

УДК 621.91: 621.763

В. М. Я р о с л а в ц е в

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ СТРУЖКИ ПРИ РЕЗАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВОЛОКНИСТЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Рассмотрены общие закономерности образования стружки и формирования обрабатываемой поверхности при резании полимерных композиционных материалов на основе непрерывных и дискретных стекло-, угле-, боро- и органических волокон. Даны представления о микромеханике деформации и разрушения волокон наполнителя в зоне стружкообразования. Показана связь структуры материала, его физико-механических свойств и условий стружкообразования с качеством обработанной поверхности.

E-mail: 13@bmstu.ru

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, образование стружки, закономерности деформации и разрушения, качество поверхности, ворсистость обработанной поверхности.

Специфическая структура и характерные физико-механические свойства [1] полимерных композиционных материалов (ПКМ) определяют существенные особенности обработки их резанием, отражаются на всех результирующих технологических показателях, а также вызывают необходимость рассматривать ПКМ как особую группу труднообрабатываемых материалов [2, 3]. В свою очередь процесс резания и его результаты (точность обработки и качество поверхностного слоя, производительность, себестоимость, период стойкости режущего инструмента, скорость резания, способность к стружкодроблению и др.) находятся в прямой зависимости от процесса стружкообразования [2].

В настоящей статье рассмотрены общие закономерности образования стружки и формирования обработанной поверхности при резании ПКМ.

Процесс удаления срезаемого слоя в указанных материалах отличается дискретностью и может быть представлен следующими основными стадиями деформирования и разрушения (рис. 1).

В начальный момент внедрения инструмента происходит сжатие обрабатываемого материала, сопровождающееся смятием контактных слоев (рис. 1, а) и увеличением площади контакта инструмента с заготовкой. При этом в области режущей кромки образуется сетка микротрещин, которые вызывают локальное разрыхление связующего и

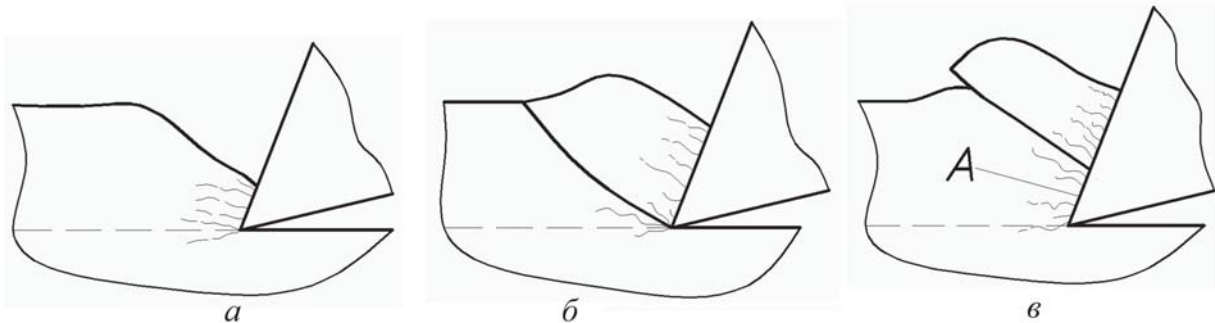


Рис. 1. Схема процесса образования стружки при точении органопластиков:
а, б, в — последовательные стадии стружкообразования

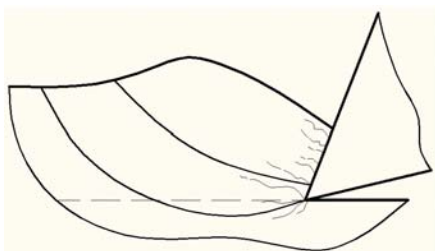


Рис. 2. Одновременное образование двух плоскостей скалывания

создают условия для разрушения срезаемого слоя в целом. По мере увеличения сопротивления деформированию в определенный момент наступает хрупкое разрушение матрицы (рис. 1, *б*) с образованием зоны сдвига (плоскости скалывания).

Разрушение матрицы вызывает перераспределение нагрузки, которая воспринимается армирующими волокнами. Дальнейшее перемещение инструмента приводит к смещению образовавшегося элемента стружки вдоль плоскости скалывания, что обуславливает дополнительное нагружение волокон, пересекающих зону сдвига, нарушение адгезионных связей с матрицей одних волокон и разрушение (разрыв) других, длина которых в образующемся элементе стружки превышает критическую (“длину включения”) для конкретного материала. В процессе смещения элемента стружки одновременно происходит смятие материала срезаемого слоя в области *A* (рис. 1, *в*), что является началом образования нового элемента стружки. Рассмотренный процесс в дальнейшем периодически повторяется. При обработке композитов с арматурой из малопластичных материалов сетка микротрещин в области режущей кромки в некоторых случаях приводит к практически одновременному образованию сразу двух плоскостей скалывания (рис. 2), по которым отделяется последовательно два элемента стружки.

Все стадии удаления срезаемого слоя сопровождаются диспергированием материала, образованием мелких фрагментов связующего с обрывками волокон и пыли.

Сравнивая описанный процесс со стружкообразованием при резании металлов, можно отметить, что во многом он несет в себе признаки образования элементной стружки и одновременно стружки надлома. Вместе с тем отдельные элементы и частицы удаляемого материала, как правило, остаются связанными между собой обрывками волокон наполнителя [4], т.е. стружка сходит в виде непрерыв-

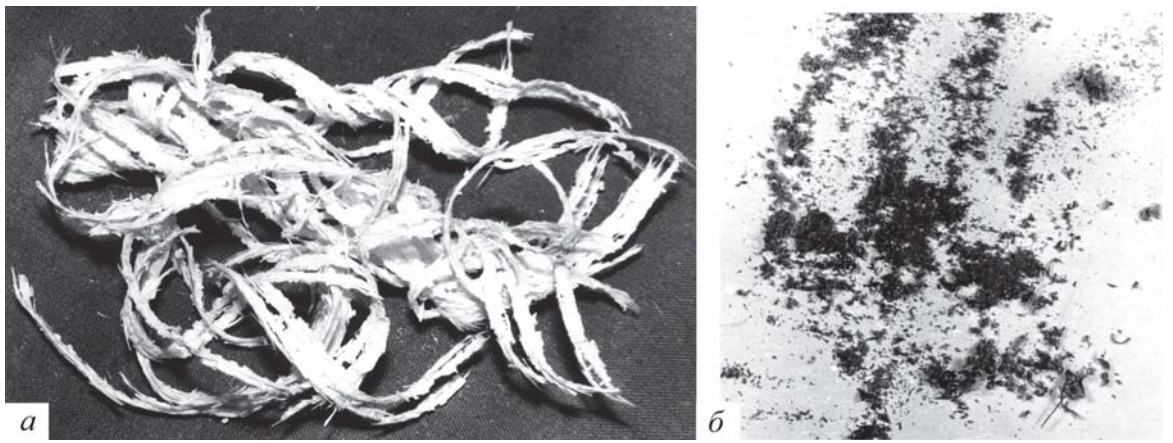


Рис. 3. Вид стружки, типичной для лезвийной обработки ПКМ (а), и образующиеся в процессе стружкообразования мелкие фрагменты композита и пыль (б)

ной ленты (рис. 3, а). Формированию стружки сопутствует образование мелких частиц материала и пыли (рис. 3, б). По мере увеличения ширины площадки износа по задней поверхности инструмента связь между отдельными элементами стружки становится менее прочной. При достижении определенной степени износа стружка начинает распадаться на отдельные мелкие кусочки разной величины. Такой тип стружки характерен для точения, сверления и фрезерования (на длине рабочего участка от точки входа до выхода лезвия инструмента).

Вид стружки, ее геометрические характеристики, степень диспергирования материала срезаемого слоя, динамические и микромеханические процессы в зоне стружкообразования зависят от многих факторов: физико-механических свойств и геометрических характеристик наполнителя, свойств связующего, строения композита, технологического метода и режимных параметров первичного формообразования, расположения волокон относительно направления движения режущего инструмента, режима резания и других условий обработки.

Процесс стружкообразования непосредственно связан с формированием поверхностного слоя обработанной поверхности, от состояния которого зависят качество изделия и его служебные характеристики в целом.

При резании ПКМ с дискретными армирующими волокнами, отличающихся низкой пластичностью (угле-, стеклопластики, композиты марок ДСВ-2-2М-П, РТМ-6 и др.), на обработанной поверхности систематически образуются микротрещины в виде надрезов, направленные примерно перпендикулярно линии среза *a-a* (рис. 4). В этом случае можно говорить о формировании на обработанной поверхности дефектного слоя определенной глубины. Это явление связано с высокими упругими деформациями ПКМ в зоне стружкообразования, особенно в области контакта задних поверхностей инструмента с обрабатываемой заготовкой. Упругое восстановление материала приводит к увеличению площади контакта. На стыке трения развиваются высокие контактные давления и температуры [5] и, как следствие, большие

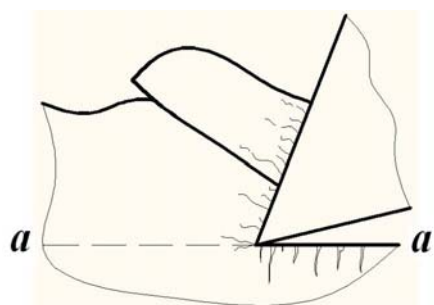


Рис. 4. Образование микротрещин на обработанной поверхности

касательные напряжения в направлении движения резания, способные вызвать разрушение поверхностного слоя материала, испытывающего растягивающие напряжения. Интенсивность протекания рассмотренных процессов зависит от индивидуальных особенностей обрабатываемого композиционного материала.

У некоторых марок композитов (например, ДСВ-2-2М-П) отдельные микротрещины в области режущего лезвия могут развиваться в макротрещины, пронизывающие поверхностный слой материала и расположенные существенно ниже линии среза (рис. 5, *а*). На выходе режущего инструмента такая трещина превращается в магистральную [2], резко уходит за пределы зоны стружкообразования и вызывает скол материала на части обработанной поверхности (рис. 5, *б*).

Размеры образующихся сколов существенно зависят от ряда факторов, в первую очередь, от параметров режима резания, геометрических параметров лезвия и степени износа режущего инструмента. Например, при резании композита марки ДСВ-2-2М-П оптимальными условиями обработки, позволяющими минимизировать размеры сколов (длину, ширину и глубину) на обработанной поверхности при выходе инструмента, являются следующие: 1) режим резания — $v = 1,4 \dots 1,8$ м/с, $S \leq 0,1$ мм/об, $t \leq 1,5$ мм; 2) геометрические параметры резца — $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 20^\circ$, $\varphi = \varphi_1 = 15^\circ$, $r = 1$ мм; 3) критерий затупления инструмента — размер фаски износа по задней поверхности $h_3 \leq 0,4$ мм.

Процесс стружкообразования при резании ПКМ, армированных непрерывными волокнами, может иметь существенные отличия. Это особенно наглядно проявляется при обработке композиционных материалов на основе органических волокон — арамидных полимеров (Армос, СВМ, Терлон и др.) и полиэтилена.

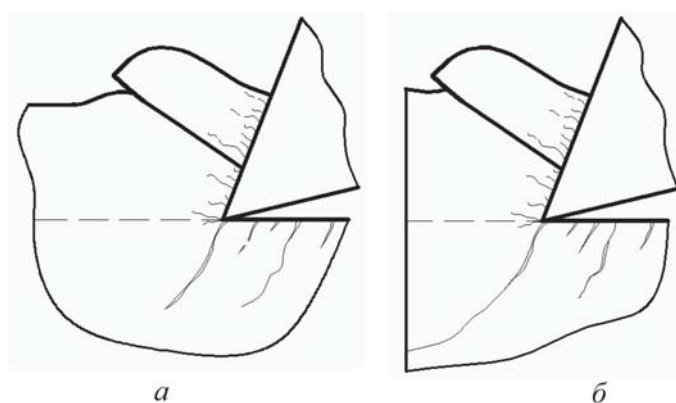


Рис. 5. Образование макротрещин на обработанной поверхности (*а*) и сколов материала (*б*) на выходе режущего инструмента

Органические волокна отличаются высокой удельной прочностью, сравнительно хорошей пластичностью (предельной деформацией), но совмещаются с полимерными связующими хуже, чем стеклянные, углеродные или борные волокна. Адгезионная связь органических волокон со связующим веществом является менее прочной. Это обстоятельство отражается на микромеханике процессов деформирования и разрушения в зоне стружкообразования, оказывает большое влияние на качество обработанной резанием поверхности, в том числе непосредственно связано с механизмом образования ворса на поверхности изделия после механической обработки.

Качество обработанной поверхности определяется условиями перерезания армирующих волокон и разрушения матрицы КМ на линии среза, т.е. на траектории перемещения режущих кромок инструмента. На стадии образования в зоне резания поверхности скола и последующего смещения нового элемента стружки вдоль этой поверхности (см. рис. 1, б) происходит непрерывное увеличение нагрузки на органическое волокно, при этом часть их разрушается. Микромеханика разрушения органических волокон носит сложный микрофибриллярный характер, когда в процессе нагружения волокно расщепляется на тончайшие, расположенные параллельно друг другу вдоль одной оси нитевидные структуры (микрофибриллы) с последующим обрывом отдельных структурных элементов.

До момента разрыва волокно под действием растягивающих напряжений деформируется в продольном и поперечном направлениях, что вызывает нарушение адгезионной связи его со связующим веществом. Таким образом, перерезание волокон, расположенных под углом к поверхности резания, будет сопровождаться изменением структуры наружного слоя формирующейся при обработке поверхности. В результате локального расслоения наполнителя и связующего образуется дефектный, относительно рыхлый слой с пониженными физико-механическими свойствами. При интенсификации режима обработки на поверхности могут наблюдаться вырывы — участки с отслоившимся связующим, потерявшим связь с волокнами наполнителя.

Разрушение отдельных волокон происходит в местах так называемых слабых точек (поры, поврежденные элементы полимерной цепи и др.). Дефекты структуры наблюдаются не только на поверхности, но и внутри органического волокна. При растяжении органическое волокно на определенной стадии нагружения расщепляется в продольном направлении на микрофибриллы, которые при увеличении нагрузки разрываются на разных уровнях по длине волокна в наиболее слабых сечениях. В результате разорванное волокно дает пучок микрофибрилл разной длины. Часть таких разрушенных в зоне резания волокон будет располагаться ниже линии среза, в наружном слое обработанной поверхности. От них зависит уровень дефектности поверхностного слоя



Рис. 6. Вид поверхности ПКМ, армированного непрерывными органическими волокнами “Вискоза-77”, после обработки обтачиванием

микрофибриллы в осевом сечении нити, а также могут отщепиться микрофибриллы с поверхности нити. После разгрузки зоны резания выступающие волокна и микрофибриллы проявляются в виде так называемой ворсистости обработанной поверхности (рис. 6), удаление которой представляет, как правило, большую проблему при механической обработке органопластиков резанием [2].

В зоне стружкообразования разрушаются не все органоволокна, а только те, у которых прочность адгезионных связей со связующим выше, чем прочность при растяжении. При недостаточной силе адгезии (если длина волокна меньше критической) армирующее волокно под действием силовых факторов вытягивается из связующего. Этому в значительной степени способствует диспергирование связующего в зоне стружкообразования. Уцелевшие таким образом волокна после воздействия на них режущего инструмента образуют на обработанной поверхности изделия ворс подобно органоволоконам, разрушенным в зоне обработки выше линии среза.

Одним из факторов, способствующих образованию ворса на обработанной поверхности изделия, является дискретный характер процесса стружкообразования, что обуславливает вынужденные колебания силы резания и вызывает относительные перемещения инструмента и заготовки (динамическая неустойчивость процесса резания). Перерезание армирующих волокон на разных уровнях от обработанной поверхности или поверхности резания создает дополнительные условия для формирования ворсистости.

При неблагоприятных условиях обработки действие силы трения на задней поверхности инструмента приводит к смещению элементарных объемов материала поверхностного слоя в направлении движения резания, что вызывает образование микротрещин (надрезов) на поверхности изделия. Направление таких надрезов, как правило, совпадает с направлением пучков волокон, пересекающих под углом

изделия. Другие волокна разрушаются выше линии среза и испытывают в зоне резания дополнительное воздействие режущего клина. В процессе перемещения контактные поверхности инструмента прижимают выступающие волокна к формируемой поверхности заготовки и сплющивают их. Однако, при поперечном сжатии органоволокон они остаются в основном не разрушенными в поперечном направлении, но образуют новые

линию среза. Образованию микротрещин способствуют высокая прочность органоволокон при растяжении, относительно слабая связь с матрицей, высокие упругие свойства композита, большое число выступающих фибрилл, образующих ворс. По характеру обработанной поверхности можно судить как о прочности самих волокон, так и о качестве адгезионной связи на поверхности раздела волокно–матрица.

Процесс формирования поверхностного слоя при резании стекло-, угле- и боропластиков, армированных непрерывными волокнами, характеризуется теми же стадиями, что и резание органопластиков. Вместе с тем наличие относительно хрупких армирующих волокон позволяет получить после обработки поверхность, лишенную ворса, т.е. основная доля волокон подвергается локальному разрушению по линии среза. Хрупкому разрушению способствует также высокая адгезионная прочность связи угольных, стеклянных и борных волокон с матрицей при воздействии на них режущих кромок инструмента.

Учет особенностей процесса стружкообразования при резании разных видов ПКМ позволяет во многих случаях находить эффективные и обоснованные решения практических задач при изготовлении изделий из таких (рассмотренных и подобных им) материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о м к о в М. А., Т а р а с о в В. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
2. Я р о с л а в ц е в В. М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. “Композиционные материалы, конструкции и технологии”. – 2005. – С. 41–62.
3. С т е п а н о в А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
4. Я р о с л а в ц е в В. М. Обработка резанием полимерных композиционных материалов: Учеб. пособие по курсу “Перспективные технологии реновации”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 182 с.
5. Я р о с л а в ц е в В. М. Влияние температурного фактора на усилие резания композиционных материалов на основе органоволокон // Труды МВТУ “Применение пластмасс в машиностроении”, 1981. – № 18. – С. 11–16.

Статья поступила в редакцию 22.02.2012

Виктор Михайлович Ярославцев родился в 1937 г., окончил в 1960 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 270 научных работ в области теории резания, технологии производства летательных аппаратов, разработки новых методов обработки композиционных и труднообрабатываемых материалов.

V.M. Yaroslavtsev (b. 1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1960. D. Sc. (Eng.), professor of “Technologies of Treatment of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 270 publications in the field of theory of cutting, technology of production of flying vehicles, development of new methods for treatment of composite and churlish materials.

