьшение осевой силы почти пропорционально величине эксцентриситета сверла [41], [42]. Поэтому большое внимание должно быть уделено заточке и переточке сверл, закреплению сверл в шпинделе станка или ручной машины с обеспечением при этом минимального биения инструмента.

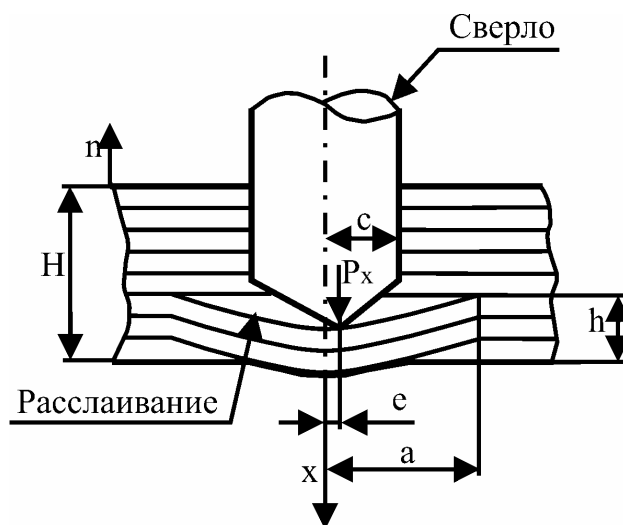


Рисунок 1.12 – Схема к оценке влияния биения сверла на критическую осевую силу при сверлении ВПКМ [41]

1.2.6 Влияние материала матрицы и формы армирования

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

В работах [43], [31] показано, что, свойства матрицы и технология производства ВПКМ влияют на качество поверхности после механической обработки. Например, у пластин, произведенных путем сплавления в автоклаве, при прочих равных условиях возникает меньше повреждений, чем у пластин, произведенных в печи.

При сверлении стеклопластиков осевая сила увеличивается с увеличением объемной доли волокна. Увеличение скорости резания при сверлении поперечных (cross-winding), тканевых (woven) и штапелированных (chopped) КМ, уменьшает расслаивание наружных волокон (у поверхности входа режущего инструмента) в результате уменьшения осевой силы. Осевые силы при сверлении ленточных (continues-winding) ВПКМ в три раза больше, чем при сверлении поперечных ВПКМ. У штапелированных КМ расслаивание наружных волокон (у поверхности входа режущего инструмента) меньшее, чем у тканевых. Для одной и той же формы волокнистого наполнителя, расслаивание наружных волокон (у поверхности входа режущего инструмента) и расслаивание наружных волокон (у поверхности выхода режущего инструмента) у тканевых ВПКМ на эпоксидной основе ниже, чем у ВПКМ на полиэстеровой основе [44], [45], несмотря на то, что эти два композиционных материала обрабатываются с приблизительно одинаковыми осевыми силами.

По данным Khashaba [45] для одного и того же типа матрицы (полиэстер), хоть штапелированные КМ и имеют большую осевую силу, чем тканевые, у

них возникает меньшее расслаивание наружных волокон (у поверхности входа режущего инструмента), чем у поперечных КМ (рис. 1.13 а). Это в принципе противоречит прямой зависимости между осевой силой и расслаиванием. И наоборот крутящий момент тканевых эпоксидных КМ выше, чем при сверлении штапелированных полиэфировых КМ. Этот является следствием перпендикулярности волокон (плетения) и (наполнения) в тканевых КМ. В результате, при работе сверла за один оборот, режущие кромки срезают волокон в четырех направлениях, касательных к расположению волокон: два волокна (плетения) под углом относительно режущей кромки, равным 0° и 180° (см. рис. 1.13, в), и два волокна (наполнения) под углом относительно режущей кромки, равным 90° и 270° (см. рис. 1.13, б). Эти волокна в момент резания находятся под действием сжимающей нагрузки, что приводит к возникновению при сверлении пропитанных эпоксидной смолой тканевых КМ большего крутящего момента, чем у штапелированных КМ, которые считаются квазиизотропными материалами (см. рис. 1.13, г).

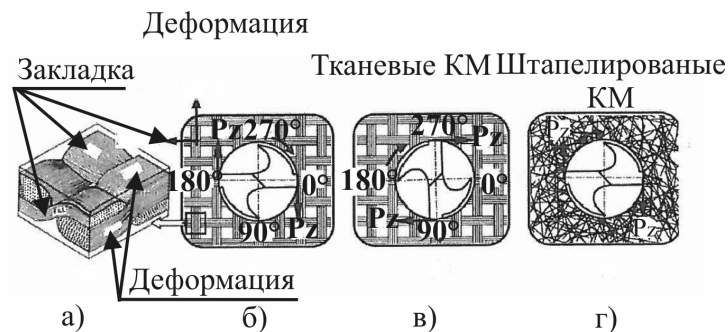


Рисунок 1.13 – Схематические диаграммы, показывающие влияние направления волокон на касательные силы резания [45]

1.3 Выводы

. Анизотропия свойства ВПКМ вследствие слоистости структуры существенно изменяет процесс стружкообразования при резании по сравнению с металлическими материалами.

2. Процесс стружкообразования при резании ВПКМ в значительной степени определяется направлением волокнистого наполнителя в отдельных слоях и в меньшей степени зависит от переднего угла.

3. В зависимости от направления волокнистого наполнителя и переднего угла при резании ВПКМ формируется пять видов стружки: стружка расслаивания, стружка продольного изгиба, стружка, формируемая срезанием волокон и стружка макроразрыва.

4. Абразивное действие волокна на режущий инструмент является основной причиной довольно низких скоростей резания по сравнению со скоростями при обработке конструкционных сталей и обуславливает необходимость его оснащения износостойкими металлокерамическими твердыми сплавами и сверхтвердыми материалами.

5. Склонность слоистых ВПКМ к расслаиванию требует особых мер по предупреждению их разрушения под действием сил резания. Направления сил резания должны быть по возможности такими, чтобы они способствовали сжатию между собой слоев ВПКМ. Толщина среза на выходе инструмента из обрабатываемого материала должна быть максимальной. Нельзя допускать повышенный износ инструмента, так как это приводит к резкому увеличению сил резания.

6. Возникающая при резании композитов элементная стружка имеет значительный удельный объем и содержит большое количество пыли. Для удаления стружки из зоны резания при обработке отверстий (сверлами, зенкерами, метчиками и др.) требуется большая площадь сечения канавок и малая шероховатость их поверхности.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ОБРАБОТКИ

2.1 Описание эксперимента

Важнейшей составной частью научных исследований является эксперимент, основой которого является научно поставленный опыт с точно учитываемыми и управляемыми условиями. Основной целью эксперимента является выявление свойств исследуемых объектов, проверка справедливости гипотез и на этой основе широкое и глубокое изучение темы научного исследования. При планировании эксперимента мы руководствовались следующим алгоритмом действий: постановка цели эксперимента, задание условий проведения эксперимента, выбор входных и выходных параметров, установление требуемой точности выходных параметров, определение методики изготовления образцов, изготовление образцов, конструирование и создание приспособления для обработки образцов, анализ полученных результатов. Более подробная информация по каждому из этих пунктов представлена ниже.

2.1.1 Цели и задачи эксперимента

При проведении натурного эксперимента нами было поставлено ряд задач:

1. Проверка адекватности прогноза качества поверхности (наличия и величины повреждений) полученного при КЭ моделировании процесса ортогонального резания;
2. Исследование влияния ориентации волокон ВПКМ на изменение качества обработанной поверхности;
3. Провести исследование влияния ориентации режущей кромки инструмента относительно исследуемого образца.

2.1.2 Технология изготовления 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 40г/м² с эпоксидной смолой марки ЭД-20. Основные составляющие композиционного материала представлены на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Компоненты для изготовления образцов

Как наполнитель применялась смола эпоксидная. При укладку волокон проводился предварительный нагрев форм до температуры 40°C, с целью улучшения смачивания волокна эпоксидной. Было изготовлено 4 образца с различными углами направленности волокнистого наполнителя. Исходя из этого использовались четыре основных схемы укладки волокна, а именно 0°, 45°, 90° и 135°. 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, как это показано на рис. 2.1.



Рисунок 2.2 – 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. Постукивая молотком по этим наставкам производилась удаление образца из формы. 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 волокни-

стого 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. 2.3).

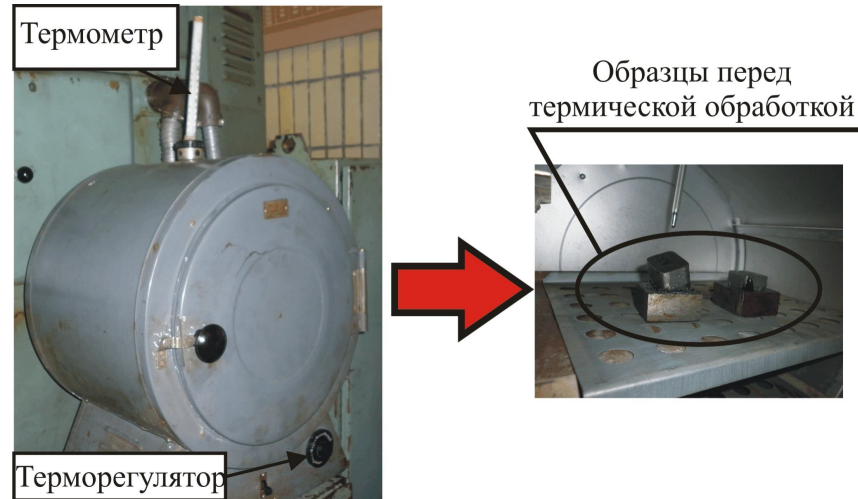


Рисунок 2.3 – Термическая обработка образцов ВПКМ

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 замешались 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.

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.

2.1.3 Методика подготовки образцов

Как известно из теории и практики проведения экспериментальных исследований на результат могут влиять различные факторы. Наша задача заключалась в том, что бы исключить воздействие нежелательных факторов, например окружающей среды, а ограничить область исследования интересующими нас факторами. Для нас особый интерес представляли угол ориентации волокон в ВПКМ – θ и угол ориентации образца относительно режущей кромки инструмента - η . 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. 2.4 показана схема контакта инструмента и обрабатываемого образца. На рисунке наглядно показаны основные схемы резания ВПКМ выполненные в ходе экспериментальных исследований.

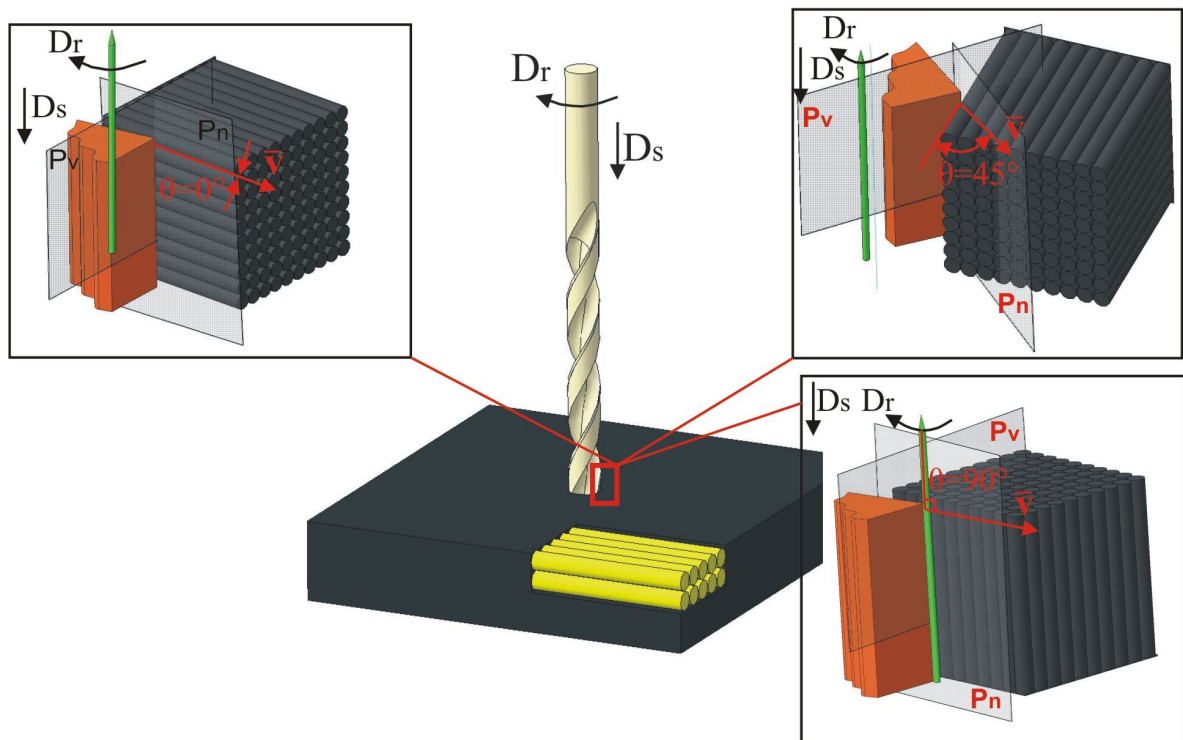


Рисунок 2.4 – Углы приложения режущего инструмента к исследуемому образцу

2.1.4 Оборудование, инструменты и приборы

Для выполнения поставленной задачи было принято решение о применении станда в условиях лаборатории. Стенд для проведения эксперимента представляет собой фрезерный станок с полуавтоматической системой фиксации режущего инструмента в шпинделе станка (рис. 2.5). На рис. 2.5 приведен общий вид установки состоящей из фрезерного станка модели 6Р12 с полуавтоматической системой фиксации режущего инструмента, приспособление для фиксации образцов, режущий инструмент, болты и прихваты для фиксации приспособления на столе станка.

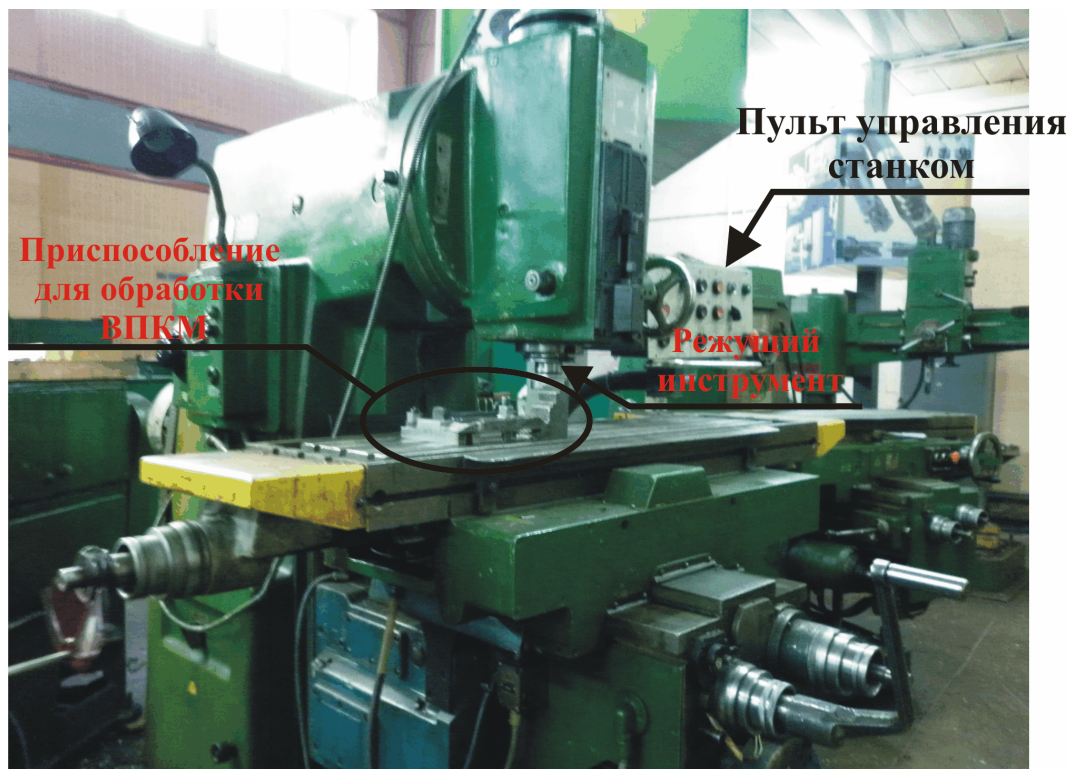


Рисунок 2.5 – Экспериментальная установка

Обработка образцов выполнялась перемещением стола по X координате. Инструмент закреплен гидравлическим зажимом в шпинделе станка и зафиксирован от приворота вокруг оси вращения.

В процессе создания установки было разработано и изготовлено приспособление позиция 3 на рис. 2.6 для крепления исследуемых образцов. Приспо-

собление представляет собой прямоугольную деталь с пазом в центральной части. Целевое назначение которого сводится к жесткому креплению образца и возможности регулирования высоты образца по мере удаления исследуемых слоев. Крепление реализовывалось при помощи двух винтов М8. Само приспособление крепилось при помощи винтов М16 к столу фрезерного станка. На рис. 2.6 показана одна из схем крепления приспособления на столе станка, которая была реализована в процессе исследования.

После крепления приспособления на столе станка резец оставался неподвижным, в силу того, что это обусловлено конструкцией шпинделя станка. Движение происходило за счет перемещения стола станка, а, следовательно, приспособления в котором был закреплен образец.

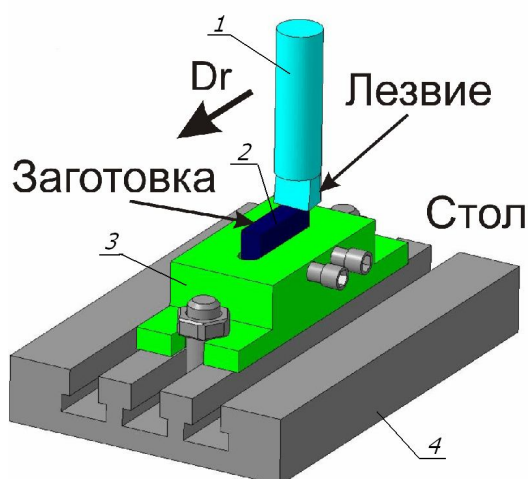


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема обработки образцов ВПКМ

2.1.5 Режущий инструмент

Режущий инструмент в описанном исследовании применялся специально заточенный режущий клин. Материал инструмента – быстрорежущая сталь. Заточка производилась на заточном станке ЗВ642 см. рис 2.7.

Станок ЗВ642 по своей общей компоновке подобен заточному станку ЗА64Д (имеет крестовый стол и перемещающуюся вертикально по колонке

двустороннюю шлифовальную головку). Однако станок ЗВ642 имеет существенные преимущества, а именно: а) его конструкция более жесткая и гарантирует сохранение необходимой точности более длительное время. Значительно отличается по точности и жесткости шлифовальная головка станка; б) введено реверсирование шлифовального круга, что позволяет более эффективно использовать оба конца шпинделя; в) увеличена жесткость и точность установки оправок шлифовальных кругов в результате посадки их в шпиндель на внутренний конус; г) суппорт станка поставлен на подшипники качения, в результате чего увеличилась чувствительность поперечной подачи, установлены механизмы тонкой и толчковой поперечных подач; д) перемещение стола гидравлическое — со скоростью 0,2—8 м/мин, регулирование чисел оборотов шлифовального круга — бесступенчатое с помощью привода постоянного тока; е) в комплекте станка есть гидрофицированные приспособления, позволяющие автоматизировать заточку ряда инструментов.

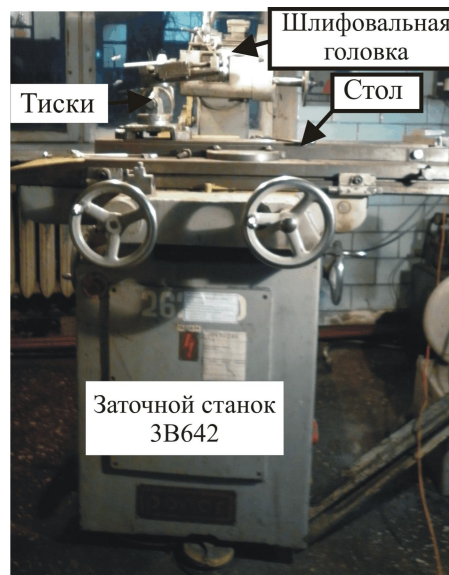


Рисунок 2.7 – Общий вид заточного станка ЗВ642

Заточка режущего инструмента (резца) производилась шлифовальным кругом из белого электрокорунда. Электрокорунд белый производят из природных минералов, руд обогащенных и необогащенных, измельченных смесей методом плавления в печах, охлаждения, дробления кусков расплава и отсева образовавшихся зерен по фракциям. Прочность, твердость, хрупкость, термостойкость

электрокорунда белого можно регулировать в процессе его изготовления. Электрокорунд белый – более твердый, чем электрокорунд нормальный, и используется в инструменте с твердой связкой (керамика). Этот абразивный материал отлично зарекомендовал себя при обработке чугуна, нержавеющей стали, изготовлении инструмента для обработки закаленных твердых сталей, для шлифования деталей из металла и стекла, при обработке стекла, кожи, дерева. Шлифовальные круги из электрокорунда белого лучше шлифуют и меньше прижимают металл.

Заточка режущего инструмента (резца) производилась в инструментальных тисках. Как видно из рис. 2.8 заточка выполнялась по двум углам главной секущей плоскости $\alpha=7^\circ$ и $\gamma=8^\circ$.

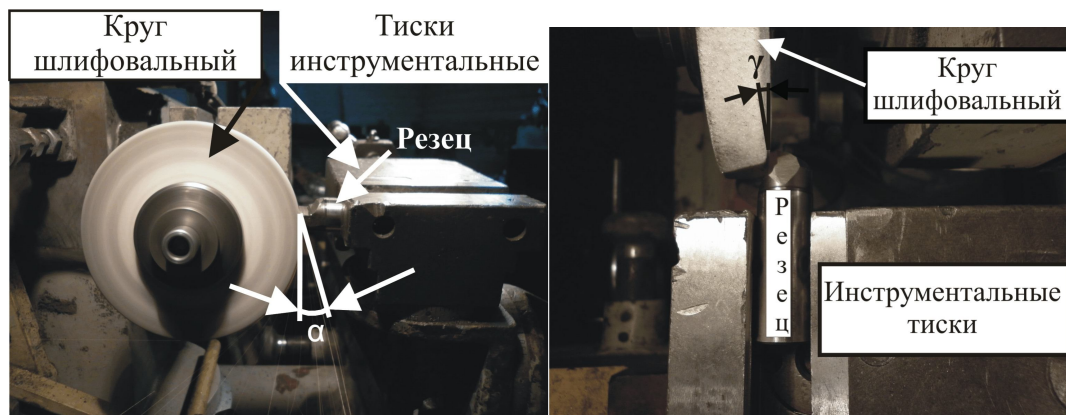


Рисунок 2.8 – Заточка инструмента

2.1.6 План эксперимента

Порядок проведения испытаний важен, если входные параметры (факторы) при исследовании одного и того же объекта в течение одного опыта принимают разные значения. Порядок испытаний также важен в процессе поисковых исследований: в зависимости от выбранной последовательности действий при экспериментальном поиске оптимального соотношения параметров объекта или какого-то процесса может потребоваться больше или меньше опытов. Эти экс-

периментальные задачи подобны математическим задачам численного поиска оптимальных решений. Проведение целого ряда экспериментов в постоянных условиях с одной переменной позволит получить результаты высокой точности и ряд образцов для дальнейшего исследования. Так в ходе выполнения поискового эксперимента нами варьировалось два фактора. Как уже упоминалось ранее это угол ориентации волокон θ° и угол ориентации режущей кромки относительно образца η° , как показано на рис. 2.4. Различное положение режущих кромок относительно направления укладки волокон имитирует движение различных элементов режущих поверхностей инструмента. Так вариация угла η° повторяет движение вспомогательной режущей кромки торцевой фрезы, угол θ° вспомогательной режущей кромки сверла. Сочетание этих двух составляющих позволит нам получить представление о движении конической части(главной режущей кромки) спирального сверла. Комбинации всех возможных сочетаний исследуемых угол собраны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Исходные данные эксперимента

θ , град	η , град	γ , град	α , град	a, мм	b, мм	L,мм	Инструментальный материал
0	0	7	7	0,025	10	30	P6M5
0	45						
0	90						
45	0						
45	45						
45	90						
90	0						
90	45						
90	90						
135	0						
135	45						
135	90						

где θ - угол направленности волокон в ВПКМ, град;
 η – угол ориентации образца относительно режущей кромки, град;
 γ – передний угол, град;
 α – задний угол, град;
a – глубина резания, мм;
b – толщина образца, мм;
L – путь резания, мм.

2.2 Порядок проведения эксперимента

В предыдущих пунктах были описаны теоретическое обоснование схемы проведения эксперимента, оборудования и инструментального обеспечения. В этом пункте содержится практическая информация. На (рис. 2.9 а) изображена схема обработки исследуемого образца с углом укладки волокон $\theta = 0^\circ$ и $\eta = 0^\circ$. Как видно из рисунка образец размещен таким образом, что направление укладки волокон и режущая кромка параллельны, что образует угол $\eta = 0^\circ$. Приспособление было выставлено в данном положении при помощи угольника. Обработка образца проводилась в несколько проходов. Целью подобных действий, было стремление сформировать стабильный деформируемый слой, а также для приработки инструмента.

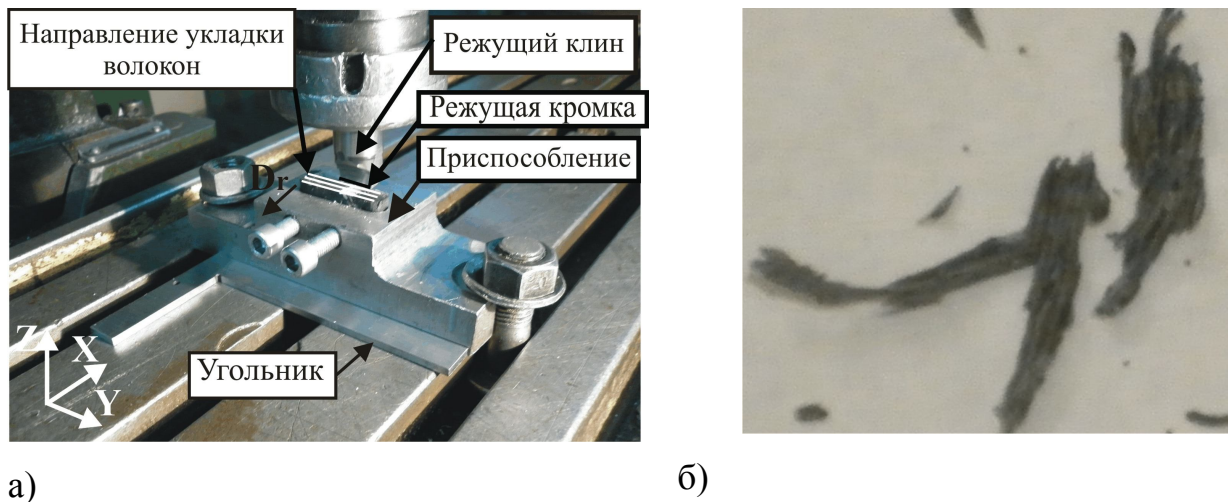
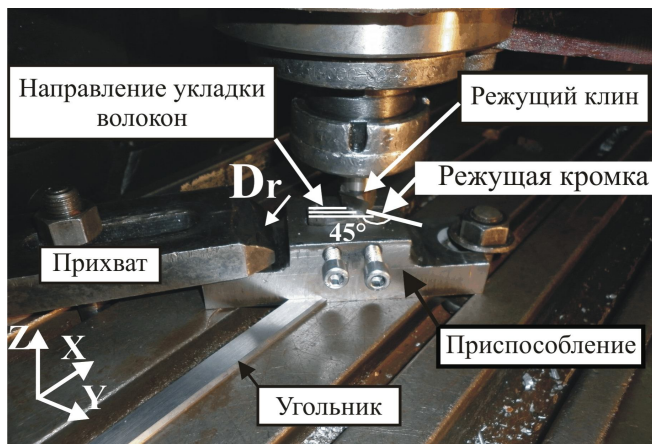


Рисунок 2.9 – Схема обработки образца с углом укладки волокон $\theta = 0^\circ$ и углом $\eta = 0^\circ$

Глубина резания при обработке всех образцов равнялась 0,025 мм. Первый проход выполнялся с глубиной резания равной 0,1 мм, что бы сформировать базовую поверхность от которой будет отсчитываться ноль исследуемой поверхности. Следующим действием стол станка вместе с образцом отводился по Y координате в сторону от режущего клина, а затем перемещением по X координате снова выставлялся перед режущим клином. После чего образец повтор-

но выставлялся перед режущим клином. Данное положение стола было определено как ноль для последующей обработки. После выполнения этих действий можно выполнить выставку шкалы перемещения по оси Z на ноль и осуществить поднятие стола на $0,025$ мм. Выполнив резание образца необходимо вновь повторить описанную последовательность действий. В результате была получена стружка расслаивания, изображенная на (рис. 2.9 б). Стружка представляет собой большие фрагменты удаленного материала длиной до 20 мм и шириной от 2 до 3 мм. Отделение стружки сопровождалось щелкающими звуками и облетанием на значительное расстояние от области резания.

На (рис. 2.10 а) изображена схема обработки исследуемого образца с углом укладки волокон $\theta = 0^\circ$ и $\eta = 45^\circ$. Как видно из рисунка образец размещен таким образом, что направление укладки волокон и режущая кромка формируют угол $\eta = 45^\circ$. Приспособление было выставлено в данном положении при помощи угольника. Обработка образца, как и в предыдущем случае, проводилась в несколько проходов.



а)



б)

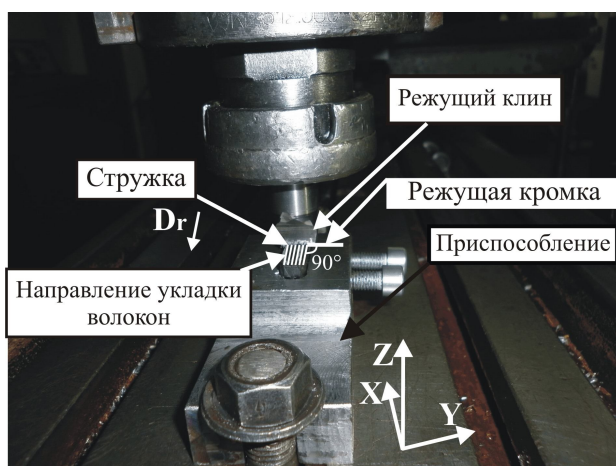
Рисунок 2.10 - Схема обработки образца с углом направленности волокон $\theta = 0^\circ$ и углом $\eta = 45^\circ$

Глубина резания при обработке всех образцов равнялась $0,025$ мм. Первый проход выполнялся с глубиной резания равной $0,1$ мм, что бы сформировать базовую поверхность от которой, будет отсчитываться ноль исследуемой поверхности. Следующим действием стол станка вместе с образцом отводился по

У координате в сторону от режущего клина, а затем перемещением по X координате снова выставлялся перед режущим клином. После чего образец повторно выставлялся перед режущим клином. Данное положение стола было определено как ноль для последующей обработки. После выполнения этих действий можно выполнить выставку шкалы перемещения по оси Z на ноль и осуществить поднятие стола на 0,025 мм. Выполнив резание образца необходимо вновь повторить описанную последовательность действий.

Стружку, полученную в результате обработки образца углом направленности волокон $\theta = 0^\circ$ и углом $\eta = 45^\circ$, также как и в предыдущем случае можно классифицировать как стружку расщипывания, тем ни менее следует отметить ее отличия. Фрагменты стружки имеют более закругленную форму. Отделение стружки от обрабатываемого материала не сопровождалось «облетанием» стружки и треском. Процесс резания происходил плавно.

На (рис. 2.11 а) изображена схема обработки исследуемого образца с углом укладки волокон $\theta = 0^\circ$ и $\eta = 90^\circ$. Как видно из рисунка образец размещен таким образом, что направление укладки волокон и режущая кромка формируют угол $\eta = 90^\circ$. Приспособление было выставлено в данном положении при помощи угольника. Обработка образца, как и в предыдущем случае, проводилась в несколько проходов.



а)



б)

Рисунок 2.11 - - Схема обработки образца с углом направленности волокон $\theta = 0^\circ$ и углом $\eta = 90^\circ$

Глубина резания при обработке всех образцов равнялась 0,025 мм. Первый проход выполнялся с глубиной резания равной 0,1 мм, что бы сформировать базовую поверхность от которой, будет отсчитываться ноль исследуемой поверхности. Следующим действием стол станка вместе с образцом отводился по Y координате в сторону от режущего клина, а затем перемещением по X координате снова выставлялся перед режущим клином. После чего образец повторно выставлялся перед режущим клином. Данное положение стола было определено как ноль для последующей обработки. После выполнения этих действий можно выполнить выставку шкалы перемещения по оси Z на ноль и осуществить поднятие стола на 0,025 мм. Выполнив резание образца необходимо вновь повторить описанную последовательность действий.

Стружку, полученную в результате обработки образца углом направленности волокон $\theta = 0^\circ$ и углом $\eta = 90^\circ$, является стружка расслаивания. В процесс резания она плавно отделялась от обрабатываемого материала и сходила по передней поверхности резца, формируя круглые валик.

2.3 Результаты эксперимента и их анализ

Базой для создания экспериментальной установки решено было применить вертикально – фрезерный станок модели 6P12.

Главным критерием в данном исследовании было принято качество обрабатываемой поверхности отсутствие трещин и других поверхностных повреждений, как то расслаивание или вытягивание волокон. Каждый из образцов был исследован при помощи электронного микроскопа РЭМ 100У. Микроскоп является стационарным лабораторным прибором. Он предназначен для исследования топографии (микрogeометрии) поверхности твёрдого тела методом атомной электронной эмиссии и элементного состава методом рентгено-спектрального анализа в микрообъёмах сплавов, руд и других объектов.

Изображение топографии поверхности объекта визуально наблюдается на экране ЭЛТ и регистрируется на роликовой широкоформатной плёнке зеркальной фотокамерой.

Данное оборудование позволяет при тысячекратном увеличении изучать образцы. Для более точного определения качества поверхностной структуры образцы поддавались изучению в 70-ти кратном увеличении, 200-т кратном увеличении и 1000-е кратном увеличении. Проанализировав результаты эксперимента и сопоставив их с исходными данными, мы пришли к выводу, что в четвертой колонке слева представлены повреждения поверхности осуществляемые вспомогательной режущей кромкой сверла. Как мы можем видеть при 70 кратном увеличении этой поверхности на ней остались различные повреждения. Так при обработке образца с углом направленности волокон $\theta^\circ=0^\circ$ и углом ориентации инструмента 90° наблюдается вытягивание волокон протяженностью свыше 1 мм. Обработка образца под углом $\theta^\circ=45^\circ$ и прежнем положении образца, характеризуется высоким качеством поверхности без видимых повреждений. В то время как обработка образца с углом направленности волокон 90° была отмечена наличием не резанных волокон на участке площадью 0,5 см². Но наихудшее качество поверхности было зафиксировано при исследовании образца с углом укладки волокон 135° наличие не срезанных волокон наблюдалось на 70% исследуемой площади, а это 2 см².

Изображения показание в 3 сверху ряду (90°) иллюстрируют качество поверхности, как если бы она была получена в результате обработки вспомогательной режущей кромкой торцевой фрезы. В этом случае наблюдается расслаивание при обработке ВПКМ с углом направленности волокон $\theta^\circ=90^\circ$ под углом ориентации режущей кромки равным 0° . В тоже время при повороте режущей кромки на 45° качество поверхности улучшается не демонстрирую явных повреждений. При положении инструмента под углом 90° , наблюдается не срезание волокон ВПКМ. Наличие расслаиваний в ВПКМ существенно сказывается на времени использования композиционного материала, существенно снижая его прочность и сопротивляемость усталостным нагрузкам. Не срезан-

ные волокна также оказывают негативное влияние на качество механических соединений с использованием ВПКМ имеющих подобный дефект. По мимо этого не срезанные волокна существенно снижают ресурс режущего инструмента, так как абразивное воздействие таких волокон приводит к преждевременному затуплению инструмента.

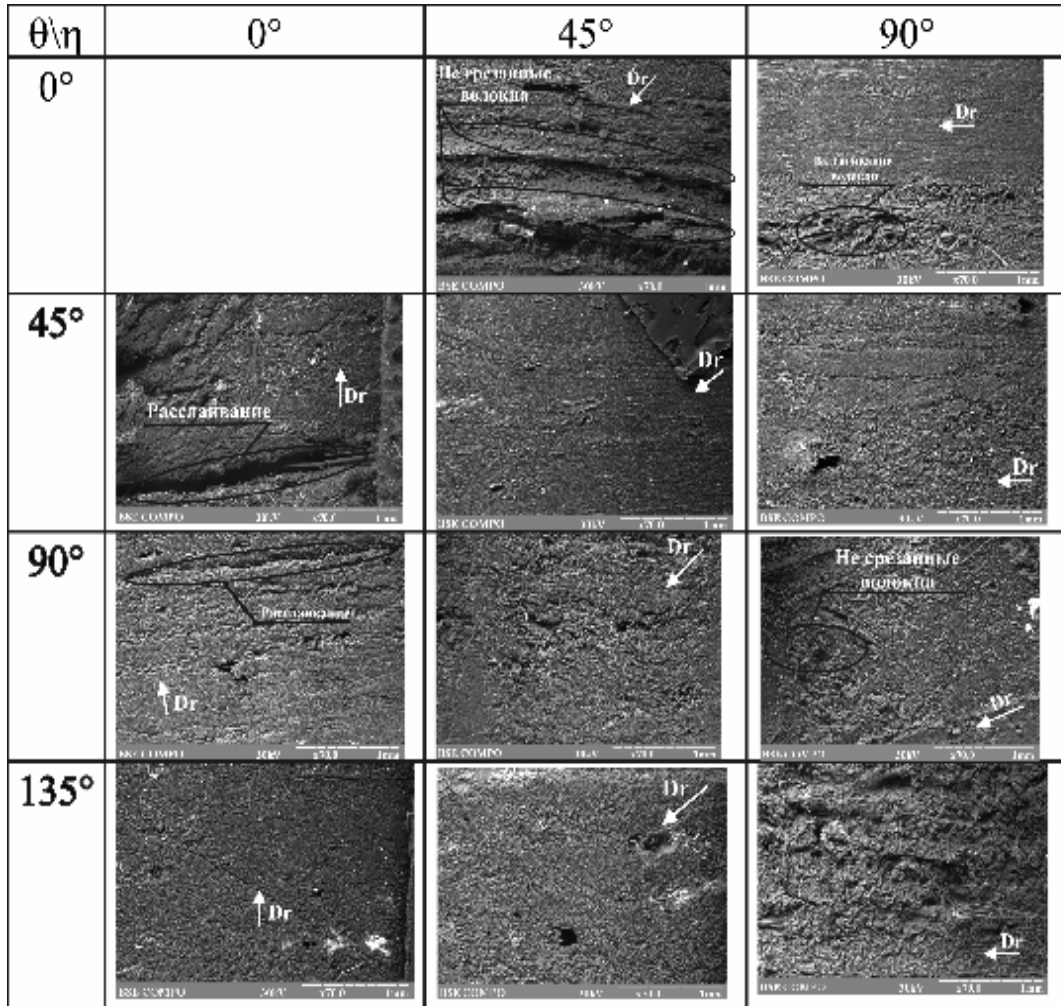


Рисунок 2.12 – Полученная поверхность при 70-ти кратном увеличении

2.4 Выводы

1. Анализ процесса сверления показал, что при вращении сверла ориентация волокон однонаправленного ВПКМ по отношению к его режущим кромкам постоянно изменяется в трехмерном пространстве. Предложено характеризо-

вать это относительное положение волокон двумя углами θ - углом направленности волокон в главной секущей плоскости и η - углом ориентации образца относительно режущей кромки. Замена процесса сверления процессом прямоугольного резания однонаправленного композита позволяет выявить закономерности влияния этих углов на качество поверхности и показатели рабочего процесса

2. Разработана методика подготовки образцов и проведения эксперимента по прямоугольному резанию однонаправленного ВПКМ с углами θ от 0 до 135° и η от 0 до 90°.

Результаты проведенного эксперимента позволили установить, что наибольшие повреждения боковой поверхности отверстия наблюдаются при угле направленности волокон равном 135°. Для поверхности с данной ориентацией волокон характерны многочисленные повреждения в виде не срезанных волокон, что, несомненно, негативно скажется на сроке эксплуатации поверхности с подобными повреждениями.

3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 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. [46], Везузуба Н. В. [47], Кравченко Л. С. [48]. В 70-е-80-е годы прошлого столетия работы выполнялись в механическом институте (г. Санкт-Петербург) под руководством Степанова А. А. [49], Омском политехническом институте под руководством Б. П. Штучного [50], в МВТУ им. Баумана (г. Москва) под руководством Подураева В. Н. [51], в институте сверхтвердых материалов НАН Украины (Сороченко В. Г. [52]), в УкрНИИАТе (Б. В. Лупкин [53]), научными школами проф. König W. [54], проф. Davim J. P. [6], проф. Ramulu M. [55], проф. Kim D. [56] 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 [8].

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

сверления [57], построение модели осевой силы при сверлении [58, 59], моделей свойств материалов [60] и др.

Аналитические модели используются в современных исследованиях резания ВПКМ как инструмент для прогнозирования сил резания. Эти модели описаны в работах [61 - 30]. Качество обработанной поверхности, критическая для расслоения осевая сила сверления, коэффициент расслоения рассматривались в работах Tsao C. C. [62, 27], Hocheng H. [63], Lachaud F. [64], Jain S. [65] Sadat A. B. [66].

Изучение стружкообразования проводилось в основном на 2D моделях ортогонального резания Zhang L. и соавторов [22], Puw H.Y. и Hocheng H. [67]. Иногда применяется модель с условной плоскостью сдвига [68]. 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 [69]. 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 [70]. 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 [71]. Основные отличия заключаются в описании поведения обра-

батываемого материала и выборе критериев разрушения. В этом направлении следует отметить работы Arola D. и Ramulu M. [72, 69], Mahdi M. I. и Zhang L. [73], Durao L. M. и соавторов [74,75], Budan D. A. и Vijayarangan S. [76], Zitoune R. и Collombet F. [44], Rahme P., Landon Y., Lachaud F., Piquet R. [77], Bhattacharya D. и Horrigan D. P. [78], Singh I. и соавторов [79, 80], Iliescu D. [8], Böhm A. [81], Larsi L.[68], Calzada K. A. [82], Venu Gopala Rao G. [83, 84], Ramesh M. V. и соавторов [85], Nayak D. и соавторов [86], Pramanik и соавт.[87], Dandekar C. и Shin Y. [88] 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 [68, 82]:

- **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. [72, 69], Mahdi M. I. и Zhang L. [73], Ramesh M. V. и соавторы [85], Larsi L.[68], Zitoune R. и Collombet F. [89].

- **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 [90, 91]. Такой под-

ход к детализации эффективно применили для моделирования расслоения при сверлении слоистых ВПКМ Durgao L. M. и соавторы [74, 75], Singh I. и соавторы [79, 80], Rahme P. и соавторы [77], Bhattacharya D. и соавторы [78], Budan D. A. и Vijayarangan S. [76] 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 [86], Venu Gopala Rao G. и соавт. [83, 84], Pramanik и соавт. [87], Larsi L. [68], Calzada K. A. [82], Dandekar C. и Shin Y. [88], 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 [86] с помощью разработанной ими микромеханической модели в пакете ABAQUS показали теоретически, что с изменением угла ориентации волокон θ 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 [82]. Их модель дала те же качественные результаты. Следует отметить, что экспериментальные данные Wang D.H., и др. [92] 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) [82].

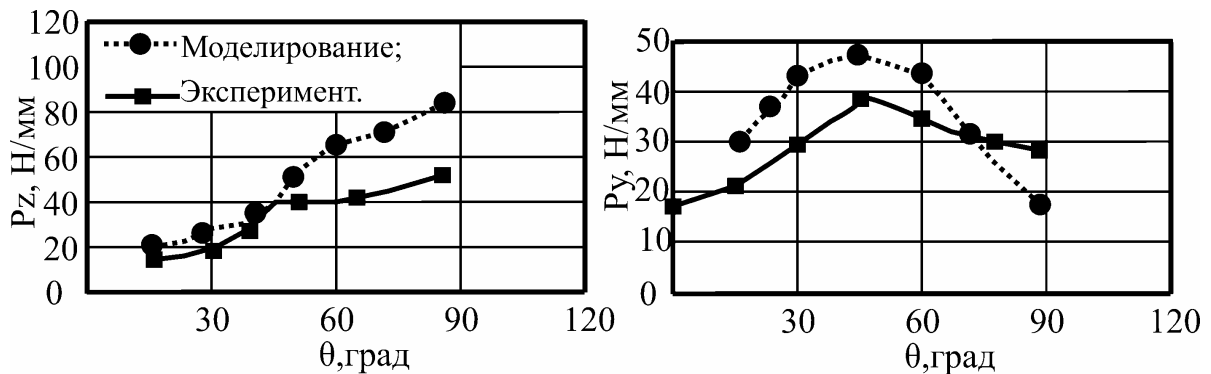


Рисунок 3.1 - Влияние угла направленности волокон на главную проекцию P_z и радиальную проекцию P_y удельной силы резания [86]

Интересной также является модель прямоугольного резания Piescu D. [8], реализованная методом дискретных элементов.

3.2 Обоснование схемы моделирования

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° до 180° со сдвигом между слоями на 45° (см. рис.3.2).

То есть моделирования резания слоя с разным углом наклона волокон к режущему клину будет достаточно, чтобы проследить процессы во всем композите при сверлении (см. рис.3.3).

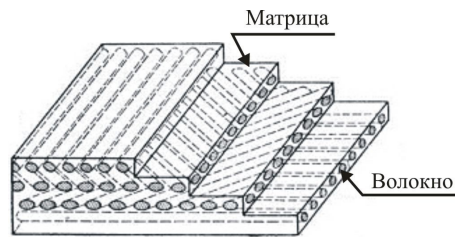


Рисунок 3.2 – Размещение волокон в слоях композиционного материала

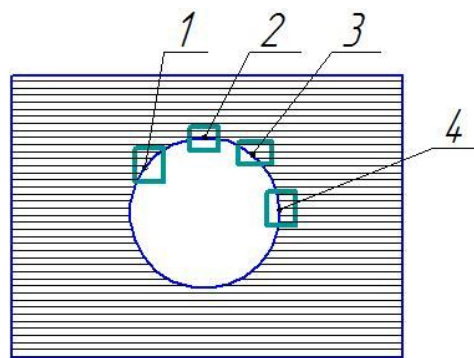


Рисунок 3.3 – Выбор типичных участков с направлением волокон 0° , 45° , 90° , 135° к режущему клину

Исходя из выбранных участков, ориентации углеродного волокна к режущему клину будут располагаться, как это показано на рис. 3.4:

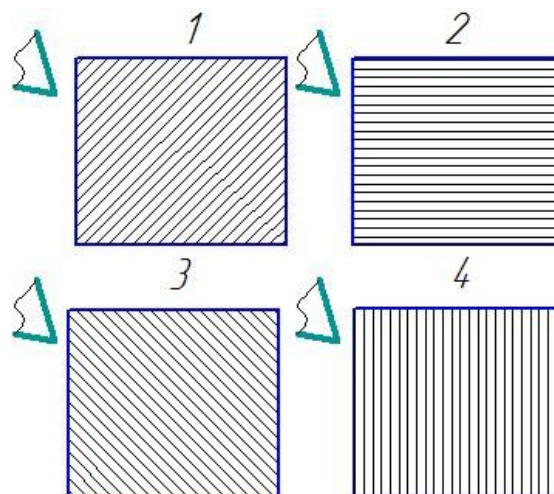


Рисунок 3.4 – Угол направленности волокон углеродного волокна относительно главного движения резания в главной секущей плоскости

3.3 Расчетная схема

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. 3.5). 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 [86]. 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.

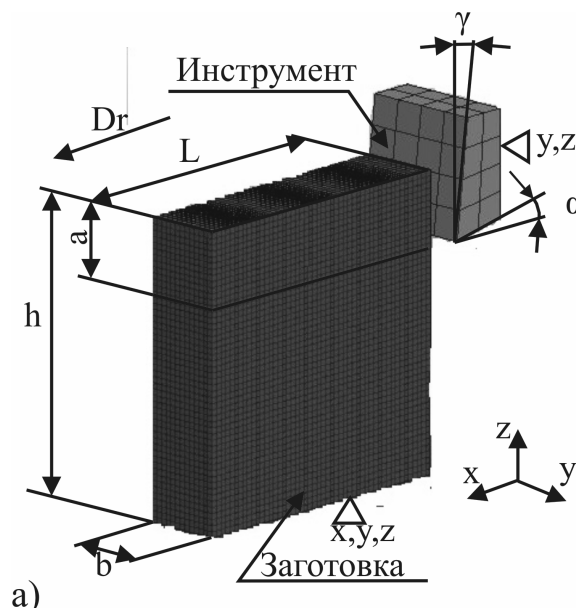


Рисунок 3.5 - Расчетная схема модели с граничными условиями

3.4 Разрешающая система уравнений

Как было показано ранее, КЭ модель процесса резания является лишь инструментом в исследовании сложных процессов происходящих при резании ВПКМ. Процесс резания является многогранным, так как зависит от свойств обрабатываемого материала, инструмента и характеристик оборудования, который реализуется, как в технологической системе отдельного станка, так и во всем цехе. Разница между этими процессами заключается лишь в степени их детализации с точки зрения наблюдателя. В связи с этим и компьютерная модель процесса резания, предназначенная для совершенствования производственного процесса, должна отличаться степени своей детализации в зависимости от задачи, для решения которой она создается. На развитие идей виртуального моделирования [93] схема распределения задач на классы по масштабу характерного элемента исследуемой системы может быть представлена рис. 3.3. Чем меньше размер характерного элемента исследуемой системы, тем более детальной (как геометрически, так и физически) должна быть построена модель процесса обработки для решения задач с целью усовершенствования этой системы. Например, если необходимо увеличить прочность режущей кромки лезвия, то эта задача имеет масштаб (уровень детализации) лезвия, и, следовательно, при построении модели для решения этой задачи необходимо учитывать форму округления режущей кромки, локальное распределение контактных напряжений и т.д. С другой стороны, если ставится задача определения прогиба заготовки при обработке точением, то она уже имеет масштаб (уровень детализации) заготовки. Поэтому столь подробная информация о процессе взаимодействия лезвия с заготовкой и стружкой, как определено в предыдущем примере, в данном случае не требуется, а достаточно лишь достоверно спрогнозировать вектор силы резания.

Очевидно, что от уровня детализации задачи зависят время вычислений и сложность модели. В общем случае было бы удобно использовать универсаль-

ную модель технологической операции (задача масштаба станка), которая одновременно учитывала явления на всех уровнях детализации. Однако для построения такой модели потребуются КЭ довольно малого размера (около 1 мкм). Учитывая характерные размеры стружки (~ 1 мм), инструмента (~ 10 мм), заготовки (~ 100 мм) и станка (~ 1000мм) существенно отличаются, такая термомеханическая модель даже при возможности создания неравномерной КЭ-сетки будет содержать больше 10^6 элементов, при использовании даже самых современных вычислительных средств требует не менее 1-4 недель вычислений.

В основном, время вычислений можно существенно сократить за счет выравнивание характерных размеров исследуемых объектов с размерами КЭ, необходимыми для моделирования.

Основные математические соотношения, фундаментальные уравнения, нелинейная механика напряженно-деформированного тела, положена в основу реализации метода конечных элементов для решения задач моделирования процессов резания, основывается на ряде таких фундаментальных законов и уравнений:

1. Закон сохранения массы.
2. Закон сохранения энергии.
3. Закон сохранения количества движения.
4. Уравнение равновесия.
5. Закон теплопроводности Фурье.
6. Уравнения связи «перемещение - деформации».
7. Уравнения связи напряжений и деформаций тел.

В дополнение к перечисленным фундаментальным законам важным является требование непрерывности деформаций в пределах одного тела, называется условием совместности деформаций. Вычисление напряженно-деформированного состояния, ввиду важности основного вычислительного цикла, рассмотрим как математическое описание. Закон сохранения массы выражается уравнением,

$$\rho J = \rho_0 \quad (3.1)$$

где $J = \det(F)$ - якобиан, который численно равен относительному объему в данный момент времени; ρ, ρ_0 - соответственно действительная и начальная плотность материала; $F = \frac{\partial x_i}{\partial X_j}$ - градиент движения.

Закон сохранения энергии при отсутствии теплопроводности и тепловых источников может быть записан уравнением:

$$\rho_0 \dot{w}^{ai} = \dot{F} \sigma \quad (3.2)$$

где \dot{F} - скорость градиента движения.

Приведенное уравнение показывает, что скорость изменения внутренней энергии (внутренняя мощность) равна скорости градиента движения, умноженного на номинальное напряжение. Это уравнение при расчете изотермических и адиабатических процессов используется только для определения глобального энергетического баланса, в то время как в общем случае теплопроводности определяет мощность тепловых источников. Закон сохранения количества движения (уравнение движения) можно записать в виде :

$$\rho \ddot{u}_i = \rho f_i + \sigma_{ij,j}, \quad (3.3)$$

где f_i - плотность объемных сил; $\sigma_{ij,j}$ - частные производные компонента тензора напряжений Коши σ_{ij} .

Из условия равновесия следует:

$$f = f_{load} + f_{contact} - I \quad (3.4)$$

где f_{load} - сводные объемные и внешние силы, действующие на тело;

$f_{contact}$ - сводные силы на контактной границе тела I - внутренние силы.

Граничные условия математически формулируются в виде:

- в силах на границе тела ;

$$\sigma_{ij} \cdot n_i = P(\tau); \quad (3.5)$$

- в перемещениях на границе тела ;

$$u = U \quad ;(3.6)$$

- в силах на контактной границе

$$(\sigma^+ - \sigma^-)n = 0 \text{ при } u^+ = u^-; \quad (3.7)$$

Основываясь на указанных фундаментальных уравнениях, численное вычисления перемещений индивидуальных частиц твердого тела может быть выполнено с помощью такой итерационной процедуры явного интегрирования уравнения движения (3.3) по времени на основе МКЭ.

Пусть в начальный момент времени во всех моделируемых точках, тела,

$$\ddot{u}|_{\tau=0} = 0; \dot{u}|_{\tau=0} = 0; u|_{\tau=0} = 0; f_{load}|_{\tau=0} = 0; f_{contact}|_{\tau=0} = 0; I|_{\tau=0} = 0; \varepsilon_{ij}^p|_{\tau=0} = 0, \quad (3.8)$$

где u - перемещение узлов.

Найдем перемещение узлов тела через определенный бесконечно малый промежуток времени $\Delta\tau$. Для этого зададим кинематические граничные условия и нагрузки, определенные по условиям задачи в данный момент времени:

$$\ddot{u}|_{\tau} = \ddot{U}(\tau), \dot{u}|_{\tau} = \dot{U}(\tau), u|_{\tau} = U(\tau), f_{load}|_{\tau} = P(\tau). \quad (3.9)$$

По уравнению (3.3) вычислим вектор ускорений частиц тела в узлах:

$$\ddot{u}_i|_{\tau} = (M_{ij}^{-1}) \left(f_{load_i}|_{\tau} + f_{contact_i}|_{\tau} - I_i|_{\tau} \right), \quad (3.10)$$

где M_{ij} - матрица масс.

Далее вычисляем вектор скоростей в узлах, выполняя интеграцию методом центральных разниц:

$$\dot{u}_i \Big|_{\tau + \frac{\Delta\tau}{2}} = \dot{u}_i \Big|_{\tau - \frac{\Delta\tau}{2}} + \Delta\tau \ddot{u}_i \Big|_{\tau}. \quad (3.11)$$

Действуя аналогично, вычисляем вектор перемещений узлов тела:

$$u \Big|_{\tau + \Delta\tau} = u \Big|_{\tau} + \Delta\tau \dot{u} \Big|_{\tau + \frac{\Delta\tau}{2}}. \quad (3.12)$$

Очевидно, что перемещение частей тела вызывают силовую реакцию с боку этого тела в виде внутренних сил, которые пока остаются неизвестными. Для их определения вычислим тензор скоростей деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} \Big|_{\tau + \frac{\Delta\tau}{2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\dot{u}_i}{dx_j} + \frac{d\dot{u}_j}{dx_i} \right) \Big|_{\tau + \frac{\Delta\tau}{2}} \quad (3.13)$$

Выполняем декомпозицию:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p. \quad (3.14)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ - тензор скоростей упругих деформаций;

$\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ - тензор скоростей пластических деформаций.

Тогда увеличение любых составляющих деформаций:

$$d\varepsilon_{ij} \Big|_{\tau + \Delta\tau} = \Delta\tau \dot{\varepsilon}_{ij} \Big|_{\tau + \frac{\Delta\tau}{2}} \quad (3.15)$$

Размер любой составляющей деформации:

$$\varepsilon_{ij} \Big|_{\tau + \Delta\tau} = \varepsilon_{ij} \Big|_{\tau} + d\varepsilon_{ij} \Big|_{\tau + \Delta\tau} \quad (3.16)$$

Учитывая большие скорости деформации в зоне стружкообразования при практически применяемых скоростях резания [94] может быть принято предположение о адиабатический характер деформации.

Тогда температура, возникающая при такой деформации, может быть вычислена как:

$$T|_{\tau+\Delta\tau} = T|_{\tau} + \eta \frac{\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p}{\rho C_m} \Big|_{\tau} \Delta\tau \quad (3.17)$$

Применяя определяющие уравнения, уравнения состояния материала деформированного тела и условие текучести ($\bar{\sigma} = \sigma_s$), вычисляем напряжение в точках интегрирования КЭ:

$$\sigma_{ij}|_{\tau+\Delta\tau} = F\left(\sigma_{ij}|_{\tau}, \varepsilon_{ij}|_{\tau+\Delta\tau}, \dot{\varepsilon}_{ij}|_{\tau+\Delta\tau}, T|_{\tau}\right) \quad (3.18)$$

и осуществляем составление внутренних сил в узлах $I|_{\tau+\Delta\tau} = I(\sigma_{ij}|_{\tau+\Delta\tau})$. Далее проверяется выполнение критерия разрушения в каждом КЭ заготовки. В случае удовлетворения критерия происходит удаление элемента из модели. Решение контактной задачи и определения нормальных сил на контактной поверхности выполняется в несколько этапов с использованием выбранной модели трения. Методом штрафов исчисляются нормальные силы на поверхности контакта. Затем по принятой модели трения исчисляются контактные напряжения и:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= f_{\sigma} \left(f_{contact}^n \right), \\ \tau_n &= \tau_{\max} \left(\sigma_n, \sigma_s \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

где σ_s - предел текучести обрабатываемого материала в прирезцовом слое стружки в текущем его состоянии. Прирезцовый слой образован материалом обрабатываемой заготовки в зоне пластической деформации. Но по сравнению со стружкой его состояние определяется не только явлениями, которые имеют место в стружке, но и явлениями в инструменте. На последнем этапе определяются плоские силы на поверхности контакта с вычисленными касательными напряжениями: $f_{contact}^{\tau} = f(\tau_n)$.

Далее настоящее время увеличивается на шаг интегрирования и вычисления повторяются. Следует отметить, что приведенная процедура интегрирования

уравнения движения является условно стабильной, поскольку обеспечивает получение результата лишь за CFL-условием (Куранта – Фредери – Леви) $\Delta\tau < \Delta\tau_{\max}$. Максимальный допустимый шаг интегрирования $\Delta\tau_{\max}$, определяется как минимальный допустимый шаг из всех конечных элементов модели, которые могут деформироваться.

$$\Delta\tau_{\max} = \min_i(\Delta\tau_{\max i}) \quad (3.20)$$

В общем случае точное значение $\Delta\tau_{\max}$ для отдельного конечного элемента вычислить невозможно. Поэтому на практике используют оценки $\Delta\tau_{\max}$, рассчитанные по приближенной формуле,

$$\Delta\tau_{\max} = L / c \quad (3.21)$$

где c - скорость звуковой волны в материале; L - характерный размер КЭ. Зависимости от размерности задачи и формы КЭ скорость звуковой волны и характерный размер КЭ оцениваются различными зависимостями:

- для 2D-задачи плоского деформированного состояния упругого тела ;

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (3.22)$$

- для 3D-задачи деформированного состояния упругого тела;

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (3.23)$$

- характерный размер плоского четырехугольного элемента может быть вычислений:

$$L = \frac{A}{\max(a_1, a_2, a_3, a_4)} \text{ или,}$$

$$L = \frac{A}{\max(D_1, D_2)}, \quad (3.24)$$

где a_i - длина стороны КЭ; D_i - длина диагонали КЭ A - площадь КЭ; E - модуль упругости; ν - коэффициент Пуассона; ρ - плотность;

- характерный размер плоского четырехугольного элемента может быть вычислений,

$$L = \frac{F_e}{A_{\max}} \quad (3.25)$$

где F_e - объем восьмиузлового пространственного КЭ; A_{\max} - площадь его наибольшей грани.

3.5 Создание CAD – модели

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. 3.7) и заготовки ВПКМ (см. рис. 3.6). 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.

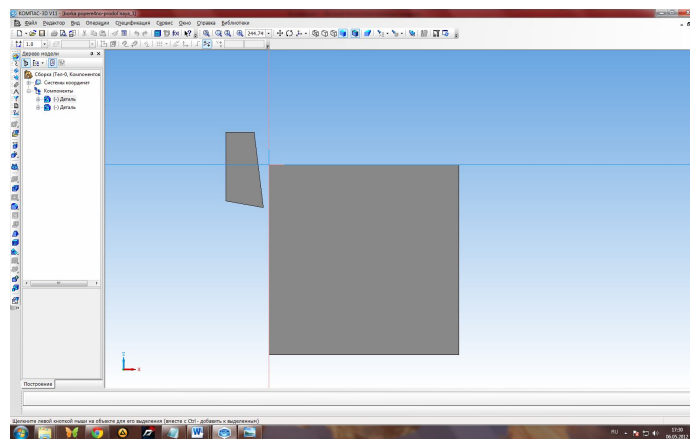


Рисунок 3.6 – Создание CAD- модели с помощью САПР Компас 3D

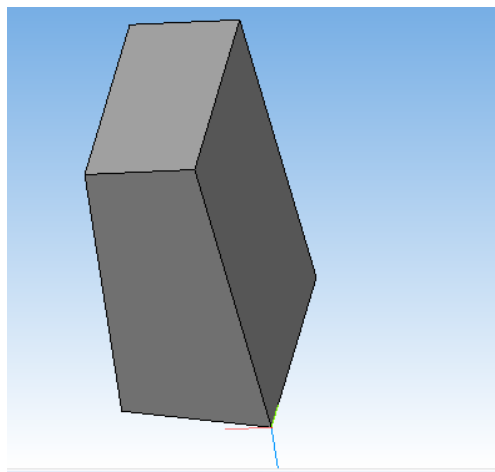


Рисунок 3.7 – Трехмерная модель режущего клина

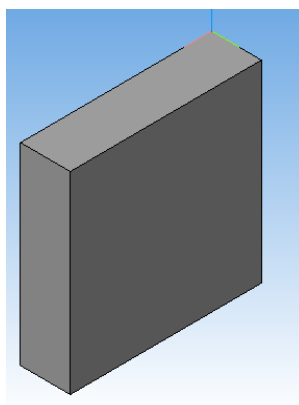


Рисунок 3.8 - Трехмерная модель ВПКМ

3.6 Создание конечно – элементной сетки. Выбор типа конечного элемента

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 квадратурной точками (точками интегрирования). Конечно-

элементная модель допускает, что напряжения и деформации могут действовать и вне данного конечным элементом (см. рис.3.9).

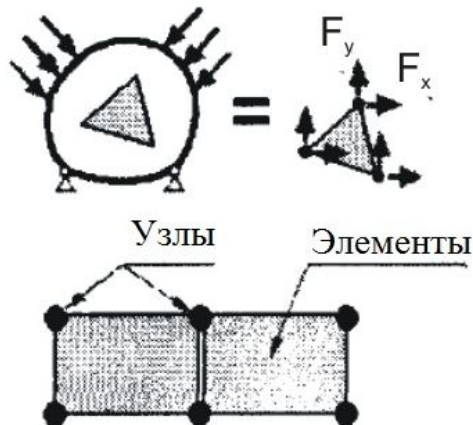


Рисунок 3.9 – Иллюстрация концепции метода конечных элементов [336]

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 приведены на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 - Конечные элементы реализованные в программе LS- DYNA

Сюда относятся дискретные пружины, амортизаторы и балочные элементы, мембранные элементы, оболочковые толстостенные и тонкостенные элементы, элементы-бруски и т.д.. Важной особенностью этих элементов является их реализация в деформированной и недеформированной формах - в виде абсолютно твердого тела (rigid body). К такому твердого тела можно присоединить другие узлы, сосредоточенные массы, пружины и амортизаторы. Пружины и амортизаторы могут иметь поступательные или вращательные степени свободы. Имеется возможность 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. 3.11).

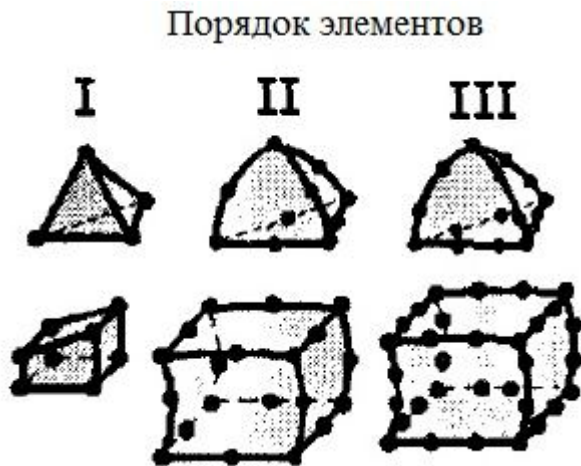


Рисунок 3.11– Порядок конечных элементов

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 [1237]. В связи с такими ограничениями наиболее используемыми типами элементов является 4 - узловой мембранный элемент и 8-узловой объемный элемент (элемент-брус). 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 квадратурными 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.3.12) и построение упорядоченной сетки (см. рис.3.12, 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 (см. рис.3.12).

Произвольная решетка строится путем деления геометрических элементов модели на некоторое количество частей определенной геометрической формы, причем соседние элементы мало отличаются друг от друга по форме (рис.3.6б). 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.

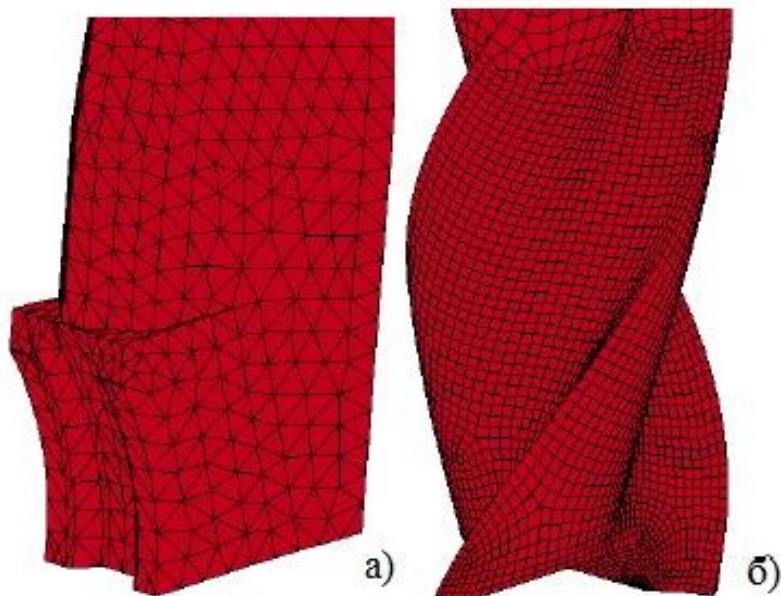


Рисунок. 3.12 – Примеры реализации произвольной (а) и упорядоченной (б) конечно – элементной сетки

Очевидно, что чем меньше линейный размер конечного элемента Le , 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 [1648].

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 часта 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 элемен-

тов 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. Novel 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. [71] При создании КЭ - сетки размер ячейки следует выбирать равным наименьшему элементу модели, в нашем случае, поскольку диаметр карбоно-

вых 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. 3.13. 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.

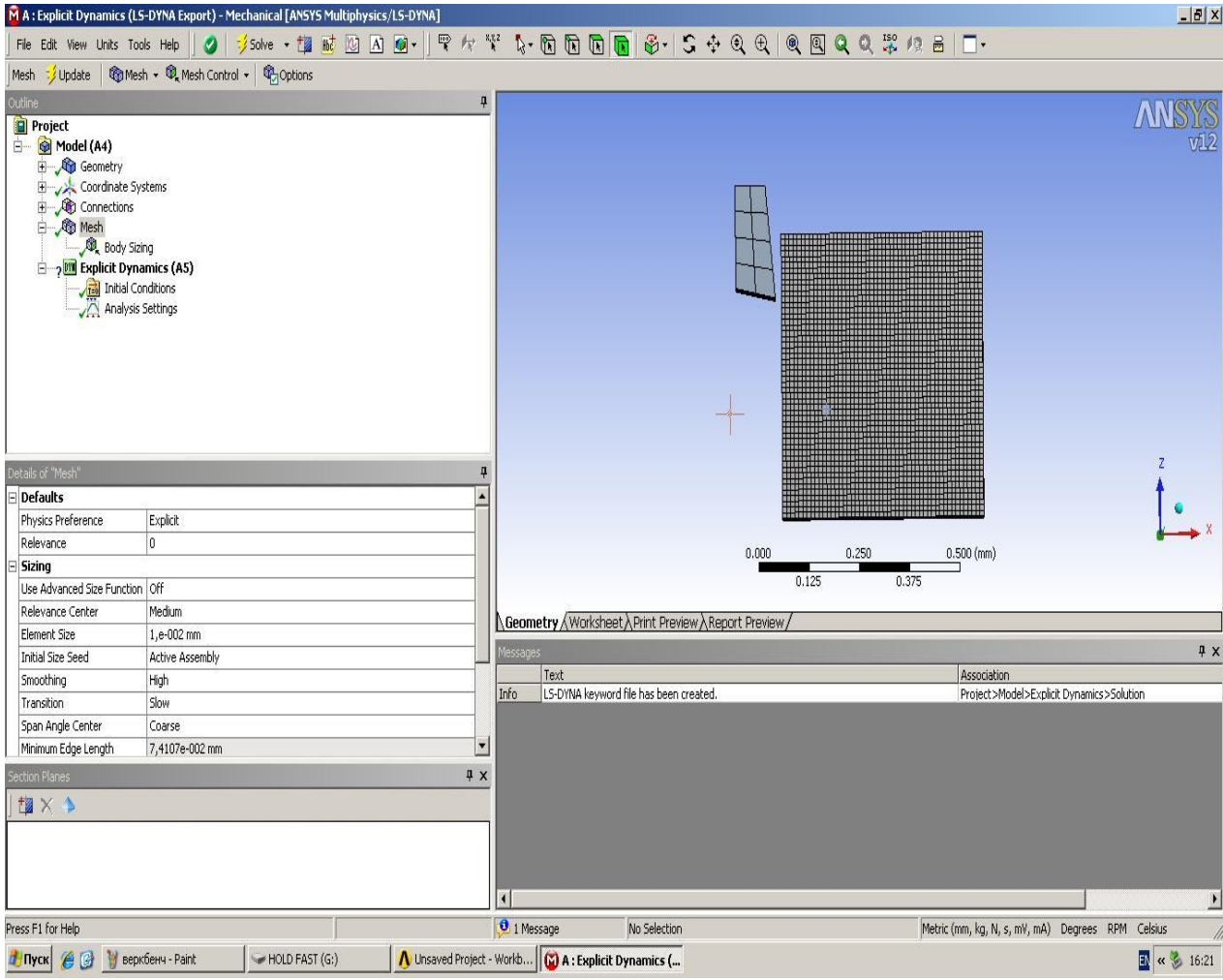


Рисунок 3.13 - Создание КЭ сетки

Созданная в ANSYS V12 была импортирована в LS-DYNA LS-PrePost - 3.2 для последующий преобразований. Как показано на рис. 3.14 исходный объект был последовательно разделен на двухкомпонентный материал. Путем последовательного задания ряду конечных элементов свойств углеродного волокна. Так на рис. 3.14 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.

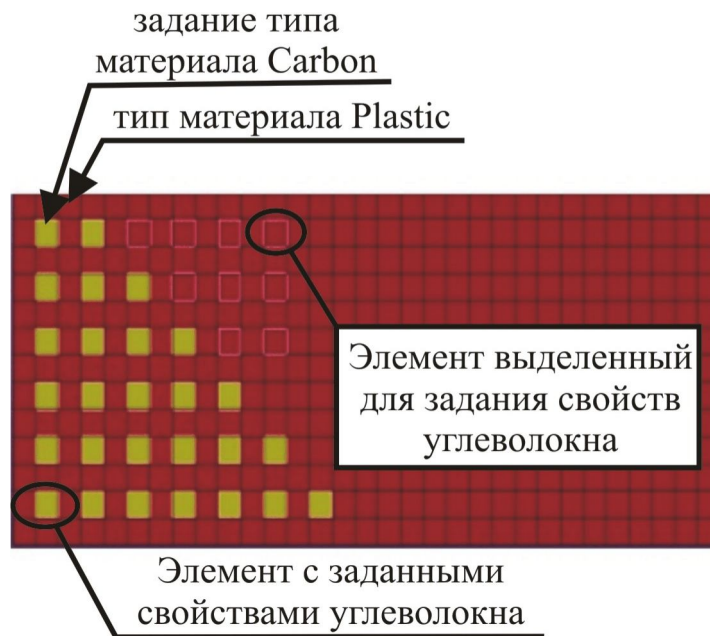


Рисунок 3.14 – Задание свойств углеволокна и матрицы группам КЭ

Описанная выше последовательность действий позволила получить совокупность рядов углеродного волокна и матрицы, как показано на рис. 3.15.

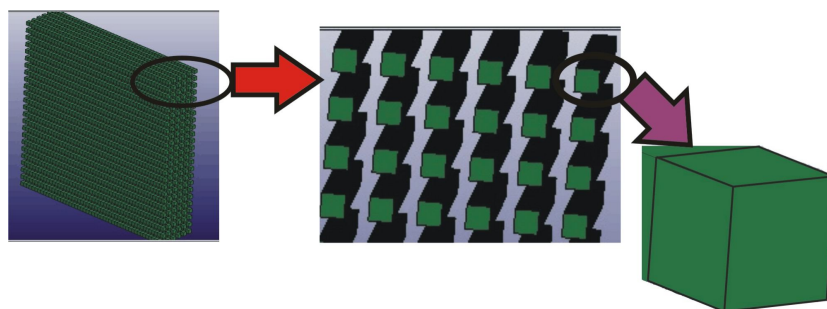


Рисунок 3.15– Структура конечно-элементной сетки

3.7 Определение механических свойств углеродного волокна и эпоксидной смолы

Общие физико-механические свойства материалов модели приняты в первом приближении равными справочным данным (см. табл. 3.2). Критерий разрушения для углеволокна $\sigma_1=2500\text{МПа}$ [95]. Упруго-пластическое поведение эпоксидной смолы определяли экспериментально путем испытания этого материала на сжатие по ГОСТ 25.503-97. 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 отверждения 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. Размеры образца: $\varnothing 43 \times 34$ мм были получены путем токарной обработки.

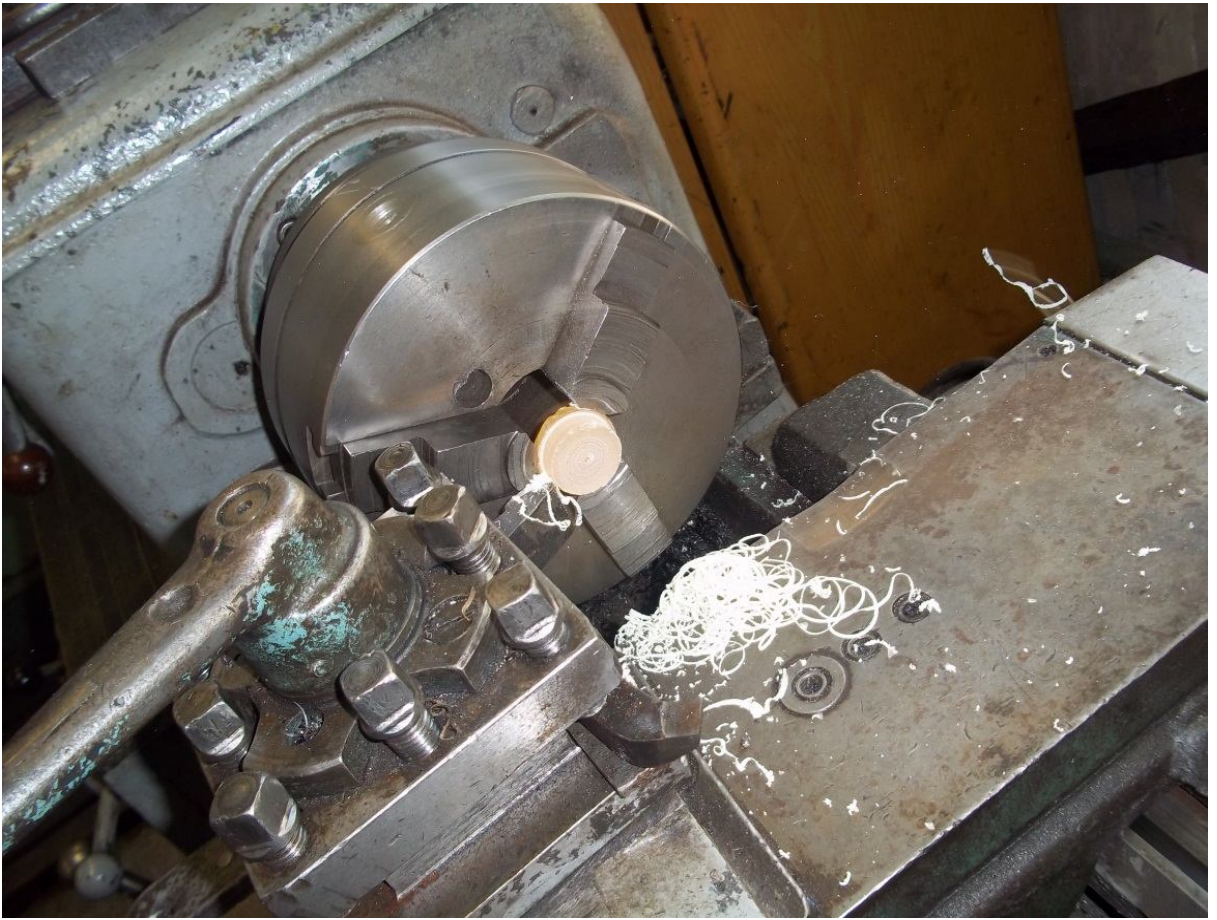


Рисунок 3.16 – Обработка образца застывшей эпоксидной смолы на токарном станке

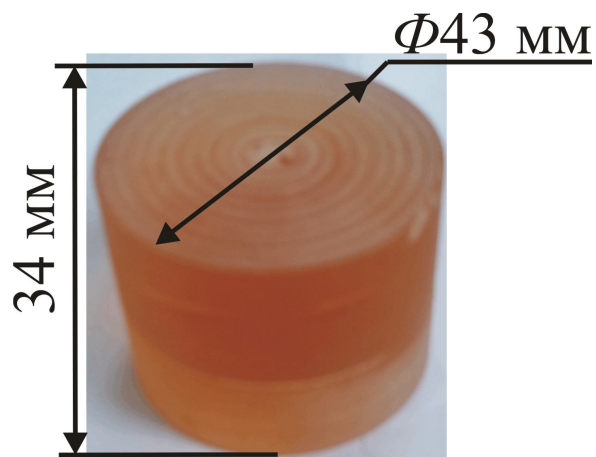


Рисунок 3.17 – Образец эпоксидной смолы

Определение механических свойств образца из эпоксидной смолы на сжатие проводились на универсальной испытательной машине Р-20 с максималь-

ной нагрузкой до 200 кН. На рис.3.18 представлена эта машина с основными исполнительными органами.

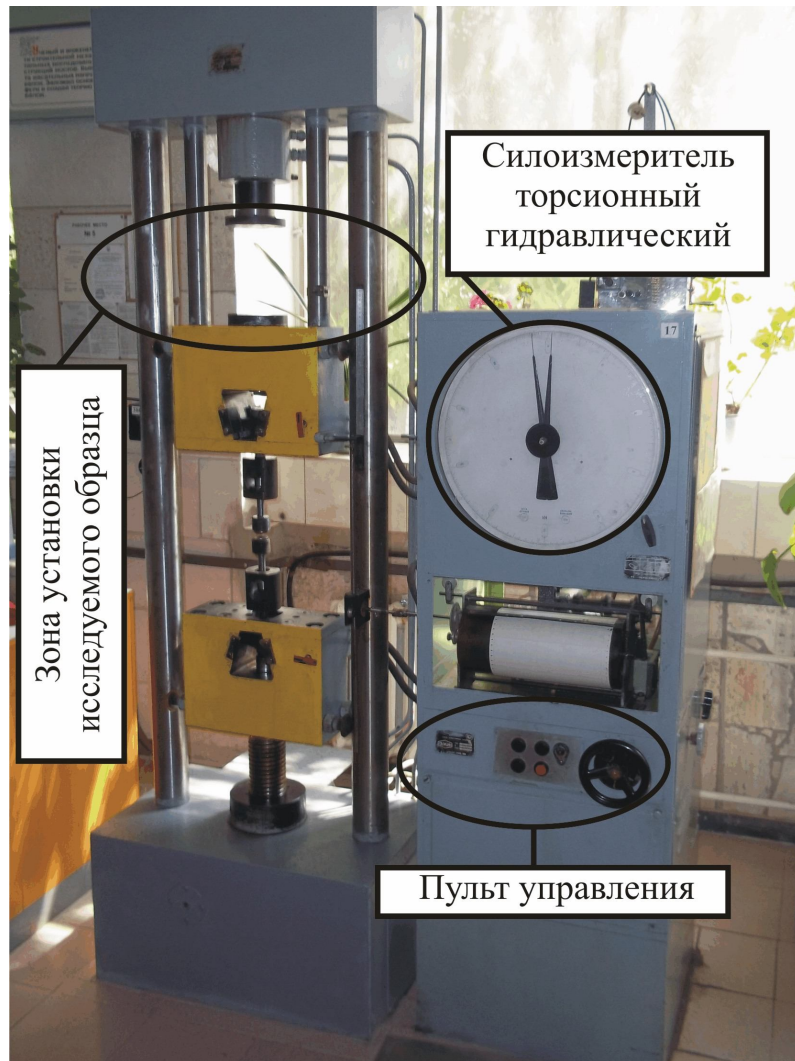


Рисунок 3.18 – Универсальная испытательная машина Р-20

В зону установки был помещен исследуемый образец, как это показано на рис. 3.18. 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.

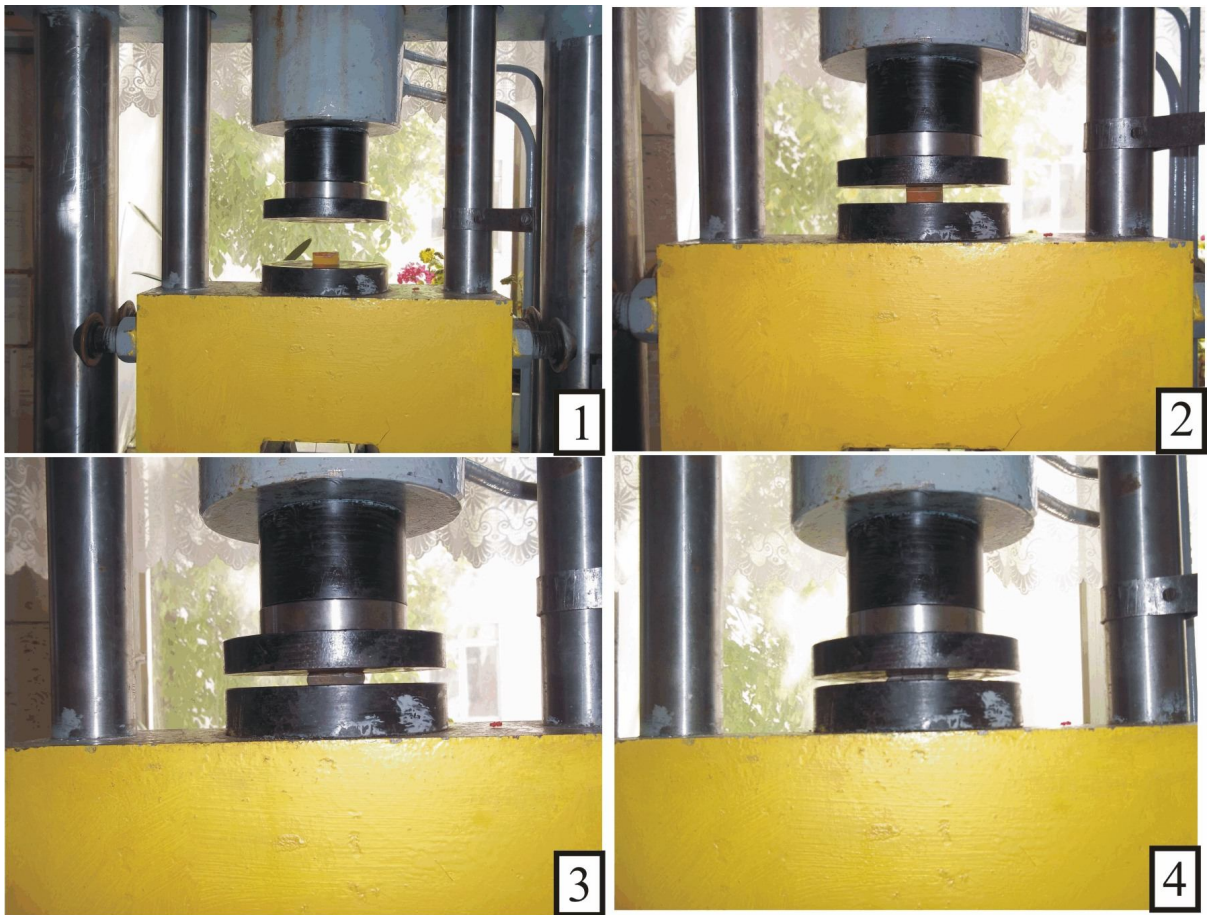


Рисунок 3.19 – Образец эпоксидной смолы, установленный на универсальной испытательной машине Р-20

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. 3.20), что образец начал пластически деформироваться при 44 кН, а при 152 кН на цилиндрической поверхности образовалась трещины, развитие которых привело к полному разрушению материала. Для возможности использования данных диаграммы испытаний и построения кривой упрочнения воспользуемся рекомендациями согласно ГОСТ 25.503.

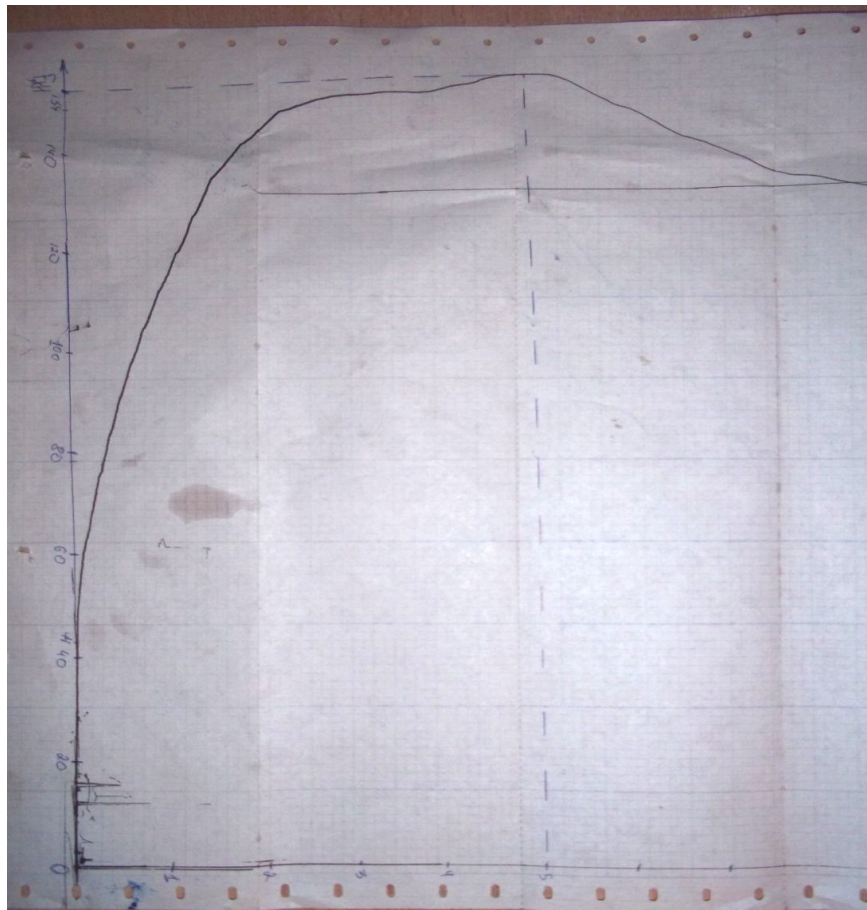


Рисунок 3.20 – Диаграмма испытаний эпоксидной смолы на сжатие

Кривую упрочнения строят в координатах: ордината - напряжение течения σ , абсцисса — логарифмическая деформация ε . Напряжение течения σ , МПа (кгс/мм²), рассчитывают по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3.26)$$

где F – осевая сжимающая нагрузка, Н;

A - площадь поперечного сечения, мм.

Логарифмическая деформация (укорочение), ε для образца рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_k}, \quad (3.27)$$

где h_0 – начальная высота образца;

h_k – высота образца при нагрузке.

Рассчитаем эти характеристики для равномерно расположенных восьми точек диаграммы испытаний:

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

Для проверки правильности данных построим график зависимости деформации от нагрузки (см. рис. 3.21).

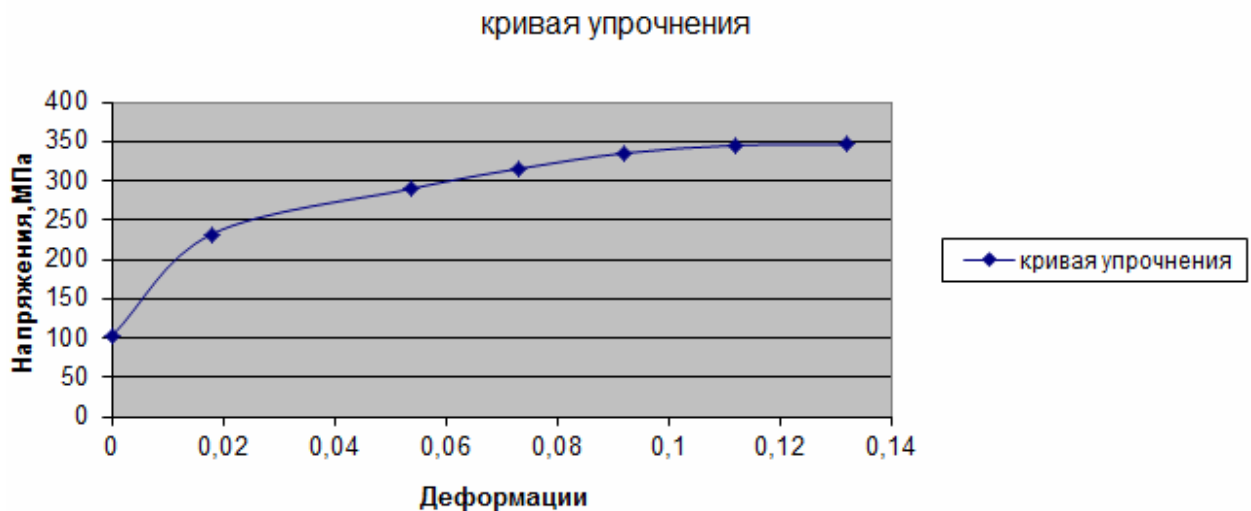


Рисунок 3.21 – Кривая упрочнения

Найденные точки необходимы для заполнения карты *PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.

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. 3.22).



Рисунок 3.22 – Испытательная машина Р-5

В результате проведенных испытаний на растяжение углеводного волокна была построена диаграмма (см. рис. 3.23).

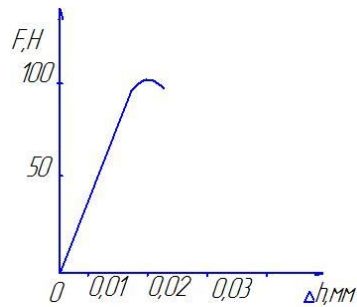


Рисунок 3.23 – Диаграмма испытаний углеволокна

Для определения критерия разрушения воспользуемся формулой:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3.28)$$

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.

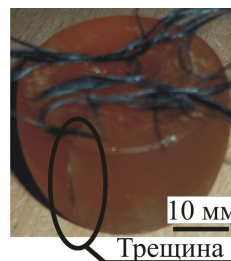


Рисунок 3.24 – Образцы после механических испытаний

Результаты экспериментов приведены в табл. 3.2 и табл. 3.3. и критерий разрушения для эпоксидной смолы - $\varepsilon_p=0.16$.

Таблица 3.2 - Физико-механические свойства материалов [95]

Наименование	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Матрица	1300	45	0,2
Волокно (углеволокно)	1900	422	0,3
Твердый сплав (Т30К4)	9800	350	0,23

Таблица 3.3 - Зависимость логарифмической деформации от напряжений течения

σ , МПа	102	232	290	315	335	345	346	348
ε_p	0	0,018	0,054	0,073	0,092	0,112	0,132	0,16

3.8 Начальные и граничные условия

Задание граничных условий - один из ответственных этапов конечно-элементного анализа. Так, например, в модели, показанной на рис. 3.25, графически изображены граничные условия в узлах А и В, 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.

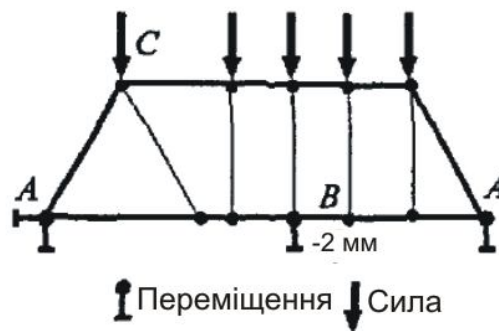


Рисунок 3.25 - Пример граничных условий

При этом перемещение (скорости или ускорения) могут приобретать как нулевых (в узле А), так и ненулевых (в узле В) значений. Существуют также граничные условия, при которых задается нагрузка (узел С) 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 на-

правления, 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, преимуществом 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. Как показано на

рис. 3.26 контактное взаимодействие было реализовано моделью *ERODING_SURFACE_TO_SURFACE:

Задаваемые параметры:

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

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

На основе анализа работ [82, 86] 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. 3.26 задаются модели материала, так например, для инструмента мы выбираем модель *RIGID, так как принимаем инструмент абсолютно твердым, не деформируемым телом. Задание таких характеристик обусловлено тем, что износ и термическим процессам в зоне резания будут предметом дальнейших исследований, а на данном этапе эти данные не являются критически важными.

1	MID	RO	E	PR	H	COUPLE	H	ALIAS
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 3.26 - Параметры ключевого слова *MAT_RIGID

Задаваемые параметры:

MID = 1- идентификатор детали;

TITLE = for tool - название идентификатора;

RO = 9800 кг/м³ – плотность материала инструмента (для твердосплавного инструмента);

$E = 420$ ГПа – модуль Юнга;

$PR = 0.3$ – коэффициент Пуассона.

Модель `*_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY` 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. В форме изображенной на рис. 3.27 проиллюстрировано задание модели материала `*PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY`. Для этой опции характерно задание соотношения между пластическими деформациями и пределом текучести.

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 3.27 - Параметры ключевого слова `*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY`

Задаваемые параметры:

MID - идентификатор детали;

TITLE - название идентификатора;

$RO = 15300$ кг/м³, 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. 3.28. Эта функция предназначена для описания поведения упругого материала. В ходе экспериментальных исследований углеродные волокна показали значительные упругие свойства. Исходя из этого, была выбрана данная модель для описания поведения волокнистого наполнителя в процессе резания. Обязательным является задание предела текучести.

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 3.28 - Параметры ключевого слова *MAT_ELASTIC

Задаваемые параметры:

MID - идентификатор детали;

TITLE - название идентификатора;

RO = 1400 кг/м³, плотность материала инструмента;

E = 45 МПа модуль Юнга;

PR = 0.23 коэффициент Пуассона;

Ключевое слово * 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. Ключевое сло-

во * BOUNDARY_SPC_SET отличается от предыдущего тем, что выполняет ограничения степеней свободы для нескольких узлов, обусловленных списком * SET_NODE. Поскольку количество узлов большое, то список удобно формировать выделением узлов прямоугольным параллелепипедом, заданным ключевым словом * DEFINE_BOX. При этом используют ключевое слово * SET_NODE_GENERAL с опцией «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 (см. рис. 3.29). На боковых границах заготовки было задано ограничение на перемещение по нормали к ней. Следующим шагом стало задание скорости движения инструмента. Используя параметр «LCID» ключевого слова *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.

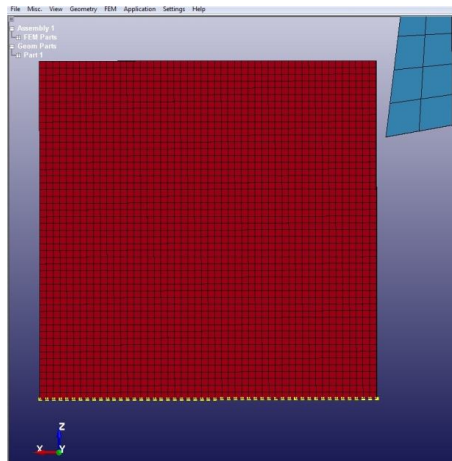


Рисунок 3.29 - Наложение граничных условий на заготовку с помощью опции «SPC»

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.

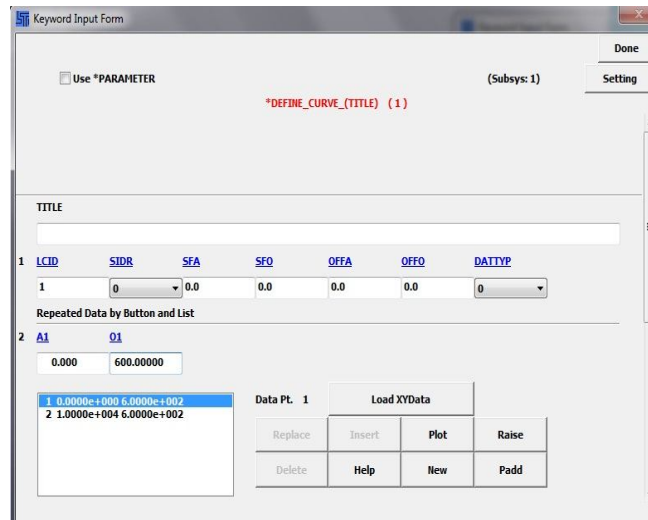


Рисунок 3.30 - Задание скорости режущего инструмента

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 сама, автоматически проводит расчет.

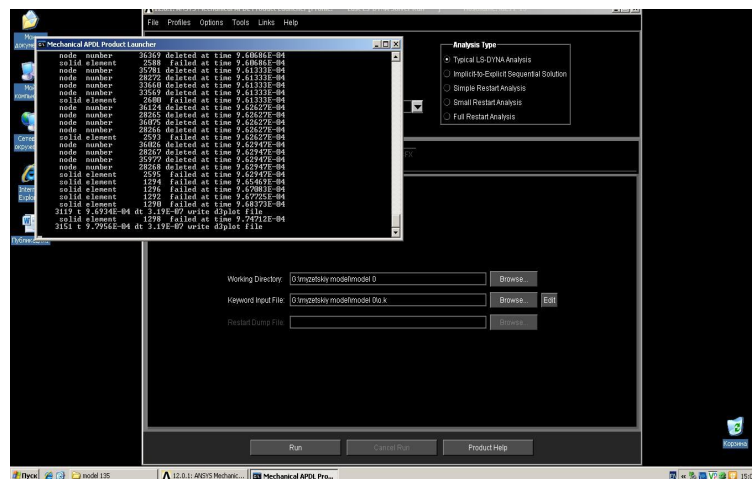


Рисунок 3.31 – Расчет моделей в системе конечно-элементного анализа LS-DYNA

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

3.9 Параметры решателя в LS-DYNA

Существование высокопроизводительных вычислительных средств, наличие необходимого математического и программного обеспечения позволяют считать математическое моделирование одним из наиболее эффективных способов оценки прочности, прогнозирования долговечности и оптимизации конструкций и технологических процессов производства, в основу которого положен процесс удара или взрыва. Одной из наиболее эффективных систем автоматизированного инженерного анализа (CAE-системой) есть программа LS-DYNA. LS-DYNA (компании LSTC) - многоцелевая программа, предназначенная для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопроводности, а также связанных задач - механики деформируемого твердого тела и теплопроводности, механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и газа. Программа была первой в своей области и стала основой для большинства современных пакетов высоконелинейного динамического анализа. В настоящее время LS-DYNA является одной из лучших коммерческих программ для решения задач столкновения, взрыва, обработки металлов давлением и ряда других задач. В программе LS-DYNA реализованы эффективные методы решения перечисленных задач, в том числе явный (explicit) и неявный (implicit) методы конечных элементов, многокомпонентная гидродинамика (Multimaterial Eulerian Hydrodynamics), вычислительная гидродинамика несжимаемых потоков, безсеточный метод сглаженных частиц (SPH - Smoothed Particle Hydrodynamics), безсеточный метод, основанный на методе Галеркина (EFG - Element Free Galerkin method) и т.д.. В LS-DYNA реализованы процедуры автоматической перестройки и сглаживания конечно-элементной сетки при вырождении элементов, произвольные Лагранжа - Эйлера сетки (ALE - Arbitrary Lagrangian-Eulerian), высокоэффективные алгоритмы решения контактных задач, широкий набор моделей материалов, возможности пользовательского программирова-

ния, а также процедуры лагранжевого - ейлерового связи и расчета многокомпонентных потоков сжатых сред на подвижных ейлеровых сетках. Код LS-DYNA оптимизирован под основные платформы и операционные системы, векторизовано, распаралелено для систем с общей (SMP) и распределенной памятью (MPP).

3.10 План виртуального эксперимента

Для определения механизма разрушения ВПКМ при обработке лезвийным инструментом при различных углах направленности волокон 0° , 45° , 90° , 135° . 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 3.4 - План виртуального эксперимента

$\rho, \text{мм}$	$V, \text{м/хв}$	$\theta, \text{град}$	$\gamma, \text{град}$	$\alpha, \text{град}$	Участки заготовки							
					1		2		3		4	
					$Pz_{min}, \text{Н}$	$Pz_{ма}, \text{х,Н}$	$Pz_{min}, \text{Н}$	$Pz_{ма}, \text{х,Н}$	$Pz_{min}, \text{Н}$	$Pz_{ма}, \text{х,Н}$	$Pz_{min}, \text{Н}$	$Pz_{ма}, \text{х,Н}$
0,05	30	0	7	10	0	10	10	160	160	180	-30	45
		45			0	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

3.11 Результаты виртуального эксперимента

На рис.3.32 проиллюстрирована работающая модель резания ВПКМ. 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.

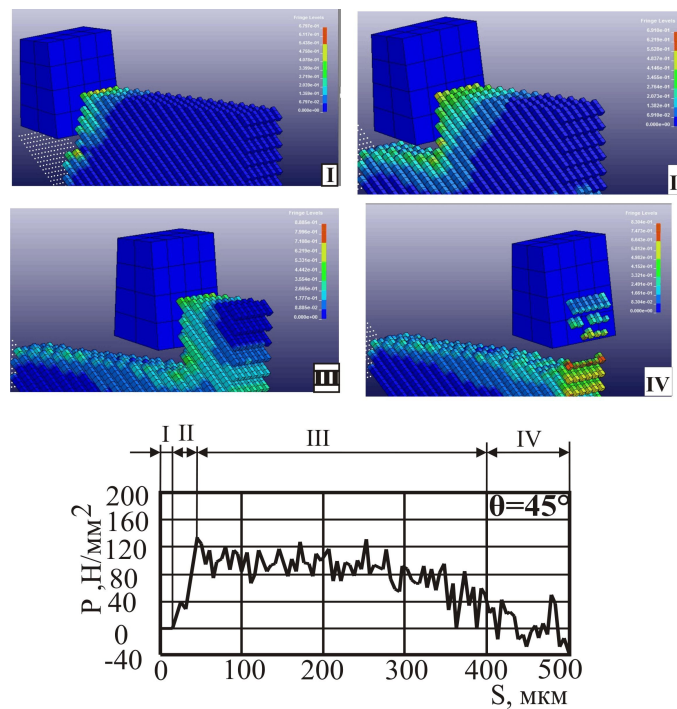


Рисунок 3.32 – Модель резания ВПКМ с углом направленности волокон 45°

3.12 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 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

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.

Источники погрешностей

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 от-

клонение, 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 пренебрежением 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.

4.1 Влияние направленности волокон на показатели качества обработанной поверхности

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 [96], 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 α - уровень значимости; n - количество опытов; \hat{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. На рис. 4.1 предложено сравнение результатов по этому параметру виртуального и натурального экспериментов.

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 [71].

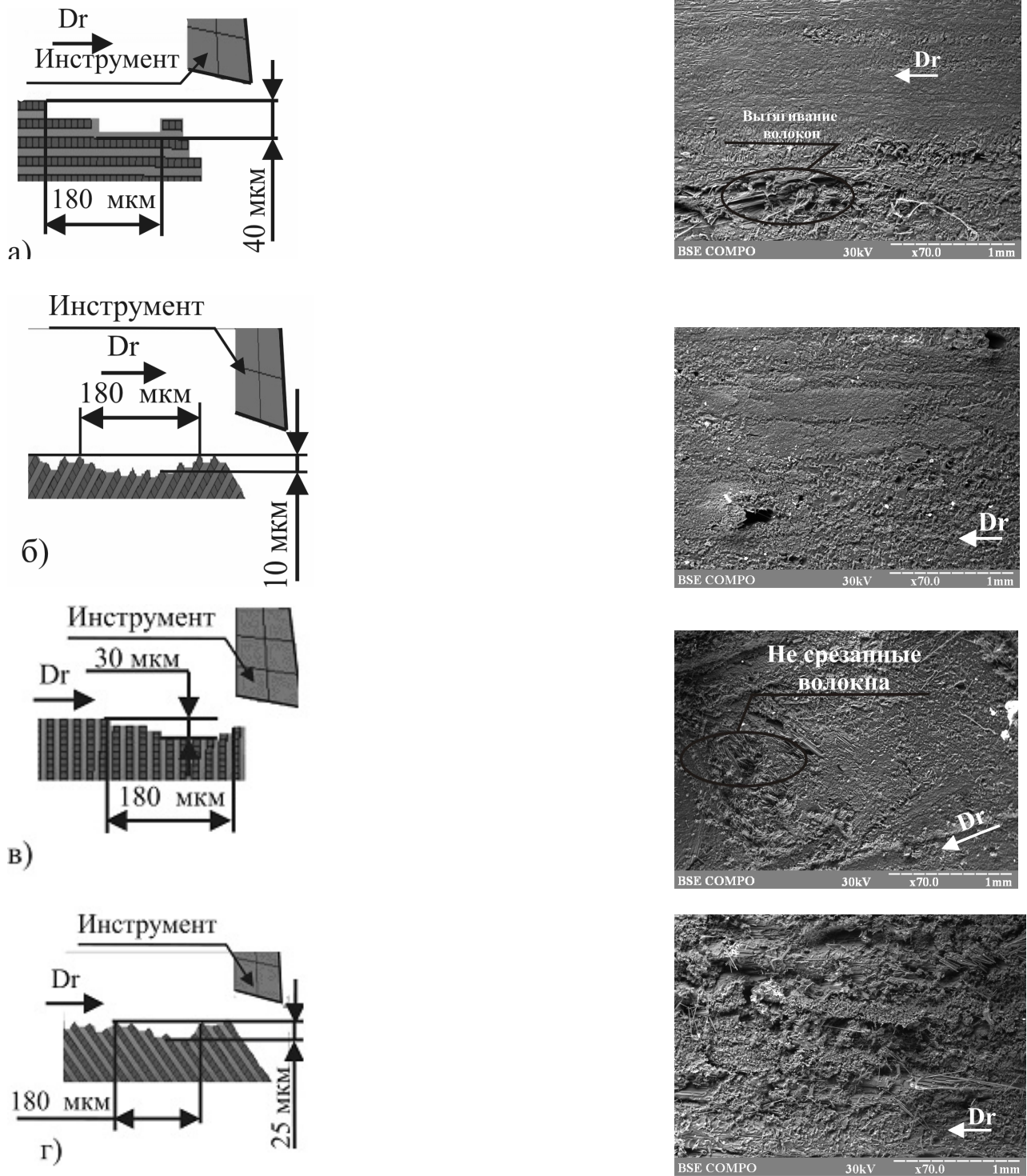


Рисунок 4.1 – Характер поверхностных повреждений ВПКМ (с лева - виртуальный эксперимент, справа – натурный эксперимент)

Процесс резания является процессом вероятностным. В каждом показателе процесса существует большая часть неопределенности. Среди основных факто-

ров, которые способствуют этому, следует назвать вибрации, возникающие практически при всех условий 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 α - 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; α - 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 вос-

произведения 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 [97]

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

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

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

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 [71]:

1. Определяют базовый комплекс условий обработки, для которых вычисляют погрешность прогнозирования, которая характеризуется исходными данными, x_i^0 - первая точка.
2. Задается малый прирост исходных данных Δx_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.4.2). 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. 4.3). 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.

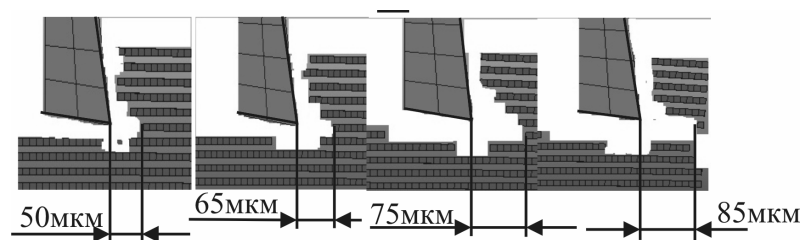


Рисунок 4.2 - Динамика формирования опережающей трещины при резании с $\theta=0^\circ$

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 нако-

пления повреждений до разрушения во втором случае больше, то и амплитуда изменения силы больше.

Виртуальные эксперименты показали, что стружкообразование сопровождается периодическим разрушением обработанной поверхности (рис. 4.5 и 4.6). Хотя период повреждений по всех случаях 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. 4.6).

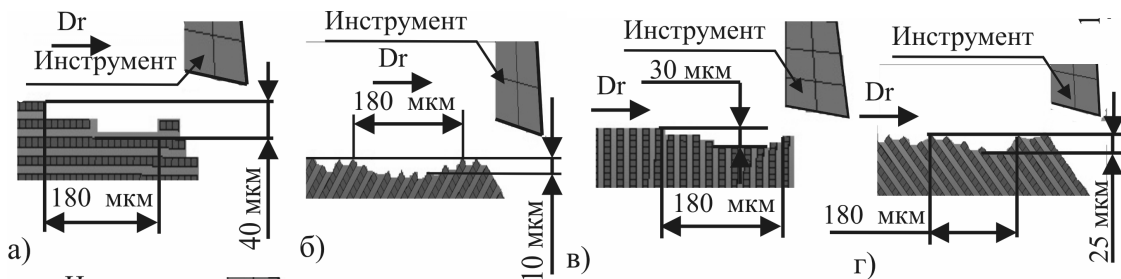


Рисунок 4.3 Повреждения поверхности в зависимости от угла направленности волокон: а - $\theta = 0^\circ$; б - $\theta = 45^\circ$; в - $\theta = 90^\circ$; г - $\theta = 135^\circ$.

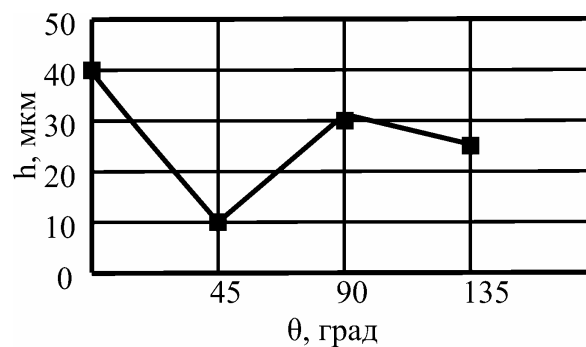


Рисунок 4.5 - Влияние угла направленности волокон θ на глубину повреждения поверхности h

Как уже упоминалось ранее направление укладки волокнистого наполнителя оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности. В п. 2.3 мы уже имели возможность ознакомиться с изображениями обработанной резанием поверхности ВПКМ. Помимо этих данных нам также удалось по-

лучить увеличенные изображения представленных на рис. 2.12. Возможности электронного микроскопа РЭМ 100У позволяют получать изображения высокой точности и разрешения. На рис. 4.6 представлена фотография поверхности ВПКМ с 200 кратным увеличением.

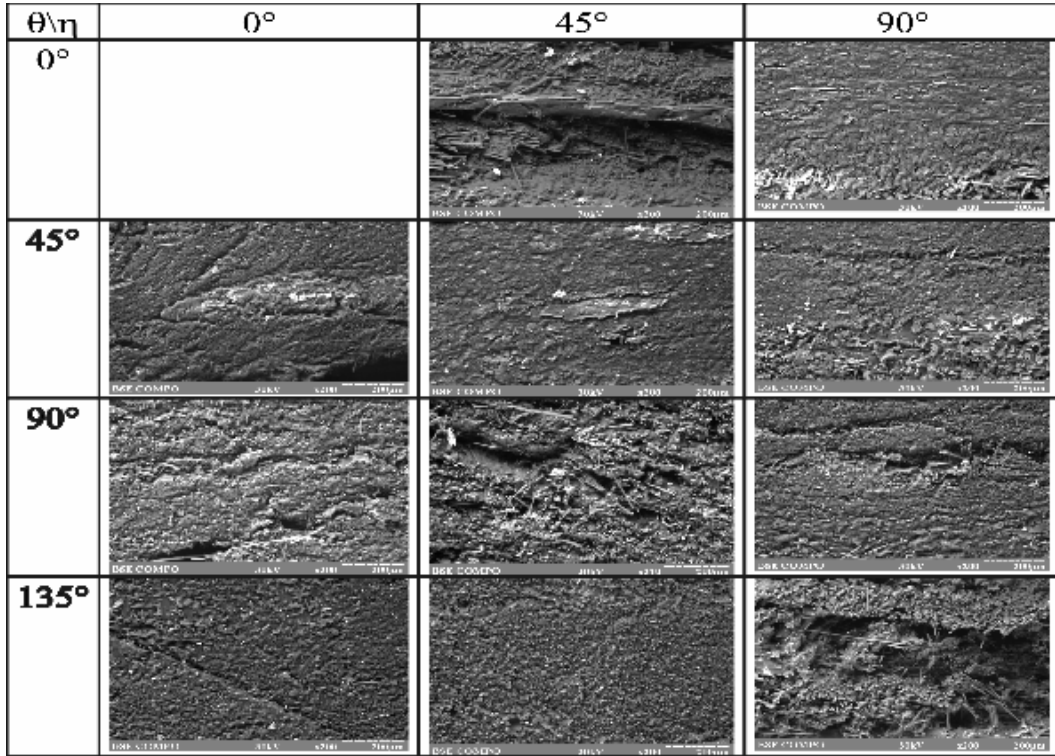
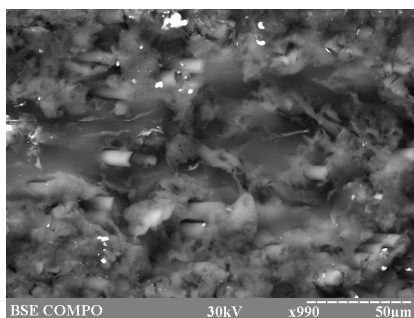
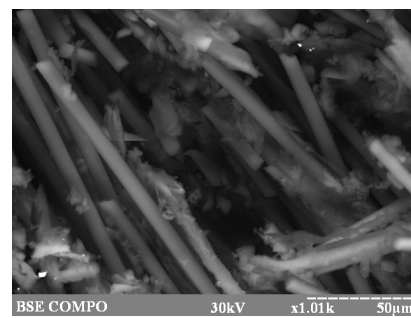


Рисунок 4.6 – Поверхности ВПКМ после процесса резания в 200 кратном увеличении

На фотографиях отчетливо видны вытягивание волокон и расслаивание. Наиболее интересные повреждения представлены на рис. 4.7 в 1000 кратном увеличении.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Тысячекратное увеличение поверхности ВПКМ с углом направленности волокон а) $\theta - 45^\circ$; б) $\theta - 90^\circ$

Анализ полученных изображения позволил составить сводный график повреждений обработанной резанием поверхности ВПКМ см. рис. 4.8



Рисунок 4.8 – График зависимости условных повреждений от угла направленности волокон θ°

Как видно из рис.4.8 наибольшие поверхностные повреждения удалось зафиксировать при обработке образца с углом направленности волокон 135° , а наименьшая при угле направленности волокон 45° .

4.2 Силы резания при обработке волокнистых полимерных композиционных материалов

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.4.9).

Влияние угла направленности волокон на среднюю силу резания в целом повторяют тенденции выявленные Calzada K, Nayak D. (сравните рис. 3.1 из раздела 3 с рис. 4.9). Настоящая модель не выявила значительных колебаний силы резания при $\theta = 90^\circ$, а значение силы при $\theta = 90^\circ$ оказалось примерно рав-

ным значению силы резания при $\theta = 0^\circ$. Все это может быть следствием различия принятых в исследовании свойств обрабатываемого материала.

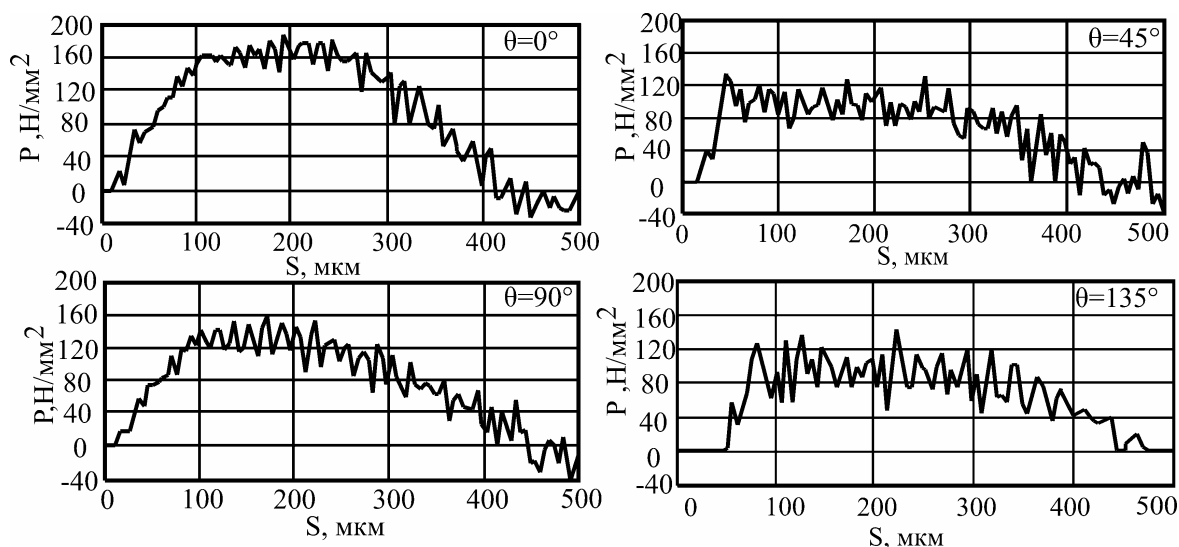


Рисунок 4.9 - Графики изменения удельной силы резания при различных углах направленности волокон ВПКМ

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° , а наименьшая глубина повреждения обработанной поверхности – при угле направленности волокон 45° . Создание ВПКМ с углом направленности волокон 135° на выходе инструмента из поверхностного слоя ВПКМ может обеспечить наименьшее повреждение кромки этого слоя и, тем самым, повысить качество обработанного изделия.

4.3 Анализ ошибок конечно – элементной модели и разработка рекомендаций по ее совершенствованию

Создание моделей всегда связано с определенными допущениями. Эти допущения являются следствием того, что в момент создания конечно - элементной модели проектировщиками было принято решение об упрощении некоторых аспектов модели. Этому, безусловно, может быть много причин, от желания оптимизировать расчет и повысить скорость решения поставленной задачи до не знания или не возможности описать некоторые свойства или особенности объекта исследования. В нашем случае принятые допущения являются следствием стремления оптимизировать процесс расчета и уменьшить время решения задачи. Нами были приняты допущения по заданию структуры композиционного материала. Также были приняты допущения при задании контактного взаимодействия между волокном и матрицей.

4.3.1 Рекомендации по совершенствованию конечно – элементной модели прямоугольного резания композиционного материал

Описываемы ниже рекомендации будут касаться следующего этапа развития созданной конечно – элементной модели.

Первым направлением совершенствования существующей модели можно считать улучшение задания структуры обрабатываемого материала. Эти улучшения должны коснуться, прежде всего, задания контактного или адгезионного взаимодействия между компонентами композиционного материала. А именно волокна и связки (матрицы). Усилия по совершенствованию этого аспекта модели будут направлены на то, что бы добиться существования связи на границе раздела волокно/матрица. В настоящей модели этим условием нам пришлось пренебречь. Уста-

новление контактного взаимодействия между волокном и матрицей позволит получить более точный прогноз силы резания и качества поверхности. Также наличие подобного контакта между компонентами ВПКМ является важным при прогнозировании износа инструмента. Данное утверждение обосновано тем, что разрушение связей между волокном и матрицей будет оттягивать на себя, пусть и не значительные, ресурсы инструмента. Что, в конечном счете, даст более точные сведения о стойкости режущего инструмента.

Как уже упоминалось ранее, наличие адгезионного взаимодействия между волокном и матрицей может сказаться на прогнозе качества обработанной поверхности. В частности наличие подобного взаимодействия между компонентами материала позволит сделать более точный прогноз образования поверхностных повреждений, а именно трещин и расслаивания. Также появится возможность более точно узнать параметры этих повреждений: глубину и протяженность.

Одним из возможных аспектов улучшения существующей модели резания, является прогнозирование износа инструмента. Программный пакет LS-DYNA, предоставляет возможность по прогнозированию износа инструмента. При помощи опции MAT_ELASTIC, возможно определение напряжений возникающих в инструменте в процессе обработки. Наличие этих данных может быть ценной информацией при проектировании режущего инструмента для обработки композиционных материалов.

Данная КЭ модель представляет собой пример решения механической задачи. Но, как известно, процесс механической обработки является комплексными и сочетает в себе не только механические процессы, как то деформирование и отделение обрабатываемого материала под воздействием внешних сил с последующим образованием стружки, но и термические процессы. В частности нагрев, как обрабатываемого материала, так и инструментального. В этой связи мы считаем важным, в дальнейшем, исследовать и этот аспект механической обработки композиционных материалов. Программный пакет LS-DYNA предоставляет такие возможности. Для решения термомеханической задачи необходимо задавать дополнительный алгоритм с опцией «THERMAL». Если необходимо учесть влияние темпера-

туры, например на коэффициент трения, необходимо «_THERMAL_FRICTION» с ключевым словом *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE. Следует отметить, что при решении термомеханической задачи тепло, об-ся в результате пластической деформации, будет исчисляться автоматически (см. далее параметр «FWORK» ключевого слова* CONTROL_THERMAL_SOLVER). тепло, образующегося в результате трения на контак-тний границы, также будет исчисляться ав-тически, если задать параметр«FRCENG» = 1 в карте CONTROL_CONTACT

Существующая конечно- элементная модель может быть использована при прогнозировании сил резания и качества обрабатываемой поверхности при сверлении пакетов «ВПКМ – металл». Для того, чтобы это стало возможным необходимо провести некоторые усовершенствования существующей модели. Необходимо выполнить добавление слоя металла. Выполнение этого условия в сочетании с выше упомянутыми усовершенствованиями позволят повысить соответствие КЭ модели реальным процессам обработки пакетов.

4.4 Выводы

1. Анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований показал, что угол направленности волокон влияет на среднюю величину силы резания, 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 η , на боковой поверхности от-верстия они зависят от угла θ . Наименьшее повреждение наблюдаются при $\theta=45^\circ$ и $\eta=90^\circ$.

3. Сравнение модели процесса резания с экспериментальными данным показало необходимость ее усовершенствования в следующих направлениях:

- учет сил адгезии волокна с матрицей;
- уточнение коэффициента трения волокна и матрицы с твердым сплавом;
- расширение модели на резание разнонаправленных ВПКМ;
- расширение модели на 3D процесс сверления с учетом схода и пакетирования стружки

ВЫВОДЫ

1. Разработана методом конечных элементов микромеханическая 3D-модель процесса стружкообразования в главной секущей плоскости при сверлении однонаправленных волокнистых композиционных материалов. В модели учтено изменение направления волокна относительно режущей кромки в двух плоскостях путем варьирования углами θ и η .

2. Разработана методика подготовки образцов и проведения эксперимента по прямоугольному резанию однонаправленного ВПКМ с углами θ от 0 до 135° и η от 0 до 90° . Сопоставление результатов эксперимента с результатами моделирования в тех же условиях подтвердило работоспособность модели.

3. Анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований показал, что угол направленности волокон влияет на среднюю величину силы резания, амплитуду ее колебаний. Наибольшее значение силы резания наблюдается при $\theta=0^\circ$, а наименьшее значение силы резания зафиксировано при $\theta=45^\circ, 135^\circ$.

4. Повреждение обработанной поверхности также зависит от ориентации волокон. На торцевой плоскости они зависят от угла η , на боковой поверхности отверстия они зависят от угла θ . Наименьшее повреждение наблюдается при $\theta=45^\circ$ и $\eta=90^\circ$.

5. Сравнение модели процесса резания с экспериментальными данными показало необходимость ее совершенствования в следующих направлениях:

- учет сил адгезии волокна с матрицей;
- уточнение коэффициента трения волокна и матрицы с твердым сплавом;
- расширение модели на резание разнонаправленных ВПКМ;
- расширение модели на 3D процесс сверления с учетом схода и пакетирования стружки.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Sheikh-Ahmad J. Y. Machining of Polymer Composites. -: Technology & Engineering, 2008. -230 с.
2. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates//International Journal of Machine Tools & Manufacture. -2009. -№ 49. -С. 1185- 1196.
3. Rodriguez C. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. -Kassel: Kassel University press, 2009. -205 с.
4. Внуков Ю. Н., Залогов В. А. ЗНОШУВАННЯ І СТІЙКІСТЬ РІЗАЛЬНИХ ЛЕЗОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ. -Сумы: СумГУ, 2010. -245 с.
5. Marques A. T., Durão L. M., Magalhães A. G., Tavares J. M. Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates//16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS. -Porto, 2007. -С. 1- 10.
6. Davim J. P. Machining of composite materials. -London: Wiley, 2010. -262 с.
7. 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. -Ecole, 2003. -166 с.
8. Iliescu D. Approches experimentale et numerique de l'usinage a sec des composites carbone/эроху: Дисс. канд. техн. наук:05.03.01. -Paris, 2008. -219 с.
9. Girot F. High-speed abrasive milling of ceramic matrix composite materials//Conference franco-allemande sur l'usinage grande vitesse. -Metz, 1997. -С. 351- 356.
10. Rawat S., Attia H. Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites//Wear. -2009. -№ 267. -С. 1022- 1030.
11. Reimann W. Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen bei hohen schnittgeschwindigkeiten//Technische Mitteilungen. -: Organ der Haus der Technik, 1988. -Т. 81. -С. 240- 243.

12. Faria P. E., CAMPOS-RUBIO J. C., ABRAO A. M. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite//Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES. -2009. -Т. 28, № 19. -С. 2353- 2364.
13. Malhotra S. K. Some studies on drilling of fibrous composites//Journal of Materials Processing Technology. -1990. -Т. 24. -С. 291- 300.
14. Shinsaku H., Fujiwara J., Nomura M. Tool Wear Mechanism in Cutting of CFRP [in Japanese]//Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. -1994. -Т. 60, № 569. -С. 297- 302.
15. Inoue H. , Aoyama E., Hirogaski T. и др. Influence of tool wear on internal damage in small diameter drilling in GFRP//Composite Structures. -1997. -Т. 39. -С. 55- 62.
16. Kim D., Ramulu M. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks//Composite Structures. -2004. -№ 63. -С. 101 - 114.
17. Lin S. C., Chen I. K. Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed//Wear. -1996. -С. 156- 162.
18. Kim D., Kwon P. Evaluation of Advanced Cutting Tool Materials for Drilling Composite/Metal Stacks//Washington State University. -Vancouver, 2008. -С. 1- 20.
19. Klocke F., Wurtz C. PCD in machining of fibre-reinforced materials//Industrial Diamond Review (IDR). -1999. -Т. 59. -С. 65- 70.
20. Murphy C., Byrne G., Gilchrist M. D. The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part B: Journal of Engineering Manufacture). -2002. -Т. 216, № 2. -С. 143- 152.
21. Fernandes M. Intelligent automated drilling and reaming of carbon composites: Дисс. канд. техн. наук:05.03.01. -University of Wollongong, 2005. -195 с.
22. Zhang H., Chen W., Chen D., Zhang L. Assessment of the exit defects in carbon fiber - reinforced plastic plates caused by drilling//Key Engineering Materials. -2001. -Т. 196. -С. 43- 52.
23. Ozaki M. Supervisory Control of Drilling of Composite Materials: Дисс. .канд. техн. наук:05.03.01. -BERKELEY, 2000. -139 с.

24. Garrick R. Drilling Advanced Aircraft Structures with PCD (Poly-Crystalline Diamond) Drills//SAE International. - Utah U.S.A, 2007. -С. 1- 9.
25. Sedlacek J. , Slany M. ANALYSIS OF DELAMINATION IN DRILLING OF COMPOSITE MATERIALS// Science Journal. -2010. -№ 6. -С. 194- 197.
26. Chen W. Some experimental investigations in the drilling of Carbon Fibre-Reinforced Plastic (CFRP) composite laminates//Int. J. of Machine tools & Manufacture. -1997. -Т. 7. -С. 1097 - 1108.
27. Tsao C. C., Hocheng H. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material// Int. J. of Machine tools & Manufacture. -2004. -Т. 44. -С. 1085- 1090.
28. Tsao C. C., Hocheng H. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill//International Journal of Machine Tools & Manufacture. -2005. -№ 45. -С. 1261 - 1270.
29. Hocheng H., Tsao C. C. Computerized Tomography and C- scan for Measuring Drilling-Induced Delamination in Composite Material Using Twist Drill and Core Drill//Engineering Materials. - 2007. -№ 339. -С. 16- 20.
30. Tagliaferri V., Caprino G., Diterlizzi A. Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites// Int. J. of Machine tools & Manufacture. -1990. -Вып. 1. -Т. 30. -С. 77- 84.
31. Davim J. P. Drilling of composite materials. -New York: Nova Science Publishers, 2009. -179 с.
32. Durão L. M. MACHINING OF HYBRID COMPOSITES: Дисс. канд. техн. наук: 05.03.01. -Porto, 2005. - 242 с.
33. Jain S., Yang D. C. Delamination-Free Drilling of Composite Laminates//Journal of Engineering for Industry: Trans. of ASME. -1994. -Вып. 116. - С. 75- 481.
34. Singh I., Nayak D., Saxena R., Bhatnagar N. Drilling Induced Damage in FRP Composite Laminates//IE(I) Journal-MM. -2004. -Т. 85. -С. 37- 40.
35. ABRAO A. M., Faria P. E. и др.и др. Drilling of fiber reinforced plastics: A review//Journal of Materials Processing Technology. -2007. -Т. 186. -С. 1- 7.

36. Tsao C. C. The effect of pilot hole on delamination when core drill drilling composite materials//Int. J. of Machine tools & Manufacture. -2006. -№ 46. -C. 1653- 1661.
37. Tsao C. C., Hocheng H. Effect of Tool Wear on Delamination in Drilling Composite Materials// Int. J. of Mechanical Science. -2007. -Т. 49. -C. 983- 988.
38. Hocheng H., Tsao C. C. Effects of special drill bits on drilling - induced delamination of composite materials//International Journal of Machine Tools & Manufacture. -2006. - № 46. -C. 1403- 1416.
39. Ekici E., Işık B. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SURFACE DAMAGE OCCURRED ON THE SIDES OF HOLE ENTRANCE IN DRILLING OF GLASS-FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE MATERIALS// Technology. -2010. -Т. 13. -C. 31- 40.
40. Muller-Hummel P. New cutting tool geometry for milling and drilling of CFRP and CFRP/Titanium Stack materials//SME Webinar. - 2009.
41. Tsao C. C. Effect of deviation on delamination by saw drill//Int. J. of Machine tools & Manufacture. -2007. -Вып. 47. -C. 1132- 1138.
42. Tsao C. C., Hocheng H. Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials//International Journal of Machine Tools & Manufacture. -2005. -№ 45. -C. 125- 130.
43. Zitoune R. , Collombet F. , Hernaiz L. G. Experimental and analytical study of the influence of HexFit glass fiber composite manufacturing process on delamination during drilling//Int. J. Machining and Machinability of Materials. -2008. -№ 3. -C. 326- 342.
44. Zitoune R., Collombet F. Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long fibre composite structures//Composites. - 2007. -Т. 38. -C. 858- 866.
45. Khashaba U. A. Delamination In Drilling GFP-thermoset Composites//Composite Structures. -2004. - Т. 63. -C. 313- 327.
46. Дрожжин В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс: Автореф. дисс. докт. техн. наук: 05.03.01/ ХПИ. - Харків, 1982. -32 с.

47. Везуб Н. В. Научные основы высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.01/ ХНИИТМ. - Харьков., 1995. - 43 с.
48. Кравченко Л. С. Исследование процесса сверления слоистых пластмасс: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.03.01/ ХПИ. - Харьков, 1973. - 19 с.
49. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов. - Л.: Машиностроение, 1987. - 176 с.
50. Штучный Б. П. Обработка резанием пластмасс. - М.: Машиностроение, 1974. - 144 с.
51. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Высшая школа, 1974. - 587 с.
52. Сороченко В. Г. ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ И ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ ПРИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОМ ШЛИФОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ//ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ МАШИНОБУДУВАННЯ. - 2009. - Т. 38. - С. 214- 224.
53. Лупкин Б. В., Мамлюк О. В. Механическая обработка композиционных материалов//Труды Международной ежегодной научно-практической конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Славполикком). - Ялта, 2001. - С. 70- 79.
54. König W., Wulf C., Graß P., Willercheid H. Machining of fibre reinforced plastics//Annals of CIRP. - 1985. - Т. 34. - С. 537- 548.
55. Ramulu M., Branson T., Kim D. A study on the drilling of composite and titanium stacks//Composite Structures. - Washington, 2001. - № 54. - С. 67- 77.
56. Kim D., Ramulu M. Study on the Drilling of Titanium/Graphite Hybrid Composites//Transactions of the ASME. -: ASME, 2007. - № 129. - С. 390 - 396.
57. Kentli A. Experimental study on peck drilling of GFRP and prediction of drilling-induced damage using ANN//Scientific Research and Essays. - 2011. - Т. 6. - С. 1546- 1554.
58. Mishra R., Malik J., Singh I. Prediction of drilling-induced damage in unidirectional glass-fibre-reinforced plastic laminates using an artificial neural network.// Proceedings of the Institut. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Man. - 2010. - Т. 224. - С. 733- 738.

59. Tsao C. C. Prediction of thrust force of step drill in drilling composite material by Taguchi method and radial basis function network//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2008. -T. 36. -C. 11- 18.
60. Kadi H. Modeling the mechanical behaviour of fiber reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks – a review.//Composite Structures. - 2006. -T. 73. -C. 1- 23.
61. Bhatnagar N., Ramakrishnan N., Naik N. K., Komanduri R. On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates// Int. J. of Machine tools & Manufacture. -1995. -T. 35. -C. 701- 716.
62. Tsao C. C., Hocheng H. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network//Journal of Materials Processing Technology. -2008. -№ 203. -C. 342- 348.
63. Hocheng H., Tsao C. C. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits//Journal of Materials Processing Technology. -2003. -№ 140. -C. 335- 339.
64. Lachaud F., Piquet R., Collombet F., Surcin L. Drilling of composite structures// Composite Structures. -2001. -T. 52. -C. 511 - 516.
65. Jain S. , Yang D. C. Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composites drilling//Trans. ASME. -1993. -T. 115. -C. 398- 405.
66. Sadat A. B. Prediction of delamination load in drilling of graphite/epoxy composites//Engineering Systems Design and Analysis. -1996. -T. 3. -C. 21- 26.
67. Puw H. Y., Hocheng H. Anisotropic chip formation models of cutting of FRP//Proceedings of ASME Symposium on Material Removal and Surface Modification Issues in Machining Processes. -New York, 1995.
68. Larsen L. Macromechanical and micromechanical modelling of machining long fiber reinforced polymer composites: Дисс. канд. техн. наук:05.03.01. -Paris, 2009. -150 с.
69. Arola D., Ramulu M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis//Int. J. of Mechanical Science. -1997. -T. 39. -C. 597 - 613.

70. Mackerle J. Finite element analysis and simulation of machining: an addendum. A bibliography 1996-2002//Int. J. of Machine tools & Manufacture. -2003. -Т. 43. -С. 103- 114.
71. Криворучко Д. В. НАУКОВІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЧИСЛОВИХ МЕТОДІВ: Автореф. дисс. докт. техн. наук:05.03.01/ СумГУ. -Харків, 2010. -40 с.
72. Arola D. , Ramulu M. , Wang D. H. Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite//Composites. -1996. -Т. 27. -С. 121- 133.
73. Mahdi M. I., Zhang L. A finite element model for the orthogonal cutting of fiber - reinforced composite materials// Journal of Materials Processing Technology. -2001. -Т. 113. -С. 373- 377.
74. Durão L. M., De_Moura M. F., Marques A. T. Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates//Composites. -2006. -№ 37. -С. 1325- 1333.
75. Durão L. M., De_Moura M. F., Marques A. T. Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling//Engineering Fracture Mechanics. - 2008. -Т. 75. -С. 2767- 2778.
76. Budan D. A., Vijayarangan S. Quality Assessment and Delamination Force Evaluation in Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Laminates—A Finite Element Analysis and Linear Elastic Fracture Mechanics Approach//Journal of Engineering Manufacture. -2002. -Т. 216. -С. 173- 182.
77. Rahmé P. , Landon Y. , Lachaud F. , Piquet R. Analytical models of composite material drilling//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2011. - Т. 52, № 5. -С. 609- 617.
78. Bhattacharya D., Horrigan D. P. A Study of Hole Drilling in Kevlar Composites//Composites Science and Technology. - 1998. -Т. 58, № 2. -С. 267- 283.
79. Singh I., Bhatnagar N., Viswanath P. Drilling of Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Plastics: Experimental and Finite Element Study//Materials & Design. - 2008. -Т. 29, № 2. -С. 546- 553.

80. Rakesh P. K., Sharma V., Singh I., Kumar D. Delamination in Fiber Reinforced Plastics: A Finite Element Approach//Engineering. -2011. -№ 3. -С. 549- 554.
81. Böhm A. FEM-Simulation der Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen mit Hilfe von LS-Dyna. -Stuttgart: University of Stuttgart, 2010. -123 с.
82. Calzada K. MODELING AND INTERPRETATION OF FIBER ORIENTATION-BASED FAILURE MECHANISMS IN MACHINING OF CARBON FIBER-REINFORCED COMPOSITES: Дисс. канд. техн. наук:05.03.01. -Urbana, 2010. -129 с.
83. Rao G. V., Mahajan P., Bhatnagar N. Micro-mechanical modelling of machining of FRP composites – Cutting force analysis//Composites Science and Technology. -2007. -Т. 67, № 3. -С. 579- 593.
84. Rao G. V., Mahajan P., Bhatnagar N. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism//Composites Science and Technology. -2007. -Т. 67, № 11. -С. 2271- 2281.
85. Ramesh M. V., Seetharamu K. N., Ganesan N., Sivakumar M. S. Analysis of Machining of FRPs Using FEM//Int. J. of Machine tools & Manufacture. -1998. -Т. 38. -С. 1531- 1549.
86. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of UD-FRP composites. Part 2: Finite element analysis//Machining Science and Technology. -2005. -Т. 9. -С. 503- 528.
87. Pramanik A., Zhang L. C., Arsecularatne J. A. An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: Tool–particle interaction during orthogonal cutting//Int. J. of Machine tools & Manufacture. -2007. -Т. 47. -С. 1497- 1506.
88. Dandekar C., Shin Y. C. Multiphase Finite Element Modeling of Machining Unidirectional Composites: Prediction of Fiber Debonding and Damage//Machining Science and Technology. -2008. -Вып. 5. -Т. 130.
89. Zitoune R., Collombet F., Lachaud F. др. Experimental calculation of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase//Composites Science and Technology. -2005. -Т. 65. -С. 455- 466.
90. Hashin Z. J. Failure criteria for unidirectional fibre composites//Journal of Applied Mechanics: Trans. ASME. -1980. -Т. 47. -С. 329- 334.

91. Puck A., Schumann H. Failure Analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models// *Composites Science and Technology*. -1998. -Т. 58. - С. 1045- 1067.
92. Wang D. H., Ramulu M., Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite: Part I: Unidirectional laminate.// *Int. J. of Machine tools & Manufacture*. -1995. -Т. 35. -С. 1623- 1638.
93. Calvez C. L., Vigneau J. , Zerrouki V. , Martinez A. Needs of turbo jet engines industry in term of virtual machining//*Proceedings of 7th CIRP workshop of modeling in metal cutting*. -Cluny: ENSAM, 2004.
94. Розенберг А. М., Розенберг О. А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. -К.: Наукова думка, 1990. -320 с.
95. Schürmann H. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff- Verbunden*. -Berlin: Springer, 2007. -Т.1. -679 с.
96. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. *Прикладная статистика*. -М.: Финансы и статистика, 1975. -487 с.
97. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. *Планирование эксперимента в химической технологии*. -К.: Высшая школа, 1976. -184 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 dfrc 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  tssfacs  isdo  tslimit  dt2ms  lctm  erode  ms1st
  0.000  0.500000    0  0.000  0.000    0    0    0
$# dt2msf  dt2mslc  imsc1
  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
  1  1.4912E-8  0.130000  -0.205000  0.000  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  0.000  MECH
$#  pid1  pid2  pid3  pid4  pid5  pid6  pid7  pid8
  1    3    0    0    0    0    0    0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$#  id  heading
  1  move 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
  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  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  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  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  0.000  1.000000  100.000000
$# 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   dof_x   dof_y   dof_z   dof_r_x   dof_r_y   dof_r_z
   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 0.000 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
$#  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  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 ithent 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 ms1st
0.000 0.500000 0 0.000 0.000 0 0 0

\$# dt2msf dt2mslc imsc1
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 dofz dofz dofz dofz dofz dofz
2 0 1 1 1 0 0 0
*SET_NODE_LIST_TITLE
NODESET(SPC) 2
.....
*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 0.000 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 sofscf 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 rwgdnth rwksf icov swradf ithoff
   0 0 0 0.000 1.000000 0 0.000 0

```

```

$# shldg pstiff ithent tdcnof ftall unused shlrw
   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  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
    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
    1 move 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°

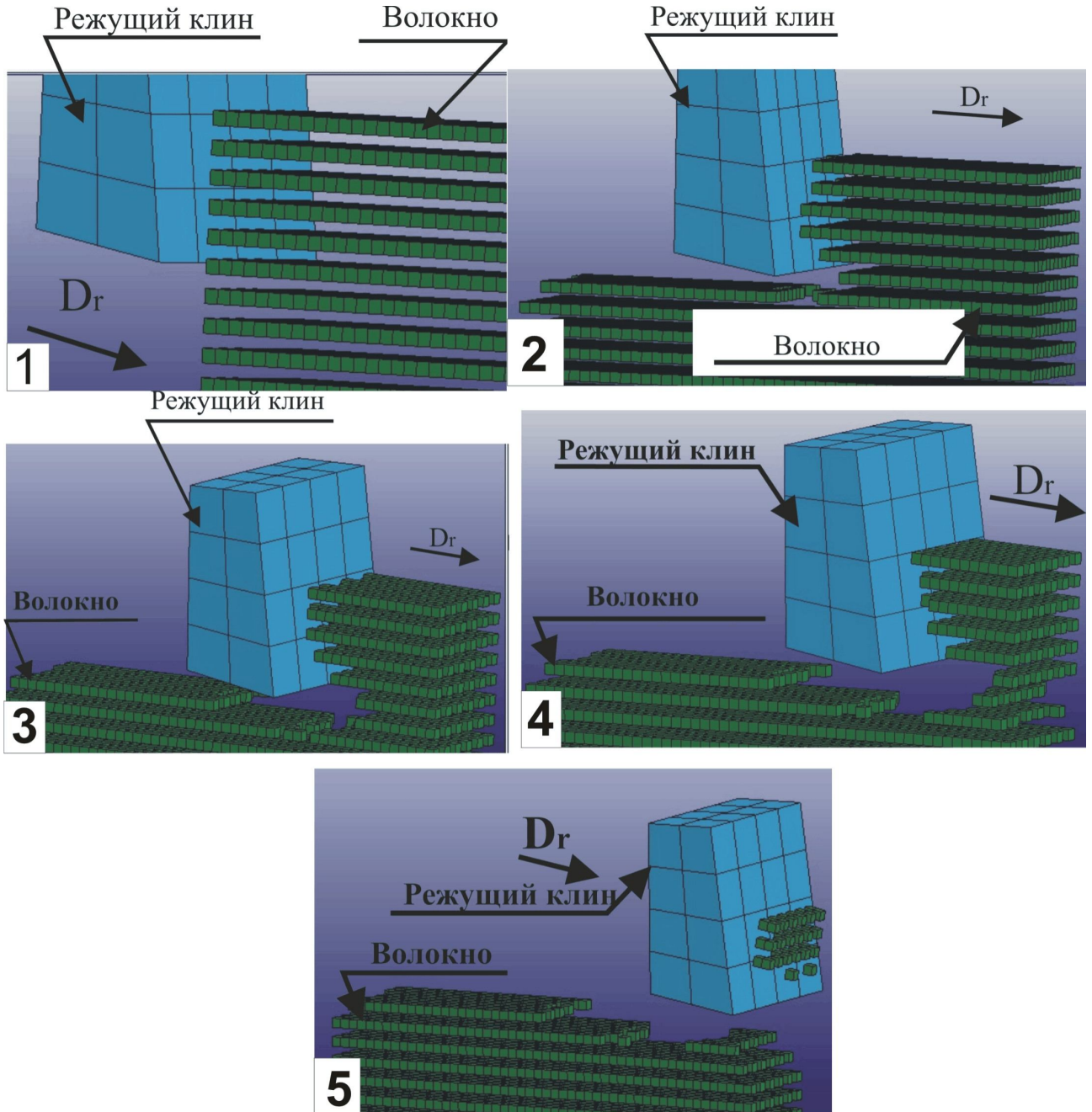
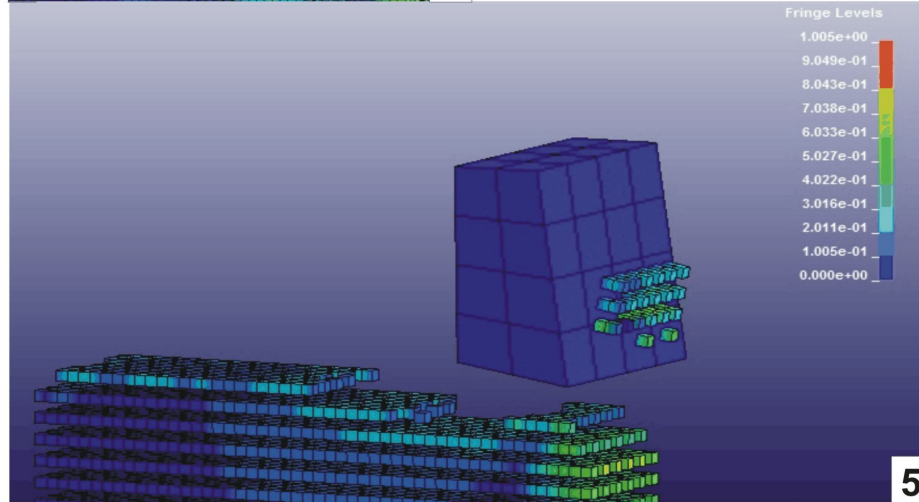
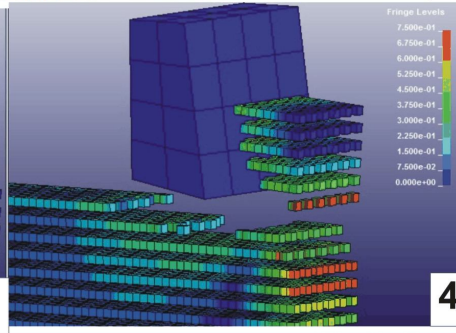
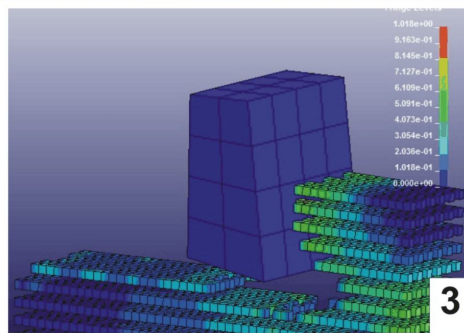
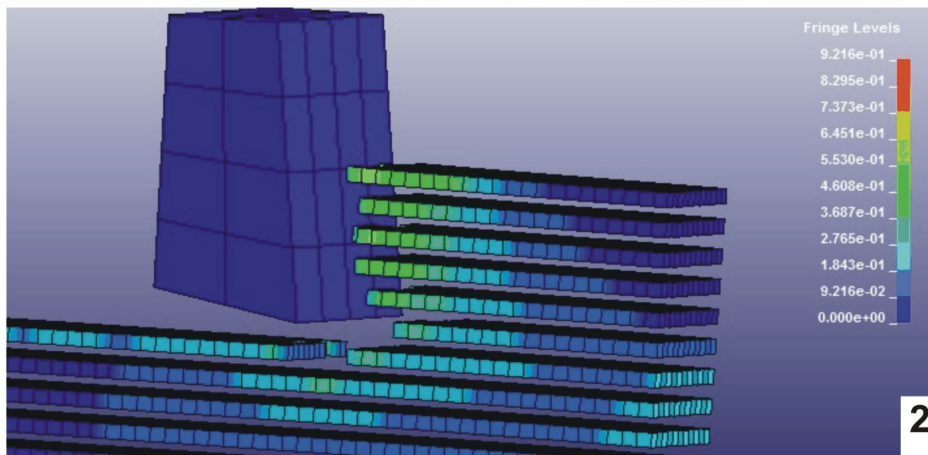
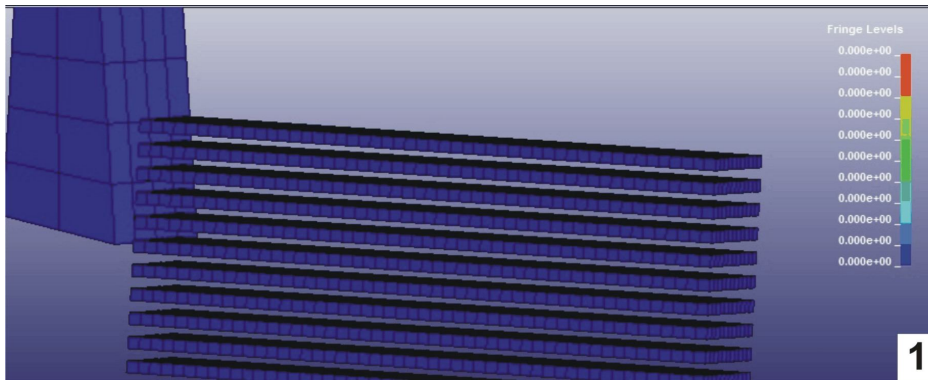


Иллюстрация полей напряжения при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 0°



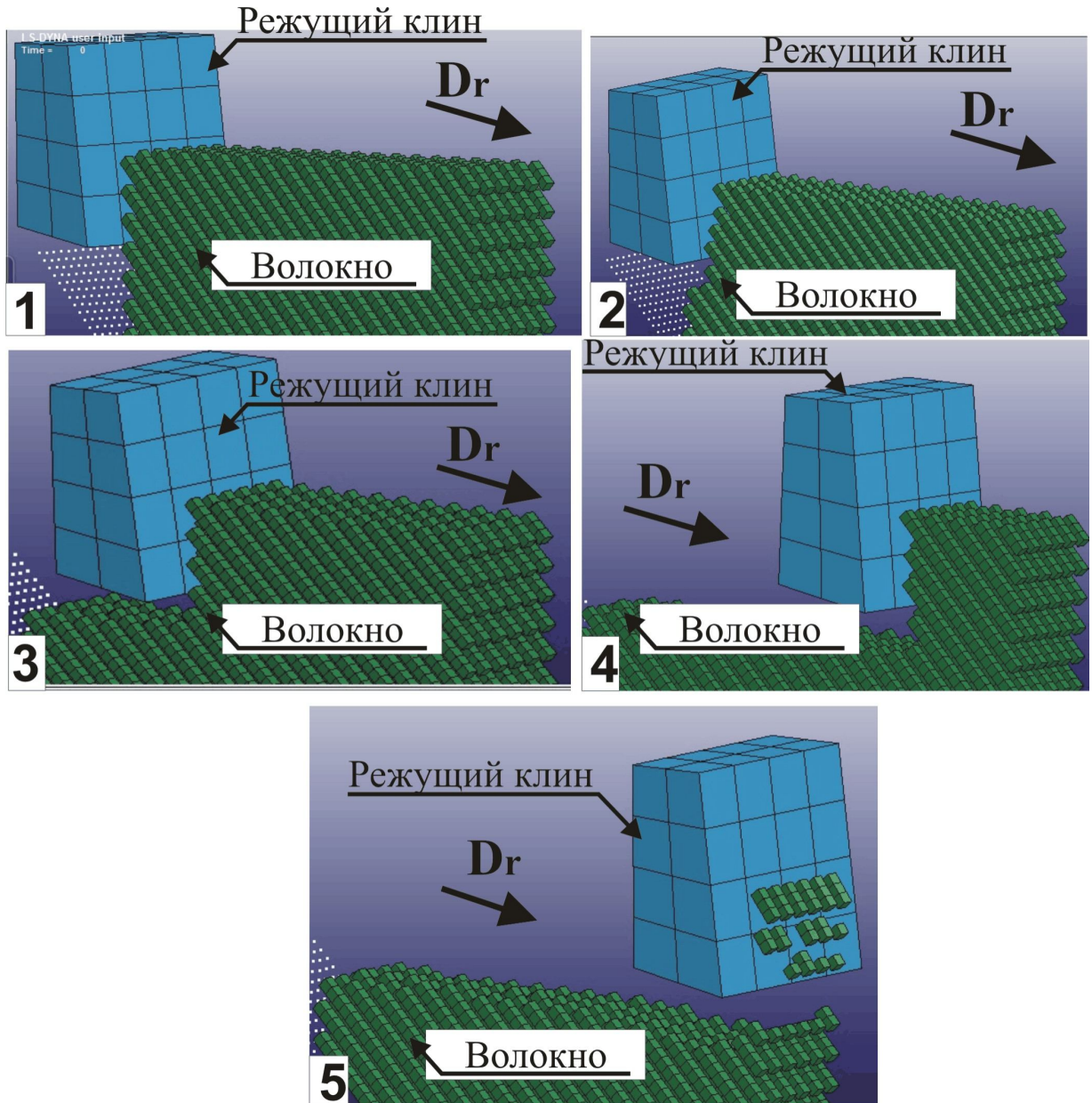
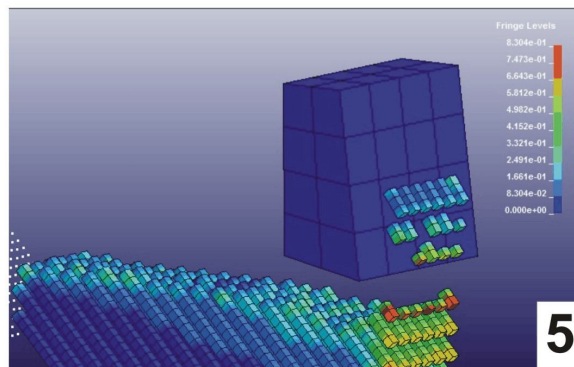
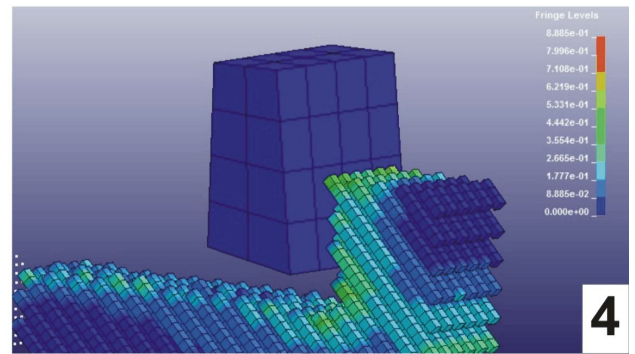
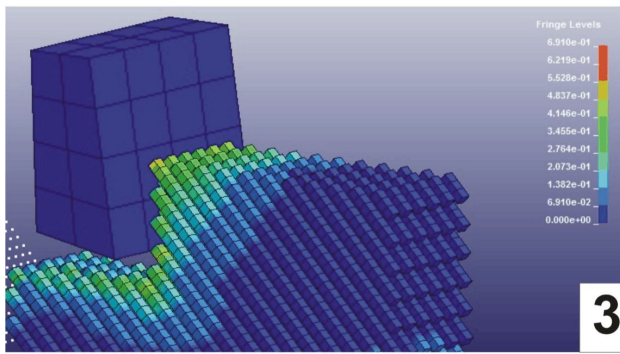
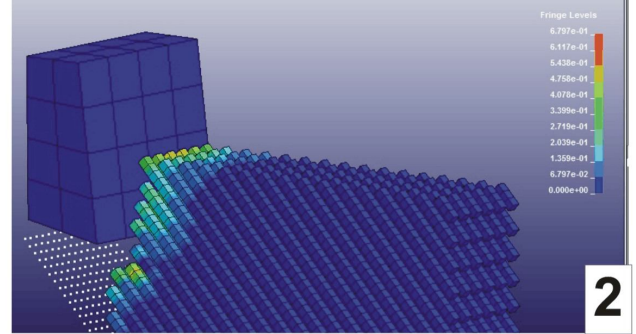
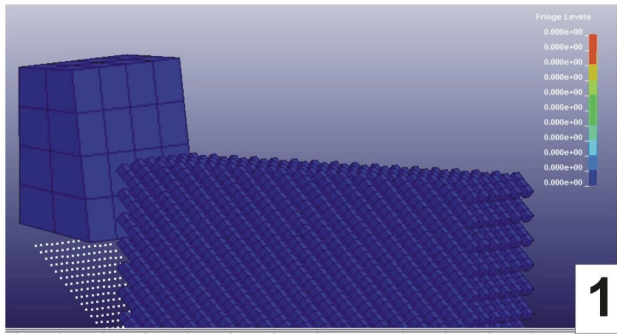
Этапы обработки ВПКМ с углом направленности волокон 45° 

Иллюстрация полей напряжения при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 45°



Этапы обработки ВПКМ с углом направленности волокон 90°

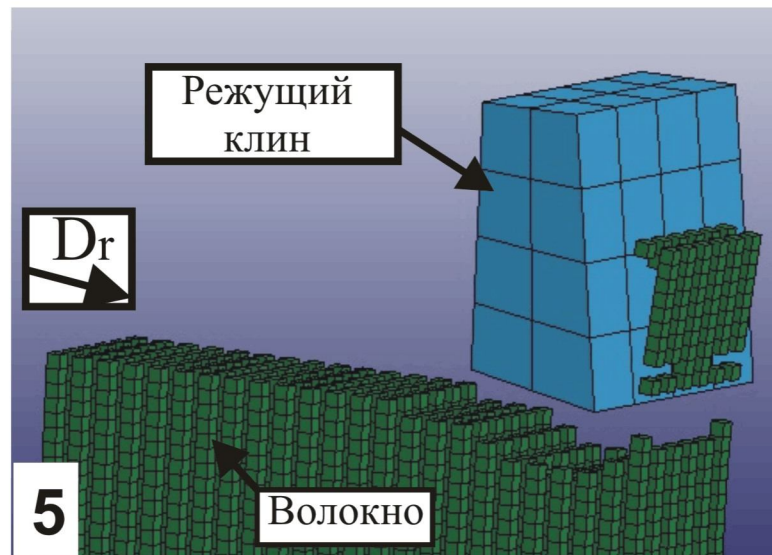
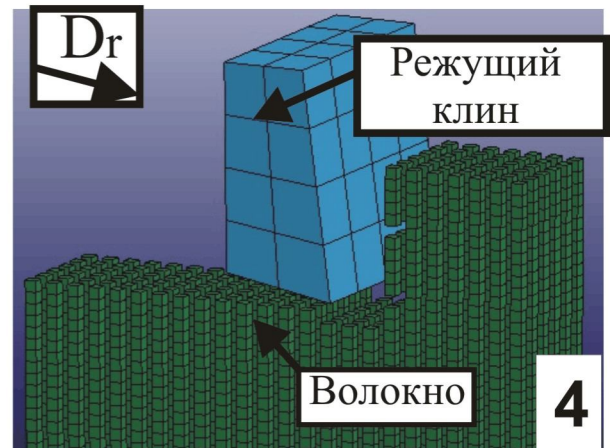
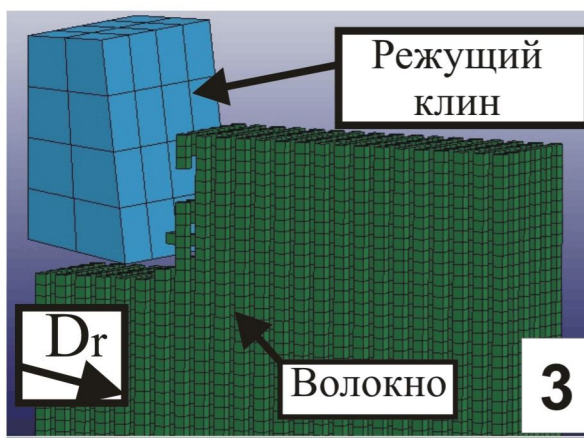
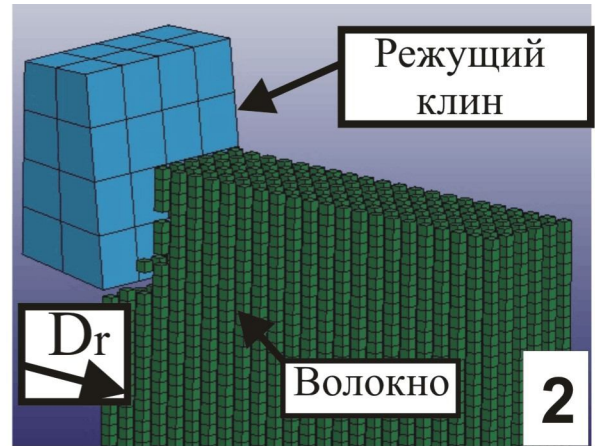
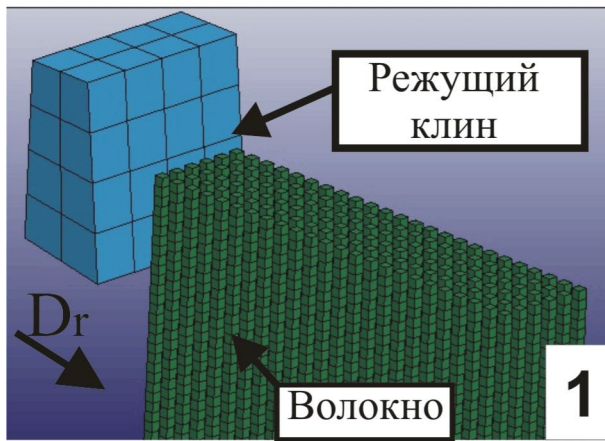
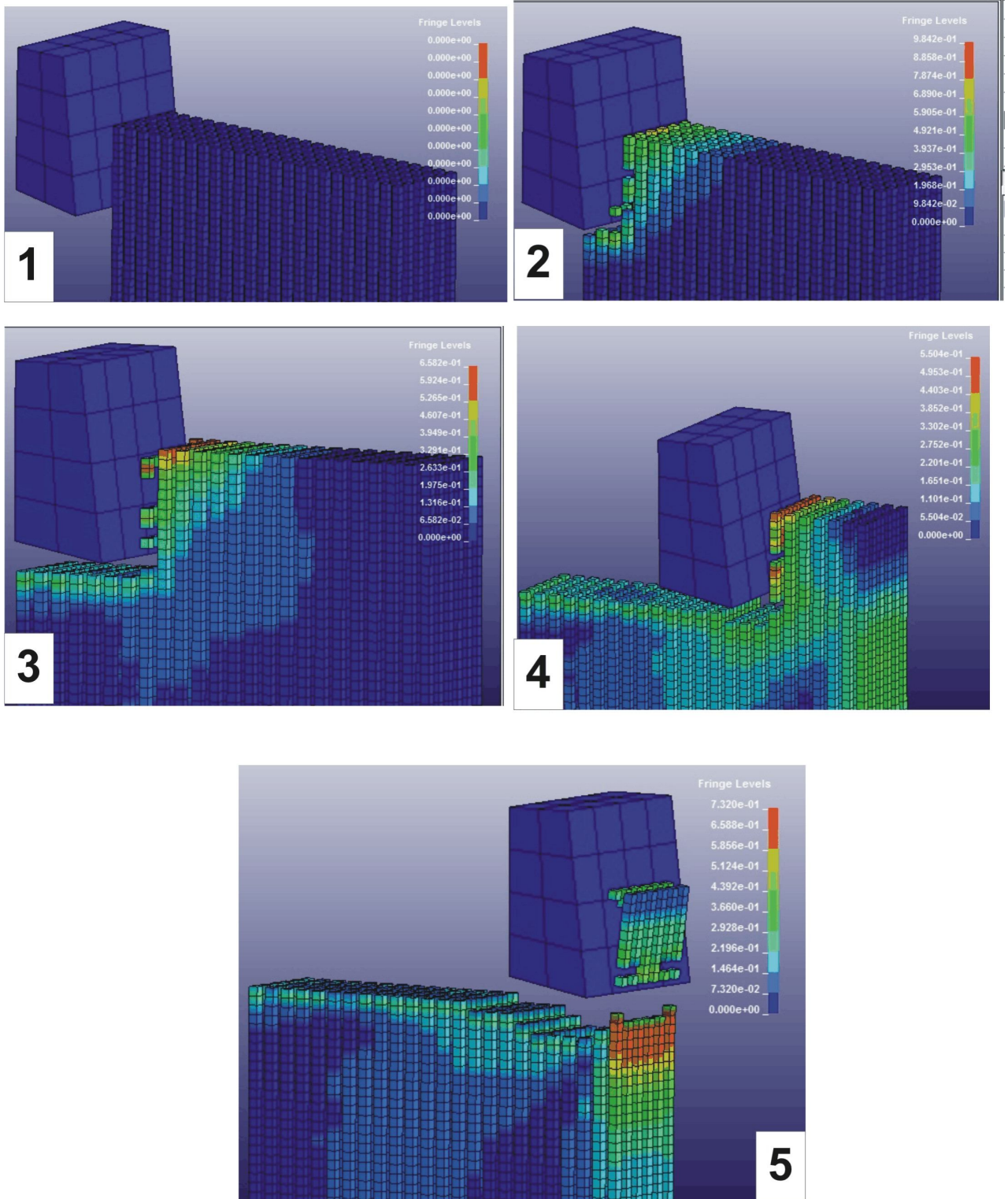


Иллюстрация полей напряжения при обработке ВПКМ с углом направленности волокон 90°



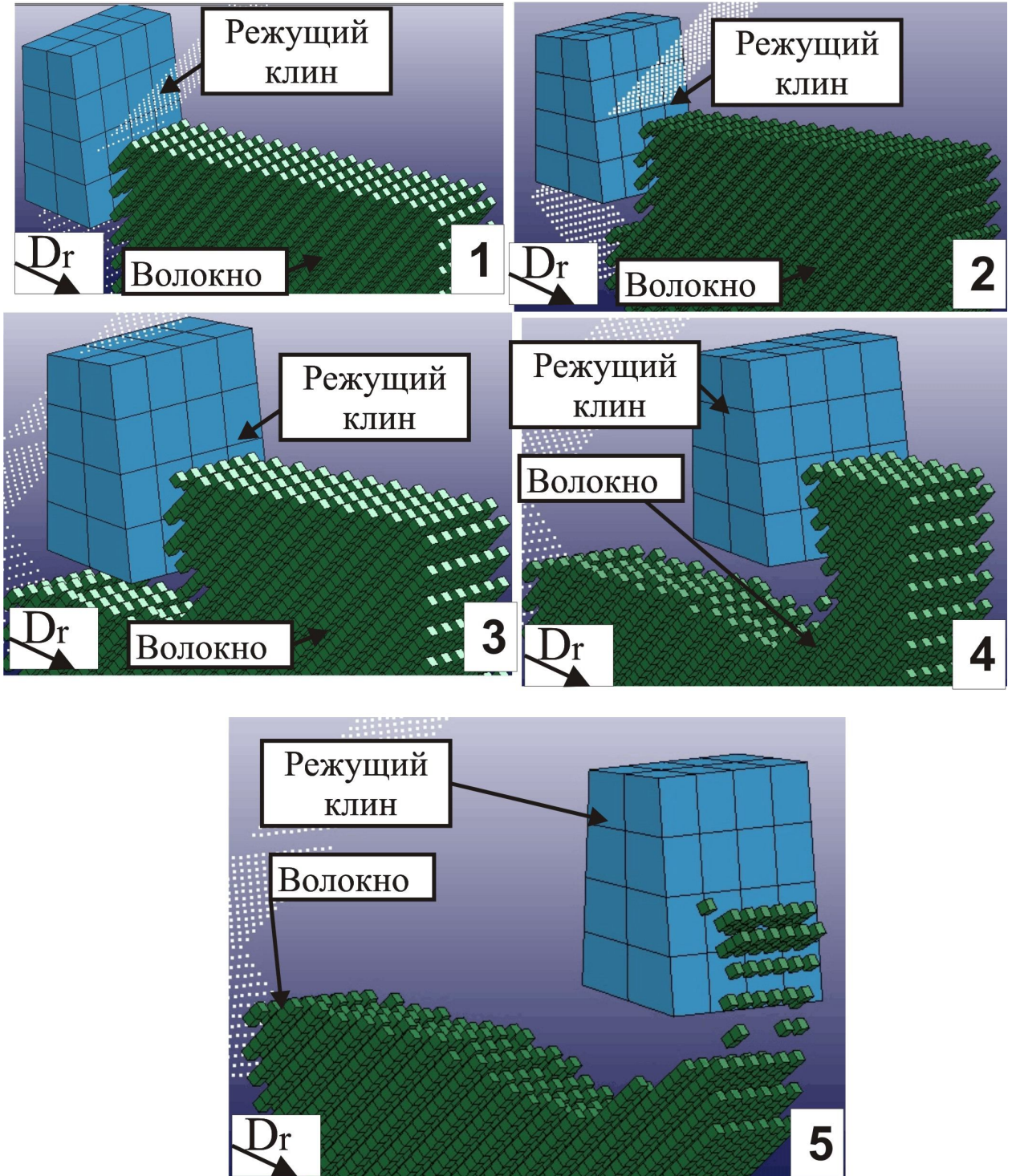
Этапы обработки ВПКМ с углом направленности волокон 135° 

Иллюстрация полей напряженности при обработке ВПКМ с углом направ-
ленности волокон 135°

