



Колесник В.А., Криворучко Д. В., Евтухов В.Г.
Сумский государственный университет. Украина, Сумы

О ФОРМИРОВАНИИ МИКРОРЕЛЬЕФА ОБРАБОТАННОЙ РЕЗАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье выполнен анализ существующих данных об ориентации волокон и влиянии этого параметра на качество обработанной поверхности волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ). Предложена схема пространственной ориентации волокна, учитывающая ранее не принимаемый в расчет угол ориентации режущей кромки относительно волокна. Выдвинута гипотеза, о влиянии этого угла на механизм разрушения ВПКМ и образования повреждений обработанной поверхности. Выполнено моделирование процесса прямоугольного резания и натурный эксперимент прямоугольного свободного резания образцов с углами направленности волокон 0° , 45° , 90° , 135° при углах ориентации режущей кромки относительно волокна 0° , 45° , 90° . Определены углы направленности волокон, способствующие наибольшему и наименьшему дефектообразованию.

Ключевые слова: углы ориентации волокна, ВПКМ, механизм разрушения, микрорельеф, моделирование, резание.

Введение

Волокнистые полимерные композиционные материалы все чаще приходят на смену сталям, металлическим сплавам и другим традиционным конструкционным материалам в таких отраслях промышленности как авиастроение, энергетика, автомобилестроение, военно-промышленный комплекс. Доля композиционных материалов (КМ), по некоторым оценкам, в этих отраслях достигает 29 %, 13%, 11% и 7% [1] соответственно. Из-за возможности формовки достаточно сложных деталей, основной операцией механической обработки ВПКМ является обработка отверстий. Известно, что качество отверстий в деталях из ВПКМ в значительной мере определяет срок службы всего соединения [2]. Качество обработки отверстий оценивается шероховатостью поверхности, величиной разломачивания, расслаивания, термической деструкции и зависит от свойств обрабатываемого материала, режима обработки, конструкции режущего инструмента и инструментального материала. Выше упомянутые факторы тесно связаны с вопросом механики разрушения ВПКМ. Характер разрушения ВПКМ, также во многом определяет качество обработанной поверхности. Ориентация волокон в ВПКМ может быть произвольной, но именно этот фактор влияет главным образом на характер разрушения при резании. К сожалению, существующие исследования принимают во внимание лишь ориентацию и деформирование волокна в главной секущей плоскости, не учитывая его откло-

нения в других плоскостях. Это приводит к ошибкам в прогнозах показателей качества обработки поверхности и сдерживанию развития конструкций режущего инструмента.

Целью настоящей работы является углубление знаний о механизме формирования микрорельефа поверхности и факторах, влияющих на качество обработанной резанием поверхности ВПКМ.

Характеристика ориентации волокон

Как известно, ВПКМ представляют собой двухкомпонентную слоистую структуру, состоящую из волокна и полимерной матрицы. При механической обработке и эксплуатации ВПКМ большую роль играют обе эти составляющие. Полимерная матрица – отвечает за соединение армирующих волокон, волокна же укрепляют материал в различных направлениях, частично распределяя нагрузку в матрицу. Положение волокон в матрице определяет характер механической обработки заготовки. В общем случае схема срезания припуска лезвием может быть представлена следующим образом (рис. 1). Выделим некую точку на режущей кромке инструмента, соприкасающуюся с волокном. Для удобства введем в рассматриваемой точке режущей кромки декартовую систему координат так, чтобы направление главного движения резания D_r совпало с осью Z. Таким образом, основная плоскость P_v совпадет с координатной плоскостью XY выбранной системы координат, перпендикулярно главному движению D_r , плоскость резания P_n совпадет

с координатной плоскостью XZ , перпендикулярно основной плоскости, а главная секущая плоскость P совпадает с координатной плоскостью YZ . Нормальная секущая плоскость P_n пройдет перпендикулярно режущей кромке, образуя с главной секущей плоскостью угол λ – угол наклона главной режущей кромки. В описанных условиях положение волокна определяется тремя углами θ_0 , χ_0 , η_0 , отсчитываемыми относительно координатных осей Z , Y , X соответственно (рис.1). Положение режущей кромки относительно волокна определяется углом λ . Рассмотрим углы, определяющие положение волокна относительно главного движения резания и режущей кромки, более подробно.

Угол λ расположен в плоскости резания характеризует положение режущей кромки в процессе обработки относительно основной плоскости и может изменяться в пределах от -90° до 90° .

Угол направленности волокон θ° изменяется в главной секущей плоскости между вектором главного движения резания и проекцией волокна на главную секущую плоскость в положительном направлении. Эта характеристика, изменяясь в диапазоне от 0° до 180° (рис. 2), оказывая преобладающее влияние на механизм разрушения ВПКМ. В своих работах Singh I. и др. [3], Marques A. T., Durgoo L. M. [4, 5], Sheikh – Ahmad [6], обосновывают возможность применения этой

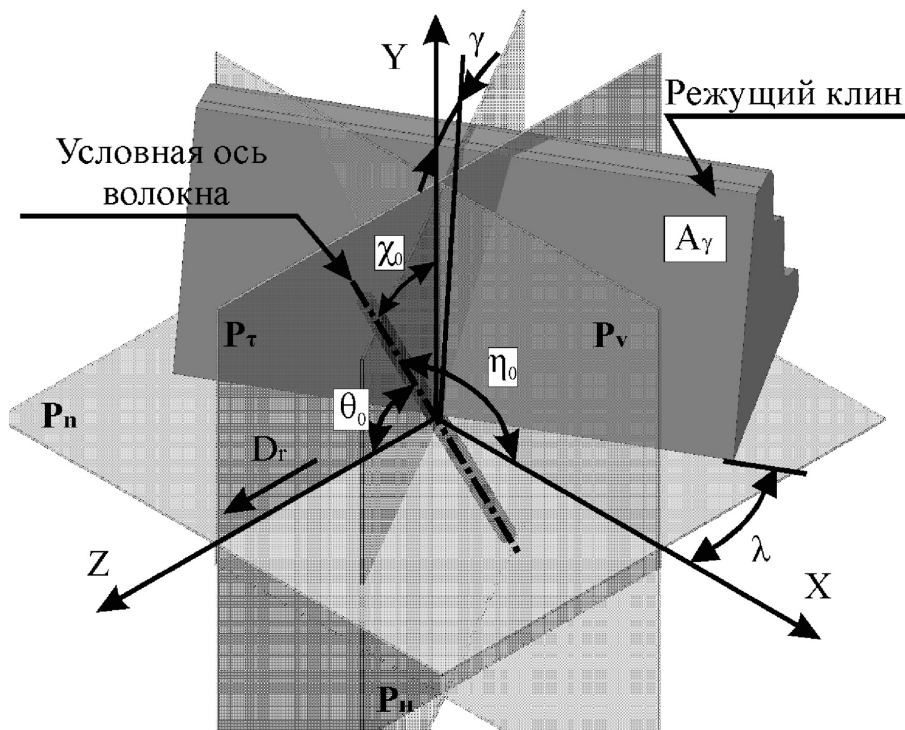


Рис. 1. Схема ориентации волокна

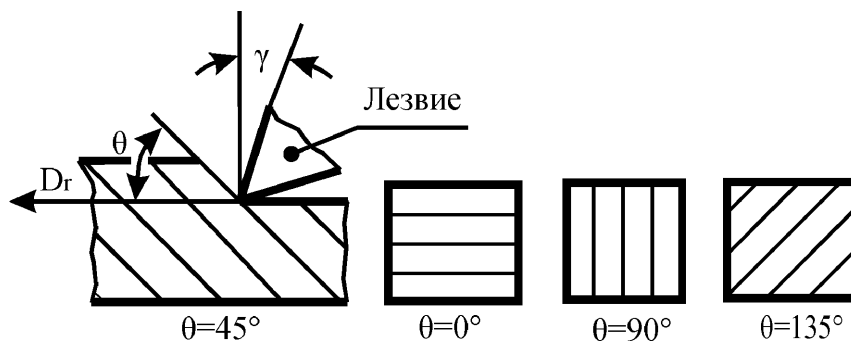


Рис. 2. Схема углов направленности волокон [6]

схемы (рис. 2) для исследования механики разрушения ВПКМ при механической обработке. На сегодняшний день существует большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния угла направленности волокон на силу резания [4, 5, 6], качество обработанной поверхности, в частности, на расслаивание [4, 7, 5]. Установлено, что обработка образцов с углом направленности волокна 90° и 135° характеризуются большими значениями силы резания и амплитудой ее колебания, в то время, как прямоугольное резание

образцов с укладкой волокон под углами 0° и 45° сопровождается меньшим колебанием силы резания [6].

Вместе с тем эти выводы справедливы для случаев когда $\lambda \rightarrow 0$. При больших значениях сдвиги вдоль режущей кромки облегчают разрушение волокна и изменение критического значения θ .

Угол η изменяется в основной плоскости и характеризует наклон проекции волокна относительно проекции режущей кромки инструмента на основную плоскость. Угол η может принимать значения от 0° до 180° в большинстве случаев стремясь к 90° . Отклонение от η от 90° может привести к наклону срезаемого волокна, увеличению площади среза и сил резания.

Следует отметить, что авторам не удалось обнаружить свидетельств исследования этих эффектов ранее. Введение угла η позволяет расширить диапазон факторов оказывающих влияние на качество обрабатываемой резанием поверхности ВПКМ (рис. 3).

Для выявления основных закономерностей влияния θ и η на качество обработанной поверхности рассмотрим процесс прямоугольного свободного резания. В этом случае примем $\lambda = 0^\circ$ с последующим совмещением режущей кромки с осью X (рис. 4).

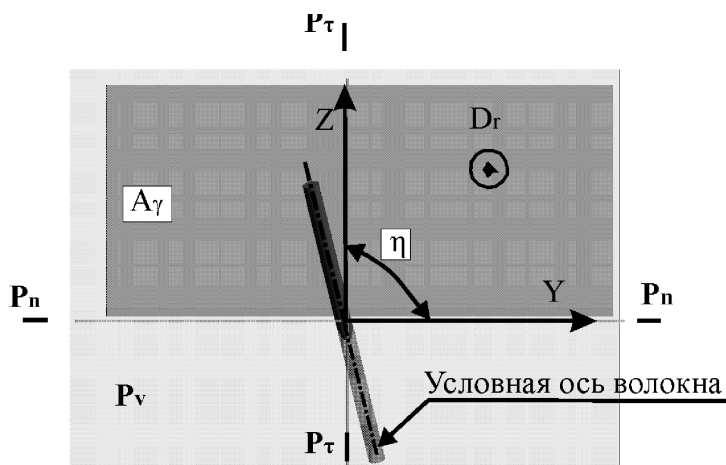


Рис. 3. Угол ориентации режущей кромки относительно волокна

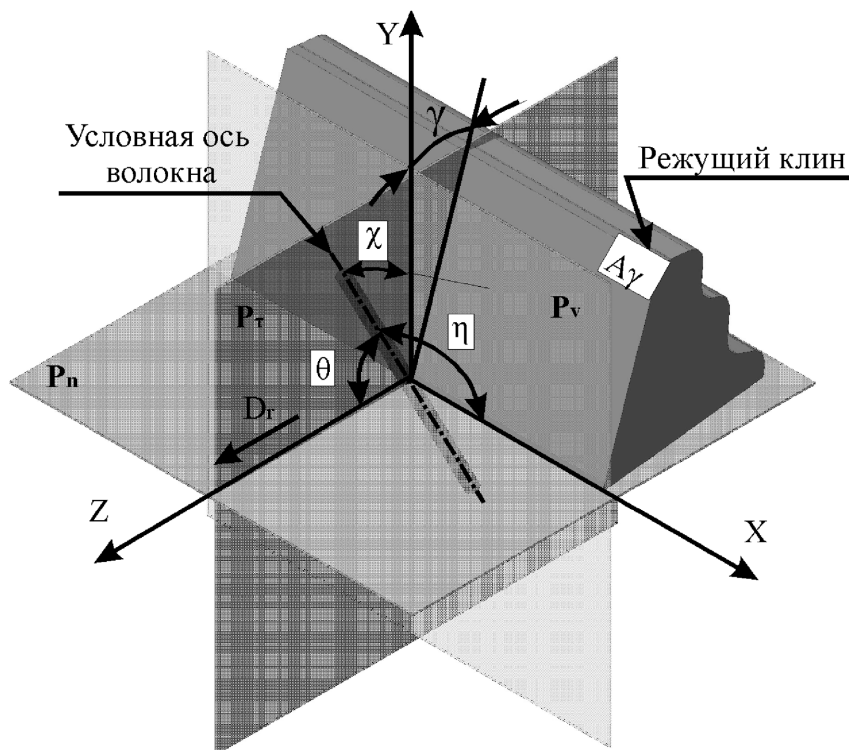


Рис. 4. Схема ориентации волокна при прямоугольном свободном резании

Модель процесса резания

Рассмотрим резание ВПКМ с ориентацией волокон $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 135^\circ$ инструментом с углами $\gamma = 7^\circ$, $\alpha = 10^\circ$. Расчетная схема представлена в виде заготовки из ВПКМ шириной $b = 0,13$ мм, длиной $L = 0,5$ мм и высотой $h = 0,5$ мм. Толщина срезаемого слоя a принята равной 0,1 мм (рис. 5).

Микромеханическая конечно-элементная модель процесса резания выполнена в пакете LS-DYNA. В модели использованы конечные элементы

были определены экспериментально по ГОСТ 25.503-97. Критерий разрушения для эпоксидной смолы – $\epsilon_p = 0.16$.

Анализ данных, полученных при моделировании процесса резания, позволил установить зависимость силы резания от угла направленности волокон (рис. 5) и величины повреждений поверхности (рис. 7, рис. 8). Различные механизмы разрушения обусловлены изменением углов направленности волокон, что приводит к вариациям амплитуды колебания силы резания в цикле обработки.

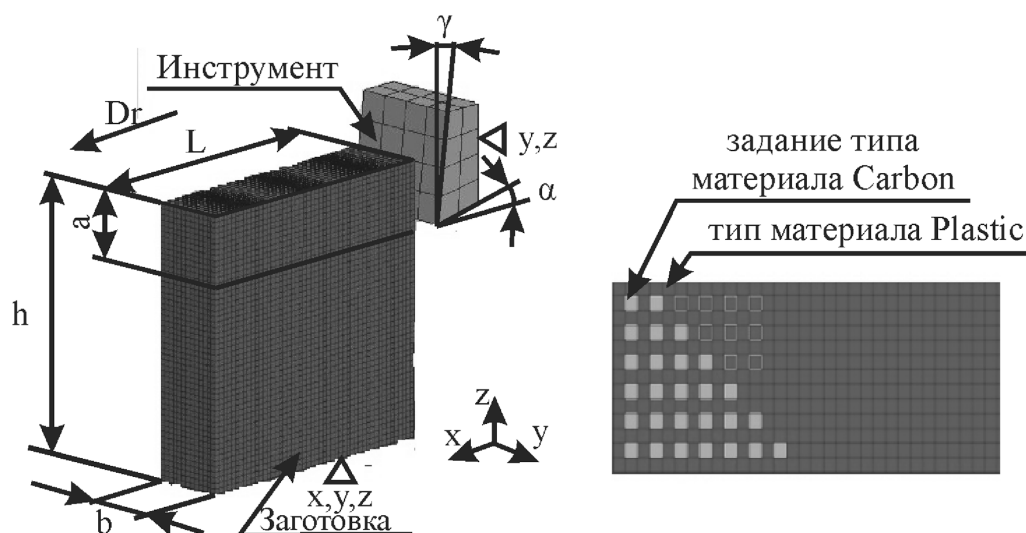


Рис. 5. Расчетная схема модели прямоугольного резания ВПКМ

(КЭ) в виде прямоугольных параллелепипедов с равномерным распределением напряжений в объеме элемента. Размер КЭ сетки заготовки был выбран равным 10 мкм, инструмента – 50 мкм.

Связь напряженного состояния и деформации углеродного волокна была описана упругой моделью *MAT_ELASTIC, а матрицы упруго – пластической моделью *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Граничные условия реализованы лишением шести степеней свободы основания заготовки. Перемещение боковых поверхностей было ограничено по нормали к ним (рис. 5). Нагрузка была задана перемещением лезвия со скоростью резания 30 м/мин. Моделью *ERODING_SURFACE_TO_SURFACE было задано контактное взаимодействие материала заготовки и инструмента. Шаг интегрирования был принят равным 0,5 мкс [8]. Общие физико-механические свойства материалов модели приняты, в первом приближении, равными справочным данным [9]. Критерий разрушения для углеволокна $\sigma_1 = 2500$ МПа [9]. Упруго-пластические свойства эпоксидной смолы

Наименьшая амплитуда была зафиксирована при $\theta = 0^\circ$ [8], а наибольшая – при $\theta = 135^\circ$ (рис. 6).

Действительно 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 циклом нагружения. Так как накопленные повреждения до разрушения во втором случае больше, то и амплитуда изменения силы больше (рис. 6). Исходя из всего выше изложенного, логичными выглядят различия в качестве обработанных поверхностей. Наибольшие повреждения были зафиксированы при моделировании обработки образца с углом направленности волокон $\theta = 0^\circ$, а наименьшие – при $\theta = 45^\circ$ (рис. 7, рис. 8)

Описание экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования прямоугольного свободного резания проводились в условиях лаборатории при постоянной температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. При выполнении поискового эксперимента исполь-

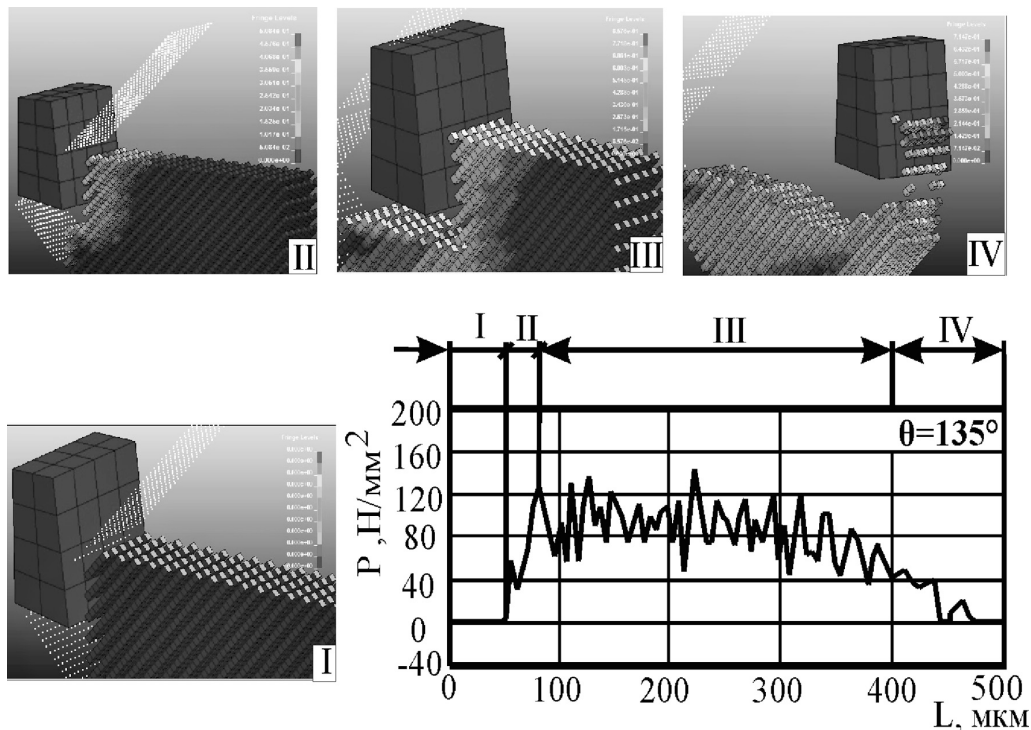


Рис. 6. График изменения силы резания в процессе обработки ВПКМ

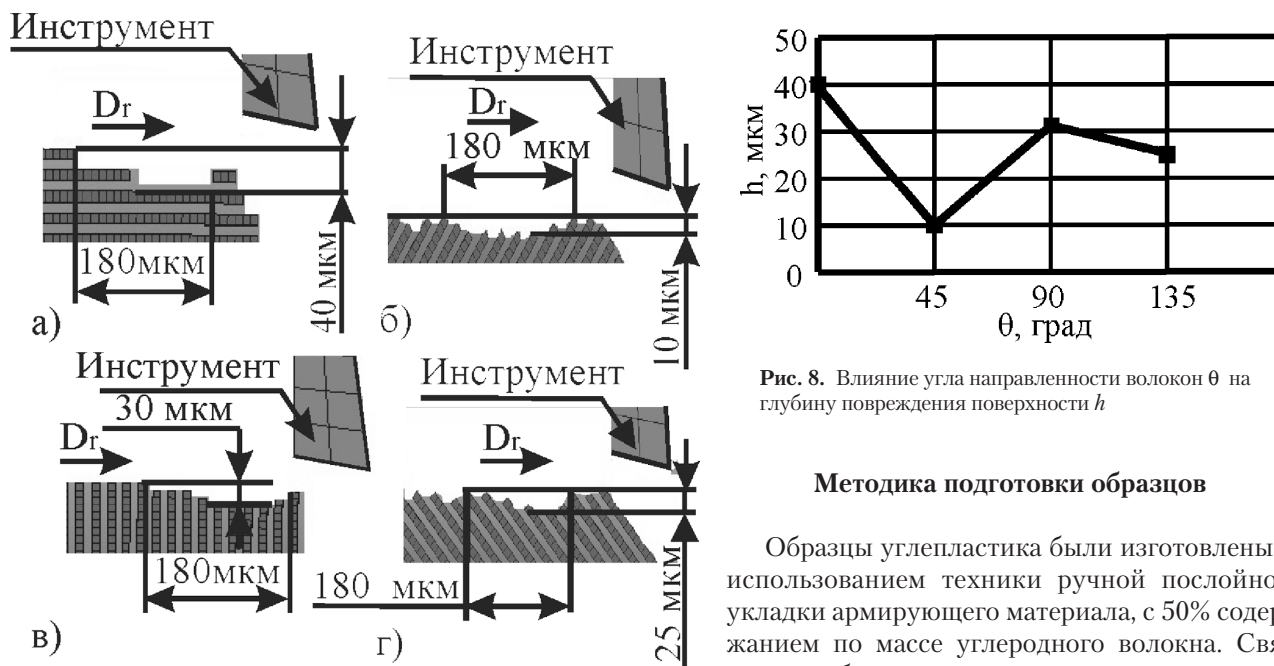

 Рис. 7. Повреждения поверхности в зависимости от угла направленности волокон: а – $\theta = 0^\circ$; б – $\theta = 45^\circ$; в – $\theta = 90^\circ$; г – $\theta = 135^\circ$

 Рис. 8. Влияние угла направленности волокон θ на глубину повреждения поверхности h

Методика подготовки образцов

зготавливались образцы: шириной $b = 20$ мм, длиной $L = 30$ мм и высотой $h = 7$ мм, с углами направленности волокон $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 135^\circ$, которые строгались с толщиной срезаемого слоя $a = 0,025$ мм при углах $\eta = 0^\circ$, $\eta = 45^\circ$, $\eta = 90^\circ$, инструментом из Р6М5 с углами $\gamma = 7^\circ$, $\alpha = 10^\circ$.

Образцы углепластика были изготовлены с использованием техники ручной послойной укладки армирующего материала, с 50% содержанием по массе углеродного волокна. Связующее было изготовлено путем смешения эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем в пропорции 10:1. Слои углеродного волокна пропитывались связующим. Излишки эпоксидной смолы удалялись при помощи стекла, с последующей укладкой в пресс форму. В результате был сформован образец $7 \pm 0,5$ мм. После 16 часов формовки под давлением 0,1 МПа образец был вынут из формы и подвергнут двухчасовой термической обработке при температуре 50°C .

Оборудование и измерительные приборы

Исследование проводилось на станке 6Р12. Закрепление и блокирование инструмента в шпинделе станка препятствовало его провороту. Базирование и закрепление образца было реализовано при помощи приспособления, смонтированного на столе станка. Движение образца осуществлялось продольным перемещением стола станка.

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

Результаты исследований

При моделировании процесса резания под углом $\theta = 0^\circ$ и $\eta = 90^\circ$ было зафиксировано зарождение опережающей трещины и существенное вытягивание волокон до 40 мкм на участке длиной 180 мкм (рис. 7, а), сопровождаемое снижением удельной силы резания [8], в ходе экспериментальных исследований также было установлено наличие вытяги-

вания волокон протяженностью в 1,5 мм и шириной 0,5 мм (рис 8, в). Подробный осмотр обнаруженного дефекта позволил установить, что поверхность углубления, сформированного вытягиванием волокон, не однородная и изобилует большим количеством неровностей, надломанных и расколотых волокон. Наличие данных дефектов объясняется тем, что формирование стружки сопровождалось межслоевым сдвигом, с малой величиной пластических деформаций, а показатели процесса резания при формировании такой стружки определяются свойствами ВПКМ и его способностью сопротивляться сдвигу в плоскости армирования. В результате механической обработки была получена элементная стружка с размером фрагментов от 2 до 5 мм (рис. 9, б). В целом, полученные результаты подтверждают итоги моделирования для этой схемы обработки и согласуются с данными более ранних исследований [10].

Модельный эксперимент по обработке ВПКМ с углом $\theta = 45^\circ$ характеризуется наличием не глубоких повреждений, до 10 мкм (рис. 7, б) с периодом 180 мкм. Анализ снимков обработанной поверхности подтвердил, что резание образцов с углом $\theta = 45^\circ$ не сопровождается значительными повреждениями (рис. 10), тем не менее поверхность, образованная при разрушении срезаемого слоя, гладкая со значительным «размазыванием» материала матрицы вследствие контакта задней поверхности инструмента с вновь образованной поверхностью, как следствие упругого восстановления матрицы. В результате прямоугольного резания образцов с углом направленности волокон 45° при угле ориентации режущей кромки 90° были получены крупные цилиндрические элементы стружки шириной 5 мм и длиной 15 мм. Разрушение материала происходит под действием межслоевого сдвига со сжатием.

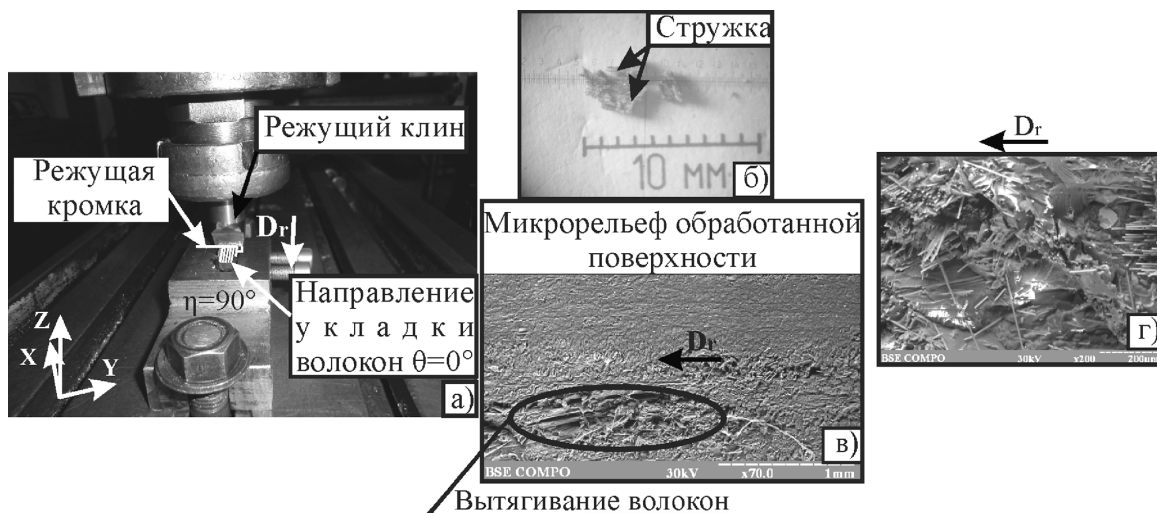


Рис. 9. Иллюстрация схемы обработки образца и поверхностных дефектов при $\theta = 0^\circ$ и $\eta = 90^\circ$

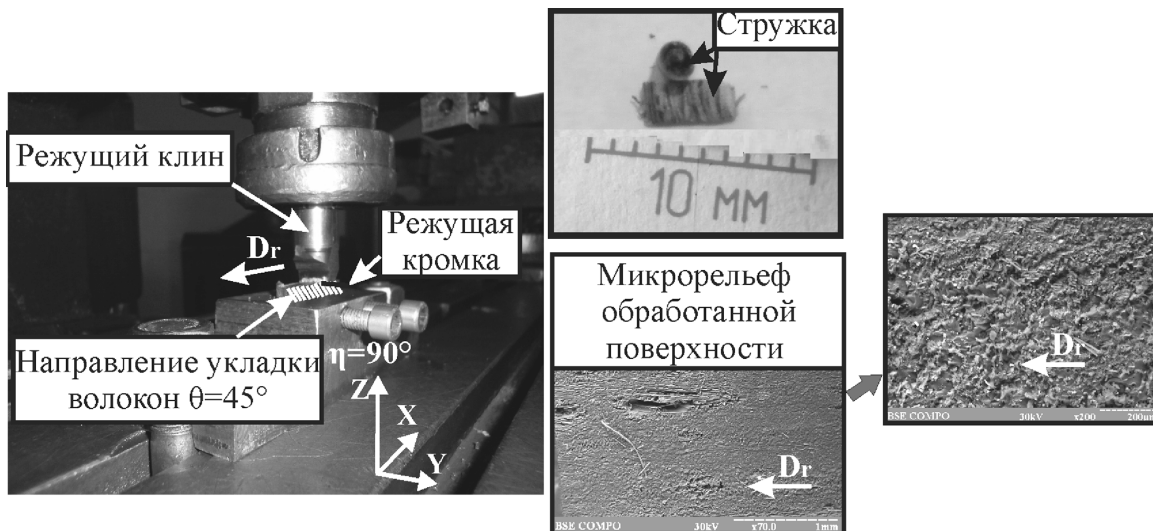


Рис. 10. Иллюстрация схемы обработки образца с $\theta = 45^\circ$ и $\eta = 90^\circ$

Применение метода конечных элементов при моделировании резания образца с углом направленности волокон $\theta = 90^\circ$ (рис. 11), в контексте изучения качества обработанной поверхности позволило установить, что период разрушения, как и на предыдущих схемах составил 180 мкм, в то время как глубина повреждений достигла 30 мкм. Значительного колебания удельной силы резания не наблюдалось [8]. В ходе проведения натурного эксперимента были получены крупные фрагменты стружки продольного изгиба, полученной под действием сжатия с продольным изгибом. Это, в свою очередь, спровоцировало формирование трещины сдвига вдоль границы раздела «волоконистый наполнитель – матрица» (рис. 11, в, з).

Как свидетельствуют результаты моделирования, обработка образцов с углом $\theta = 135^\circ$ сопровождается вытягиванием волокон до 35 мкм, значительными колебаниями силы резания (рис. 12), расслаиванием, сдвигом волокон и внеплоскостным перемещением. Воздействие режущей кромки на боковую сторону волокон вызывает их существенный изгиб, что запускает процесс образования трещин и формирование длинных элементов стружки (рис. 12). Вследствие разрушения под поверхностью резания, толщина стружки значительно больше толщины среза. Это подтверждают фрагмент стружки, полученные в ходе выполнения натурного эксперимента, достигающие в длину свыше 10 мм, а в ширину от 1 до 3 мм. Осмотр обра-

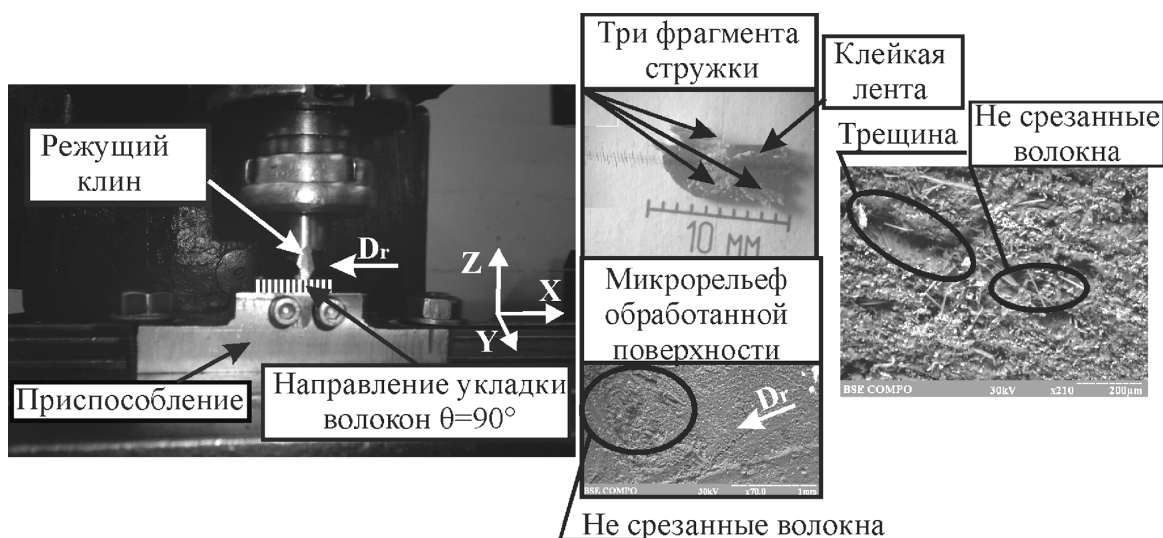


Рис. 11. Иллюстрация схемы обработки образца с $\theta = 90^\circ$ и $\eta = 90^\circ$

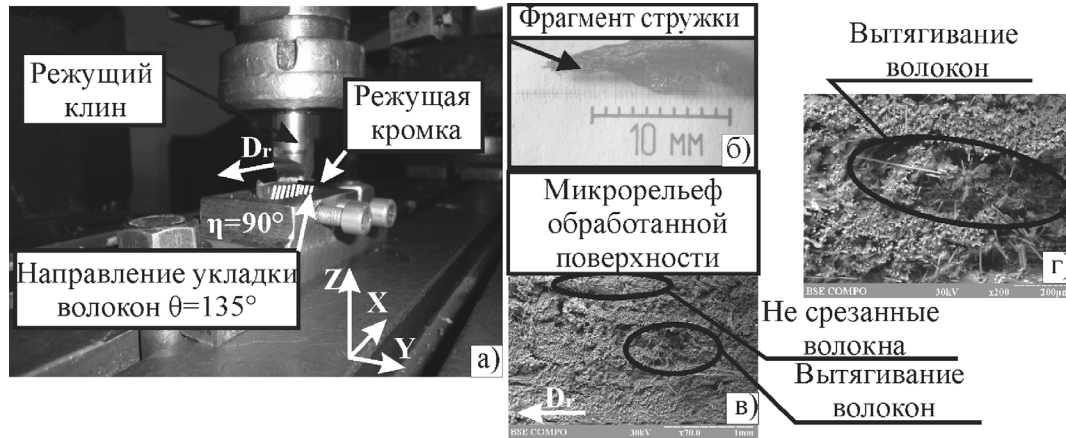


Рис. 12. Иллюстрация схемы обработки образца с $\theta = 135^\circ$ и $\eta = 90^\circ$

ботанной поверхности показал, что она содержит участки с вытянутыми и не срезанными волокнами длиной от 0,7 до 1,2 мм и шириной 0,5–0,7 мм (рис.12, в, г).

По итогам анализа полученных фотографий была построена диаграмма (рис. 13), на которой по оси ординат отложены значения условных поврежде-

ное резание запечатленных поверхностей происходило в одинаковых условиях, при постоянных режимах резания, инструментом с не изменой геометрией из одного инструментального материала, можно предположить, что на характер повреждений обработанной поверхности оказали влияния углы направленности волокон и ориентации режу-

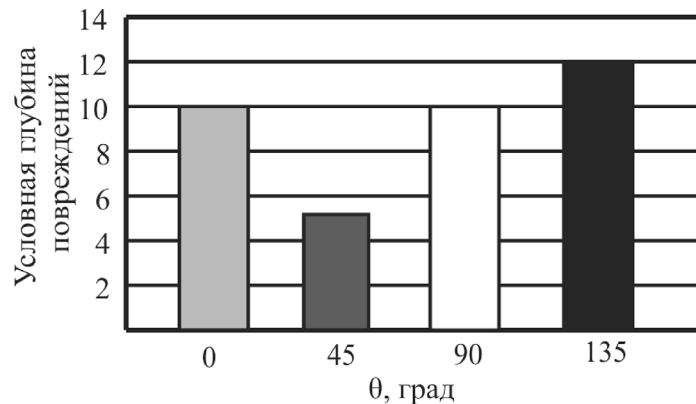


Рис. 13. График зависимости условных повреждений в зависимости от угла направленности волокон

дений обработанной поверхности. Цифры условных повреждений представляют собой аппроксимированные данные о величине повреждений для каждого варианта угла направленности волокон. По оси абсцисс отложены значения углов направленности волокон в главной секущей плоскости.

Помимо представленных фотографий поверхностей полученных при обработке образцов при $\eta = 90^\circ$, была также выполнена механическая обработка образцов при $\eta = 0^\circ$ и 45° , которые приведены ниже (рис. 14).

Как можно судить по состоянию обработанных поверхности ВПКМ, каждая из них имеет свой характер повреждений. Учитывая, что прямоуголь-

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

Выводы

Определено, что влияние ориентации волокна на качество обрабатываемой поверхности изучалось только в главной секущей плоскости, в то время как установлено наличие пространственной ориентации волокна, что обуславливает существование углов определяющих положение волокна

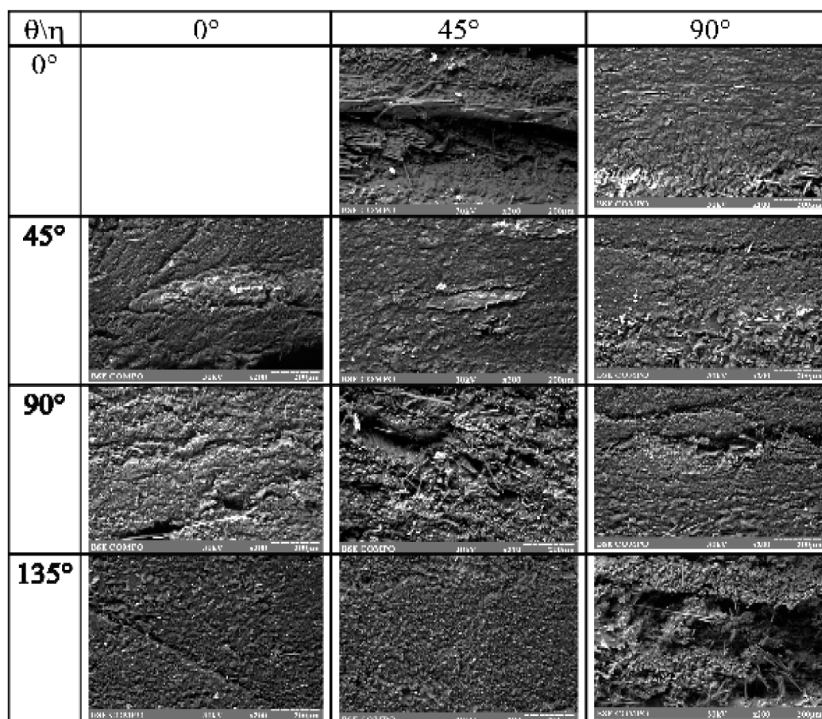


Рис. 14. Состояние поверхностного слоя ВПКМ после механической обработки при различных углах ориентации режущей кромки

относительно других плоскостей, что также оказывает влияние на качество обработанной поверхности. Сформулирована схема и физический смысл углов пространственной ориентации волокна. Методом конечных элементов (МКЭ) и в ходе натурального эксперимента было исследовано влияние угла направленности волокон θ и угла ориентации режущей кромки относительно волокна η . Исследовано влияние угла направленности волокон и угла ориентации режущей кромки относительно направления армирования. Используя метод КЭ, было установлено, что наименьшая глубина поврежденных наблюдается при $\theta=45^\circ$ и $\eta=90^\circ$, что было подтверждено в ходе натурального эксперимента. При моделировании процесса свободного прямоугольного резания наибольшие повреждения были зафиксированы при $\theta=0^\circ$ и $\eta=90^\circ$, хотя по результатам механической обработки наибольшее количество повреждений в виде вытягивания и не срезанных волокон было обнаружено в образцах с углами $\theta=135^\circ$ и $\eta=90^\circ$. Сравнивая результаты модельного и натурального эксперимента, можно сделать вывод, что наиболее качественная поверхность без видимых повреждений была получена при обработке образца с углами $\theta=45^\circ$ и $\eta=90^\circ$.

Литература

- [1] Sattel S. Hochleistungswerkzeuge für die CNC – gesteuerte und die manuelle Zerspanung von CFK // IFW Bearbeitung von Verbundwerkstoffen Spanende Bearbeitung von CFK. – Stuttgart: Universität Stuttgart, 2011.
- [2] Campbell F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. – 1 изд. – Elsevier Science, 2004. 532 с.
- [3] Teti R. Machining of Composite Materials // Machining of Composite Materials. – P. 1–24.
- [4] Marques A. T., Durro L. M., Magalhães A. G., Tavares J. M. Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates // 16th international conference on composite materials. – Porto, 2007. – P. 1–10.
- [5] Durro L. M. machining of hybrid composites: Дисс. канд. техн. наук: 05.03.01. – Porto, 2005. – 242 p.
- [6] Sheikh-Ahmad J. Y. Machining of Polymer Composites.: Technology & Engineering, 2008. – 230 p.
- [7] 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. – P. 335–339.
- [8] Krivoruchko D. V., Kolesnik V. A., Muzheckij A. I. O vlijanii orientacii volokon na mehanizm razrushenija voloknistyh polimernyh kompozicionnyh materialov // Vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii. – Kramatorsk, 2012. – Vyp. 27. № 2. – P. 55–59.

- [9] Schürmann H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff- Verbunden/ H. Schürmann. Berlin: Springer, 2007. Т.1. — 679 p.
- [10] Iliescu D., Gehin D., Iordanoff I. etc. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting//Composites Science and Technology. — 2010. № 70. — P. 73–80.

Kolesnyk V.A., Kryvoruchko D. V., Evtuhov V.H.
Sumy State University. Ukraine, Sumy

THE MICRORELIEF FORMATION OF FIBRE REINFORCED PLASTIC MACHINED SURFACE

In this article the analysis of the existing data on the orientation of the fibers and influence of this parameter on the surface quality machined in fiber reinforced plastic (FRP) is given. A scheme for the spatial orientation of the fibers which includes angle of the cutting edge relative to the fiber orientation was proposed. The hypothesis about the impact of this angle on the fiber destruction mechanism and FRP surface damage formation was suggested. The modeling and experiment of orthogonal cutting of samples with fiber orientation angles 0°, 45°, 90°, 135° angles with respect to the orientation of the cutting edge fibers 0°, 45°, 90° were made. The contributions of fiber orientation angles in maximum and minimum defect formation were determined.

Keywords: fiber orientation, frp, the fracture mechanism, microrelief, modeling, machining.

Referencec

- [1] Sattel S. Hochleistungswerkzeuge für die CNC – gesteuerte und die manuelle Zerspanung von CFK //IFW Bearbeitung von Verbundwerkstoffen Spanende Bearbeitung von CFK. — Stuttgart: Universität Stuttgart, 2011.
- [2] Campbell F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. — 1 изд. — : Elsevier Science, 2004. 532 p.
- [3] Teti R. Machining of Composite Materials//Machining of Composite Materials. — P. 1–24.
- [4] Marques A. T., Durro L. M., Magalhães A. G., Tavares J. M. Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates// 16th international conference on composite materials. — Porto, 2007. — P. 1–10.
- [5] Durro L. M. machining of hybrid composites: Дисс. канд. техн. наук: 05.03.01. — Porto, 2005. — 242 p.
- [6] Sheikh-Ahmad J. Y. Machining of Polymer Composites.: Technology & Engineering, 2008. — 230 p.
- [7] 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. — P. 335–339.
- [8] Krivoruchko D. V., Kolesnik V. A., Muzheckij A. I. O vlijanii orientacii volokon na mehanizm razrushenija voloknistyh polimernyh kompozicionnyh materialov//Vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii. — Kramatorsk, 2012. — Вып. 27. № 2. — P. 55–59.
- [9] Schürmann H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff- Verbunden/ H. Schürmann. Berlin: Springer, 2007. Т.1. — 679 p.
- [10] Iliescu D., Gehin D., Iordanoff I. etc. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting//Composites Science and Technology. — 2010. № 70. — P. 73–80.