

УДК 620.168:678-037.87

Криворучко Д. В., Колесник В. А., Мужецкий А. И.

## О ВЛИЯНИИ ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКОН НА МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ) находят все более широкое применение во многих отраслях промышленности. Это обуславливает увеличивающийся интерес к изучению механических свойств, механизмов разрушения, обрабатываемости и качества обработанной поверхности этого класса конструкционных материалов. Направление укладки волокон в каждом изделии из ВПКМ различно и обеспечивает максимальную прочность изделия. Вместе с тем уже полученные учеными Duraol L. M. [1], Wang D. H. [2] результаты исследований показывают, что при обработке резанием качество обработанной поверхности существенно зависит от ориентации волокон по отношению к режущей кромке инструмента и направлению скорости резания. В качестве характеристики ориентации волокон используют параметр  $\theta$  – угол направленности волокон [3].  $\theta$  – угол между направлением главного движения резания и направлением армирующего волокна ВПКМ (рис. 1).

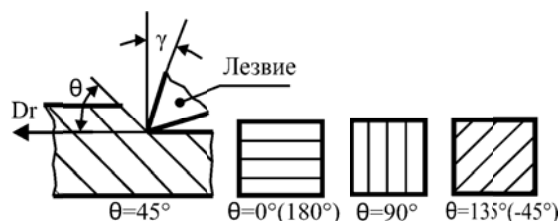


Рис. 1. Схема измерения угла направленности волокон [3]

Опубликованные экспериментальные исследования [3] показывают, что резание ВПКМ с углом направленности волокон  $\theta \rightarrow 0^\circ$  сопровождается зарождением трещины, которая распространяется по границе «волокнистый наполнитель – матрица». Перед лезвием формируется опережающая трещина отрыва. Стружка скользит по передней поверхности, воспринимая изгибающие нагрузки и ломается перпендикулярно волокнистому наполнителю. Это происходит, когда изгибающие напряжения превышают предел прочности волокон на изгиб. Для обработки ВПКМ с  $\theta \rightarrow 0^\circ$  характерен незначительный рост силы резания.

При резании ВПКМ с углом направленности волокон  $\theta = 45^\circ$  их разрушение происходит перпендикулярно к осям волокон в результате межслоевого сдвига со сжатием. В момент сжатия срезаемого слоя трещины могут формироваться как выше, так и ниже поверхности резания.

Резание ВПКМ с  $\theta \rightarrow 90^\circ$  характеризуется образованием порошкообразной стружки, а разрушение волокон происходит под действием срезающих напряжений.

Пластическое деформирование ВПКМ с углом направленности волокон  $\theta \geq 135^\circ$  сопровождается макроразрушением. По мере внедрения инструмента возникают деформации ВПКМ, которые приводят к расслаиванию, сдвигу волокон и внеплоскостным перемещениям. Из-за воздействия режущей кромки на боковую сторону волокон возникает их существенный изгиб, что вызывает образование межслоевых трещин и формирование длинных элементов стружки. Вследствие разрушения под поверхностью резания наблюдается увеличение толщины срезаемого слоя с последующим упругим восстановлением обработанной поверхности. Волокна восстановленного слоя оказывают абразивное воздействие на заднюю поверхность инструмента

Такой взгляд на процесс стружкообразования является эмпирическим и требует теоретического обоснования. Весьма наглядно и достоверно, на наш взгляд, задача может быть решена путем моделирования процесса резания методом конечных элементов. Значительное развитие этот метод имеет применительно к обработке металлов резанием [4], но может быть использован и для моделирования резания ВПКМ. Однако из-за неоднородности состава и свойств ВПКМ необходимо применять различные подходы к описанию их поведения при резании. Это требует совершенствования разработанных ранее моделей. Отдельные исследования, выполненные в этой области, показали возможность создания макромеханических, мезомеханических, микромеханических моделей резания ВПКМ [5, 6].

Nayak D. и соавторы [7] с помощью разработанной ими микромеханической модели в пакете ABAQUS показали теоретически, что с изменением угла ориентации волокон  $\theta$  величина главной проекции силы резания изменяется более чем в 2 раза, достигая максимума при угле  $\theta = 90^\circ$  и минимума при угле  $\theta = 0^\circ$  (рис. 2). 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 [5]. Их модель дала те же качественные результаты. Следует отметить, что экспериментальные данные Wang D. H. и др. [2] 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.

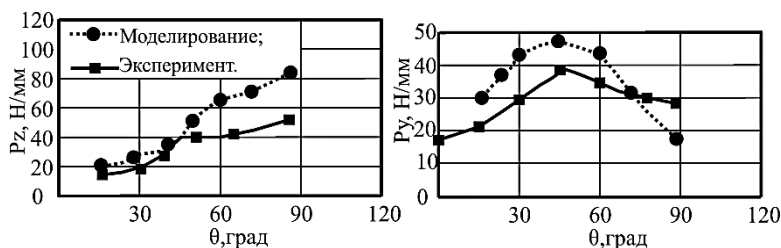


Рис. 2. Влияние угла направленности волокон на главную проекцию  $P_z$  и радиальную проекцию  $P_y$  удельной силы резания [7]

Целью настоящего исследования является изучение механизма разрушения ВПКМ при различной направленности волокон и выявление влияния ориентации волокон на глубину повреждений обработанной поверхности.

Для достижения поставленной цели с помощью микромеханической модели в LS-DYNA было исследовано 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 КЭ части заготовки из ВПКМ шириной  $b = 0,13$  мм, длиной  $L = 0,5$  мм и высотой  $h = 0,5$  мм (рис. 3). 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 [7]. 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. Модель двухкомпонентного ВПКМ представляла собой сетку элементов с механическими свойствами материала матрицы, в которой КЭ отдельных строк и/или столбцов заданы механические свойства углеродных волокон (рис. 3, б). Поведение углеродного волокна описано моделью упругого материала \*MAT\_ELASTIC, а поведение матрицы – моделью упругопластического материала \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY. 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.

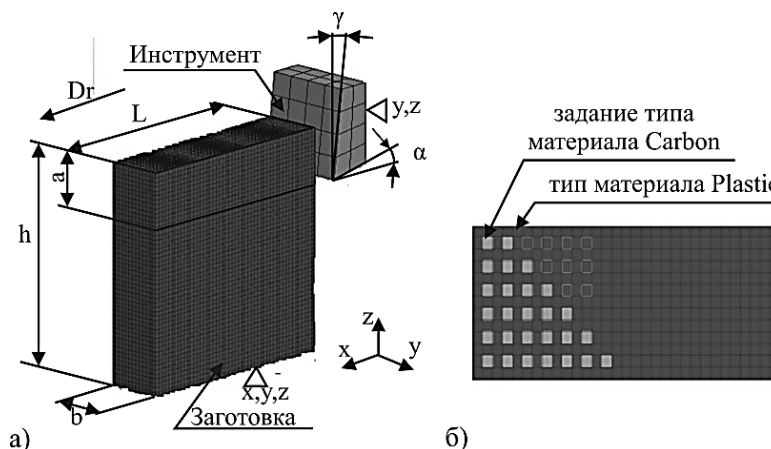


Рис. 3. Расчетная схема модели с граничными условиями и структура КЭ – сетки модели резания:

а – расчетная схема модели с граничными условиями; б – особенности КЭ – сетки модели резания

Граничные условия заданы жестким защемлением заготовки по основанию (рис. 3). На боковых границах заготовки было задано ограничение на перемещение по нормали к ней. Нагрузки были заданы перемещением лезвия со скоростью резания 30 м/мин [2].

Контактное взаимодействие было реализовано моделью \*ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE. На основе анализа работ [5, 7] 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.

Общие физико-механические свойства материалов модели приняты в первом приближении равными справочным данным (табл. 1). Критерий разрушения для углеволокна  $\sigma_l = 2500$  МПа [8]. Уругоупластическое поведение эпоксидной смолы определяли экспериментально путем испытания этого материала на сжатие по ГОСТ 25.503-97. Результаты экспериментов приведены в табл. 1 и табл. 2. Критерий разрушения для эпоксидной смолы  $\varepsilon_p = 0,16$ .

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов [8]

Наименование	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Матрица	1300	45	0,2
Волокно (углеволокно)	1900	422	0,3
Твердый сплав (Т30К4)	9500	350	0,23

Таблица 2

Зависимость логарифмической деформации от напряжений течения

$\sigma$ , МПа	102	232	290	315	335	345	346	348
$\varepsilon_p$	0	0,018	0,054	0,073	0,092	0,112	0,132	0,16

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). 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. 5). 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.

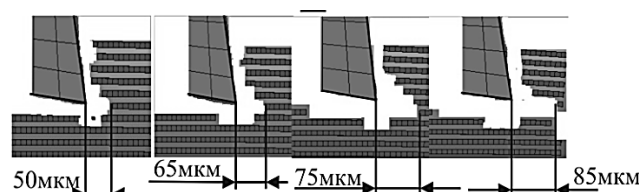


Рис. 4. Динамика формирования опережающей трещины при резании с  $\theta = 0^\circ$

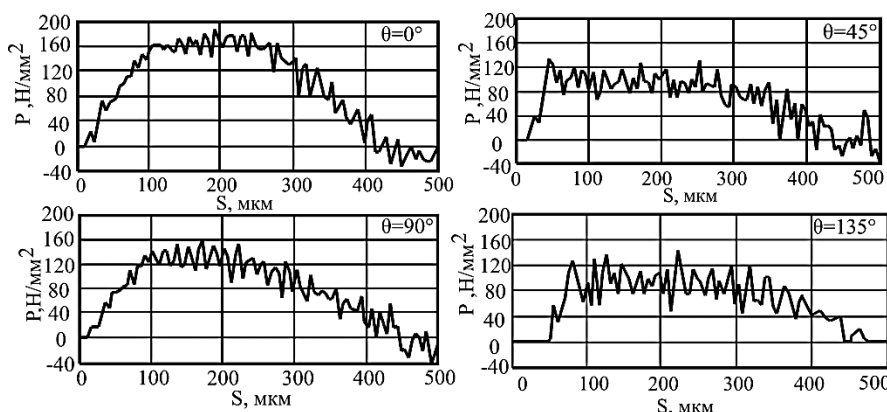


Рис. 5. Графики изменения удельной силы резания при различных углах направленности волокон ВПКМ

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. 5). 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 цикла нагружения. Так как накопления повреждений до разрушения во втором случае больше, то и амплитуда изменения силы больше.

Влияние угла направленности волокон на среднюю силу резания, в целом, повторяют тенденции, выявленные Calzada K, Nayak D. (сравните рис. 2 с рис. 5). Настоящая модель не выявила значительных колебаний силы резания при  $\theta = 90^\circ$ , а значение силы при  $\theta = 90^\circ$  оказалось примерно равным значению силы резания при  $\theta = 0^\circ$ . Все это может быть следствием различия принятых в исследовании свойств обрабатываемого материала.

Модельные эксперименты показали, что стружкообразование сопровождается периодическим разрушением обработанной поверхности (рис. 6 и 7). Хотя период повреждений во всех случаях был 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 поврежденной поверхности соответствует углу направленности волокон  $\theta = 45^\circ$ , обеспечивающему наименьшую силу резания с наименьшей амплитудой (рис. 7).

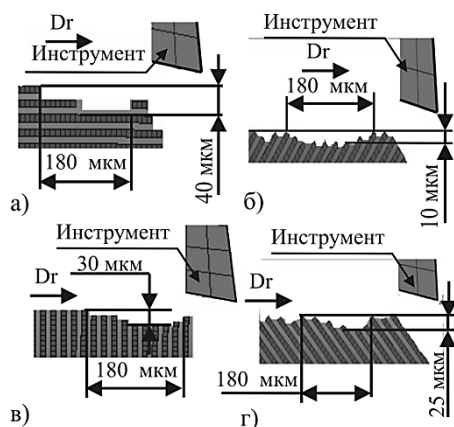


Рис. 6. Повреждения поверхности в зависимости от угла направленности волокон: а –  $\theta = 0^\circ$ ; б –  $\theta = 45^\circ$ ; в –  $\theta = 90^\circ$ ; г –  $\theta = 135^\circ$

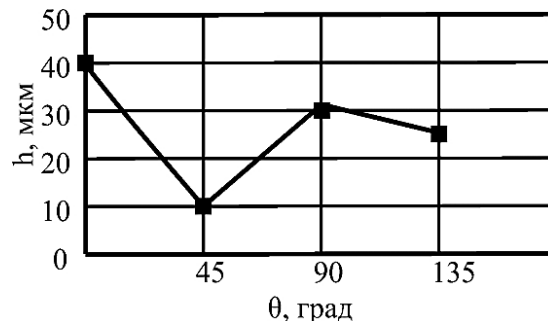


Рис. 7. Влияние угла направленности волокон  $\theta$  на глубину повреждения поверхности  $h$

## ВЫВОДЫ

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

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

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comparison of Tool Effects on Hybrid Laminates after Drilling / Durão L. M., Tavares J. M., Marques A. T. и др. // 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design. – Porto, 2006. – С. 1–14.
2. Wang D. H. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxycomposite. Part I. Unidirectional laminate / D. H. Wang, M. Ramulu, D. Arola // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 1995. – Т. 35. – С. 1623–1638.
3. Sheikh-Ahmad J. Y. Machining of Polymer Composites / J. Y. Sheikh-Ahmad. – Technology & Engineering, 2008. – 230 с.
4. Криворучко Д. В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів : навчальний посібник / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. Г. Корбач. – Суми : Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.
5. Calzada K. Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced composites : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / K. Calzada. – Urbana, 2010. – 129 с.
6. Nayak D. Machining studies of uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composites. Part I. Effect of geometrical and process parameters / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology. – 2005. – Т. 9. – С. 481–501.
7. Nayak D. Machining studies of UD-FRP composites. Part 2. Finite element analysis / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology. – 2005. – Т. 9. – С. 503–528.
8. Schürmann H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff- Verbunden / H. Schürmann. – Berlin : Springer, 2007. – Т. 1. – 679 с.

Статья поступила в редакцию 12.09.2012 г.