

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.М. Ярославцев

mt13@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана высокоэффективные технологические методы интенсификации процессов резания полимерных композиционных материалов — сверхскоростной, широких срезов и с предразрушением материала срезаемого слоя. Такие методы позволяют многократно уменьшать основное (технологическое) время, способствуя значительному увеличению производительности труда, при этом существенно повышаются точность изготовления и качество обработанных поверхностей. Подобные технологические эффекты обеспечиваются целенаправленным изменением энергетического состояния материала, применением комбинированных энергетических воздействий, использованием физических закономерностей процесса резания с учетом особенностей обрабатываемого материала. При резании с предразрушением срезаемого слоя повышение точности обработки обеспечивается малыми значениями силы резания и корректным выбором направления приложения силы дополнительного устройства, действующего на срезаемый слой. При широколезвийной обработке значительное увеличение периода стойкости инструмента способствует повышению точности, в то время как формирование всех обработанных поверхностей главной режущей кромкой инструмента обеспечивает малые значения параметра шероховатости

Ключевые слова

Обработка резанием, полимерные композиционные материалы, высокоскоростная обработка, метод широких срезов, резание с предразрушением, высокопроизводительная обработка, качество обработки

Поступила в редакцию 06.02.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Композиционные материалы (КМ) обладают уникальной возможностью целенаправленного регулирования свойств, что позволяет создавать конструкции или отдельные их элементы с заданными характеристиками [1–6]. В технологическом процессе изготовления изделий из КМ, как правило, конечными, завершающими операциями служат различные виды механической обработки резанием [1–3, 5–9], от которых во многом зависит реализация конструктивных свойств, заложенных в КМ. Конструктивные особенности, специфика структуры, физико-механических и технологических свойств выделяют КМ как объект обработки резанием в особую группу труднообрабатываемых материалов [1–3, 10]. Основными задачами при разработке и внедрении технологических процессов изготовления изделий из КМ являются обеспечение высокой производительности обработки и необхо-

димого качества продукции [1–9]. Во многих случаях решение таких задач требует создания качественно новых способов и средств обработки резанием [1–4, 6, 9, 11].

В настоящей работе приведены результаты исследований, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и направленных на повышение производительности процесса резания с учетом обеспечения необходимого качества изготовления изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Интенсификация процесса резания как один из основных элементов увеличения производительности труда решается двумя путями: повышением скорости резания и увеличением сечения срезаемого слоя.

Вместе с тем к специфическим свойствам ПКМ относится их низкая термостойкость. При температурах более 250...350 °С происходит интенсивная термодеструкция — химическое разложение полимерного связующего КМ, которое сопровождается выделением газов. Это приводит к резкому ухудшению свойств материала, появлению прижогов и большого по толщине дефектного слоя [2, 3, 7, 12]. Поэтому при обработке ПКМ режимные параметры и в первую очередь скорость резания назначают из условия отсутствия термоокислительной деструкции материала, что считают одним из обязательных требований обеспечения качества поверхностного слоя изделия. Низкие температуры начала протекания термодеструкции ПКМ в сочетании с крайне низкой их теплопроводностью (в 100–600 раз меньше, чем у конструкционных сталей) вызывают необходимость назначать на операциях механической обработки малые скорости резания, не превышающие критические значения, при которых уровень деструкции материала становится недопустимым, что существенно ограничивает производительность обработки.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнены исследования возможности обработки ПКМ в широком диапазоне скоростей резания, включая интервалы скоростной и сверхскоростной обработок.

Экспериментальные исследования изменения качества обработки ПКМ в широком диапазоне скоростей резания проводили на лабораторной установке с повышенным числом оборотов обрабатываемой заготовки [3, 13], выполненной на базе универсального токарно-винторезного станка модели 16К20. Увеличение предельных значений чисел оборотов установки обеспечивали за счет встроенного мультипликатора (рис. 1). Мультипликатор связывает вращение шпинделя станка с вращением опытного образца и представляет собой двухступенчатую плоскоремennую передачу с передаточным отношением 9 : 1. Таким образом достигается регулирование частоты вращения образца в интервале чисел оборотов от 112,5 до 18 000 мин⁻¹, что, в свою очередь, позволило при проведении исследований образцов из органопластика Вискоза-77 диаметром 125 мм обеспечить изменение скорости резания от 0,74 до 118 м/с в условиях различных сочетаний глубины резания и подачи.

Для изучения процесса термического разрушения химических связей полимерного связующего применяли фотометрическую установку, основанную на методе динамического спектроскопирования светового потока, отраженного от

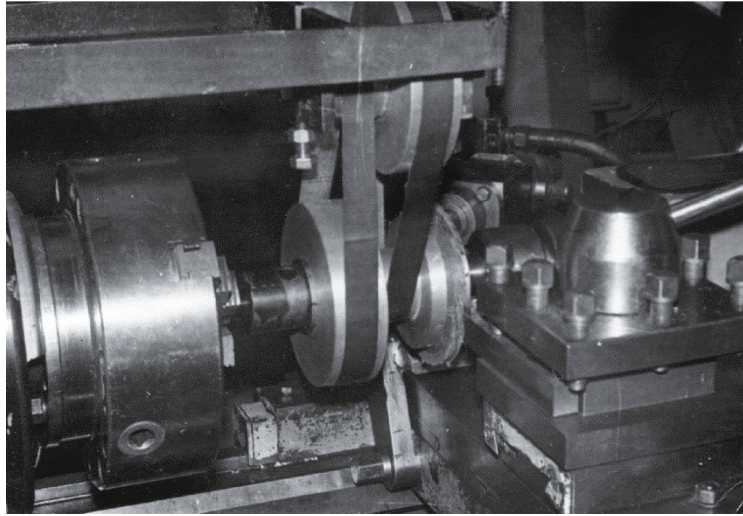


Рис. 1. Общий вид лабораторной установки для исследования процесса резания ПКМ в широком диапазоне скоростей обработки

поверхности изделия, и позволяющую оценивать деструкцию D поверхностного слоя материала непосредственно в ходе процесса резания [14, 15]. В основе принципа действия установки лежит физическое явление изменения оптических свойств поверхности, подвергшейся термической деструкции. Меру термической деструкции D оценивали термогравиметрическим методом [16], который основан на замерах изменения массы деструктированного образца в результате определенных температурных воздействий.

На рис. 2 приведена полученная опытным путем зависимость меры деструкции D в интервале скоростей $v = 4 \dots 100$ м/с. Как видно, изменение термической деструкции от скорости резания имеет экстремальный характер. Увеличение скорости резания сопровождается снижением продолжительности контакта задней поверхности инструмента с обработанной поверхностью заготовки, т. е. сокраща-

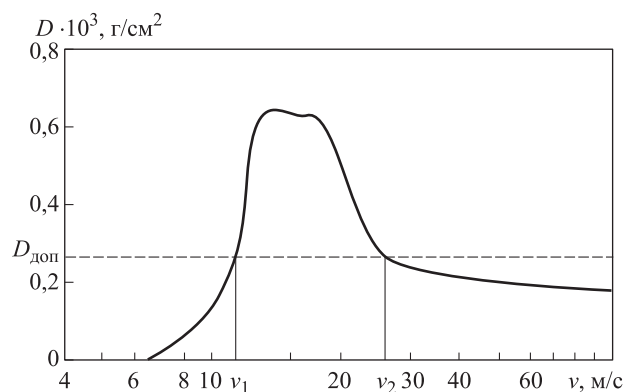


Рис. 2. Зависимость изменения степени деструкции D от скорости резания v при подаче $S_0 = 0,12$ мм/об и глубине резания $t = 1$ мм

ется время воздействия температуры резания, и процесс термодеструкции обрабатываемого материала не успевает протекать в полной мере. Начиная с некоторого значения v , соответствующего максимуму функции $D = f(v)$, эффект уменьшения времени контакта инструмента с обработанной поверхностью изделия начинает сказываться сильнее, чем продолжающееся повышение температуры резания, что и объясняет характер кривой $D(v)$.

Если принять за допустимую величину деструкции $D_{\text{доп}}$ ее значение, при котором на глубине $t = 2$ мкм обработанной поверхности не фиксируются изменения структуры обрабатываемого материала, то на кривой $D = f(v)$ (см. рис. 2) при заданных условиях обработки можно выделить два критических значения скорости резания: $v_1 = 10,8$ м/с и $v_2 = 26$ м/с. Следовательно, существует два диапазона скоростей резания, где обеспечивается качество обработанной поверхности: $v < v_1$ — обычное резание и $v > v_2$ — закритическая сверхскоростная обработка резанием.

Установленная опытным путем возможность сверхскоростной обработки позволяет значительно (более 10 раз) интенсифицировать процесс резания при изготовлении изделий из ПКМ. Применение этого метода ограничивается техническими возможностями оборудования, большими габаритными размерами обрабатываемого изделия (инерционными силами) или недостаточной жесткостью заготовки.

Для интенсификации процесса резания ПКМ путем увеличения сечения срезаемого слоя в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод широких срезов (МШС) [3, 17, 18], при котором припуск на обработку удаляется с заготовки инструментом, длина главной режущей кромки которого составляет 100...300 мм и более. Инструмент в этом случае на операции точения работает с поперечной подачей по тангенциальной (рис. 3) или радиальной схемам фасонной обработки.

Метод широких срезов используют для обработки изделий из стекло-, угле- и органопластиков, удельные силы резания которых (удельное давление резания, сила на единицу длины режущей кромки) существенно (в 10–60 раз) меньше, чем при обработке металлов. Скорость резания в этом случае выбирают из рекомендаций для обычной обработки, подачу — исходя из точности с учетом деформаций технологической системы. Применение метода наиболее эффективно в условиях серийного и массового производств.

Метод позволяет обрабатывать протяженные части поверхности (см. рис. 3), в отдельных случаях — одновременно все подлежащие формообразованию поверхности изделия, состоящие из участков разной конфигурации и имеющих разные требования к обработанной поверхности по точности. Это дает возможность значительно, в 100–200 раз и более, интенсифицировать процесс удаления припуска на обработку, до 10–20 раз и более увеличить производительность труда на операции механической обработки изделия.

Наряду с повышением производительности, МШС обеспечивает и высокое качество обработанных поверхностей за счет того, что в отличие от контурного

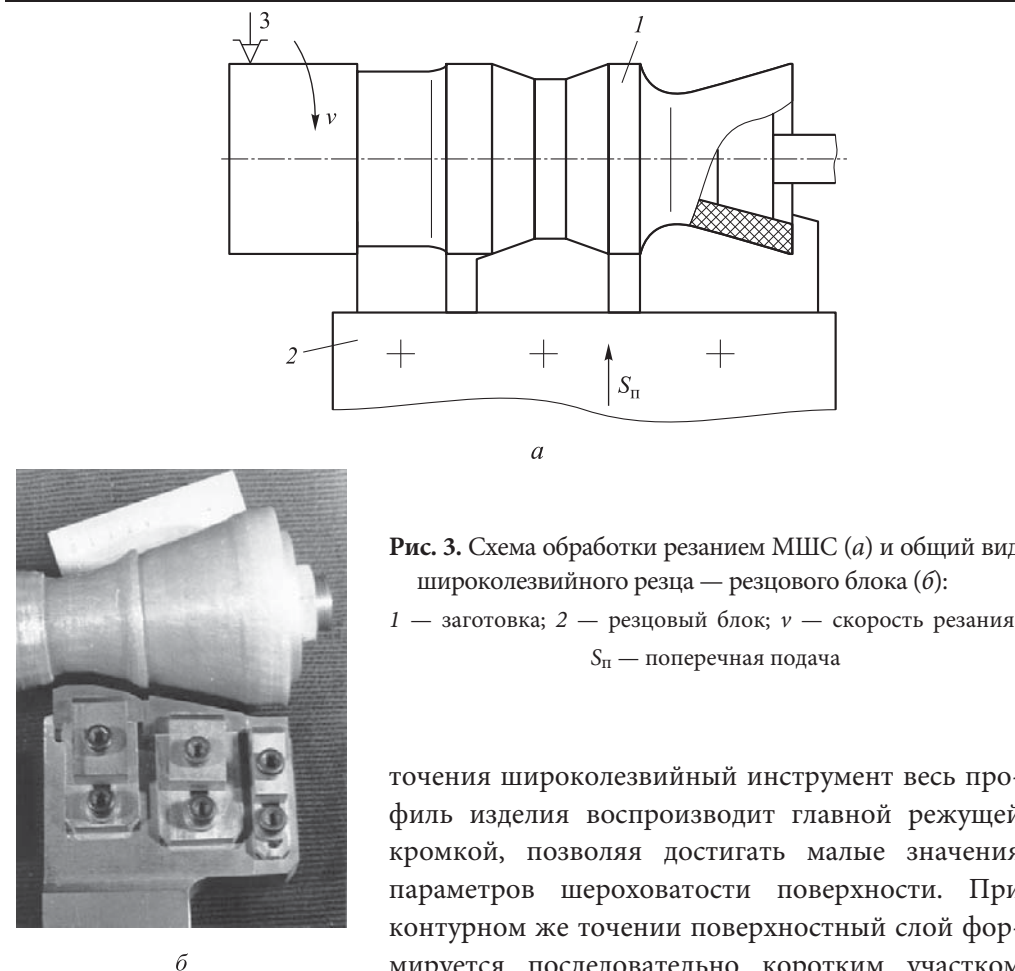


Рис. 3. Схема обработки резанием МШС (а) и общий вид широколезвийного резца — резцового блока (б):
 1 — заготовка; 2 — резцовый блок; v — скорость резания;
 $S_{п}$ — поперечная подача

точения широколезвийный инструмент весь профиль изделия воспроизводит главной режущей кромкой, позволяя достигать малые значения параметров шероховатости поверхности. При контурном же точении поверхностный слой формируется последовательно коротким участком вспомогательной режущей кромки инструмента, что снижает точность и увеличивает шероховатость обработанной поверхности.

Многokратное уменьшение (в 100 раз и более) длины пути резания при изготовлении каждой детали радикально, примерно в соответствующее число раз, увеличивает период стойкости режущего инструмента и, соответственно, позволяет получать большие партии деталей одного наименования, мало отличающиеся по конфигурации и точности изготовления. Таким образом, МШС, предназначенный для повышения производительности труда при изготовлении изделий из ПКМ, реализует высокие характеристики по ряду и других важнейших результирующих показателей обработки.

Вместе с тем применение МШС может ограничиваться техническими возможностями оборудования или заданными технологическими показателями процесса. Так, практическая реализация метода неизбежно связана с многократным увеличением силы резания. При этом одним из важнейших условий, особенно при изготовлении мало жестких деталей, является обеспечение требуемой точности изделия. Возникающие под действием сил резания упругие деформации и связанные с ними погрешности обработки поверхностей часто

проявляются как наиболее жесткое ограничение интенсификации процесса резания или применения метода в целом.

В этом случае задача интенсификации процесса механической обработки с применением МШС решается на основе разработки рациональной структуры операции и режимов резания (подачи), обеспечивающих при заданной точности обработки максимальную производительность. Показано [17, 18], что лимитирующие участки обрабатываемых поверхностей целесообразно обрабатывать отдельно, за счет дополнительных проходов инструмента на щадящих режимах резания. Количественный анализ конкретной технологической задачи обработки резанием изделия из ПКМ позволяет выявить наиболее рациональные варианты операции, а также выполнить предварительный расчет режимов, обеспечивающих с учетом требований к точности обработки максимально допустимую интенсификацию процесса резания.

Одним из средств повышения эффективности процесса резания при обработке КМ является применение метода резания с предразрушением материала срезаемого слоя [4, 10, 19], при использовании которого режущим инструментом срезается материал с целенаправленно измененным энергетическим состоянием [19, 20] за счет предварительного механического воздействия на поверхность резания дополнительным источником энергии (рис. 4). В качестве такого источника энергии используют разные методы поверхностного пластического деформирования (ППД), например накатывание цилиндрическим (рис. 4, а) или рифленным роликами, выглаживание, чеканку, центробежную или ультразвуковую обработку и др. При этом достигается частичное разрушение матрицы ПКМ, в объеме материала срезаемого

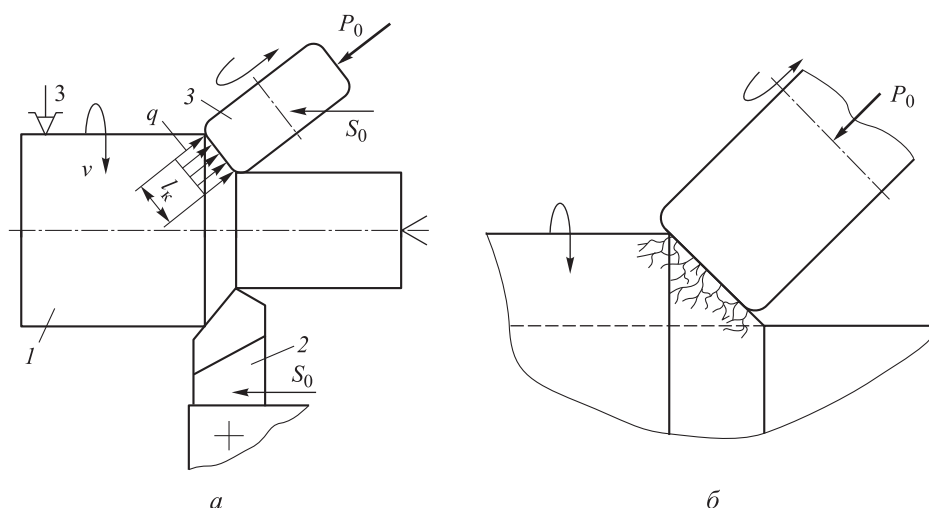


Рис. 4. Схема точения с предразрушением материала срезаемого слоя (а) и характер разрушения поверхности резания при воздействии силы P_0 нагружающего устройства (б): 1 — заготовка; 2 — режущий инструмент; 3 — накатной ролик; q — линейная нагрузка дополнительного устройства на срезаемый слой ($q = P_0 / l_k$, где P_0 — сила воздействия накатного ролика; l_k — длина контакта рабочего участка ролика и заготовки)

слоя формируется развитая сетка микро- и макротрещин (рис. 4, б), вызывающих снижение его механических характеристик и, как следствие, уменьшение силы и температуры резания, что способствует значительному повышению обрабатываемости материала резанием [20, 21].

На рис. 5 приведены результаты экспериментального исследования изменения силы резания и периода стойкости инструмента с увеличением дополнительной механической нагрузки q на срезаемый слой материала при обтачивании цилиндрических заготовок диаметром 150...180 мм из стеклопластика тканевой намотки марки СТК-114 на токарном станке модели 16К20. Заготовки обрабатывали резцами с пластинами из твердого сплава ВК3М ($\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 20^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 30^\circ$; $r = 1$ мм) на режимах резания $v = 1,5...1,7$ м/с; $S_0 = 0,3$ мм/об; $t = 2$ мм. Механическое воздействие на срезаемый слой осуществляли в процессе резания путем накатывания поверхности резания цилиндрическими роликами (гладким или рифленным) диаметром 70 мм из закаленной до HRC = 50...52 стали 40Х. Рифленный ролик имел на рабочей цилиндрической поверхности рифли треугольной формы с углом при вершине 90° и высотой 0,7 мм. Силу накатывания P_0 на заготовку обеспечивали специальным гидравлическим накатным устройством, расположенным на дополнительном суппорте станка с противоположной от резца стороны заготовки (см. рис. 4, а).

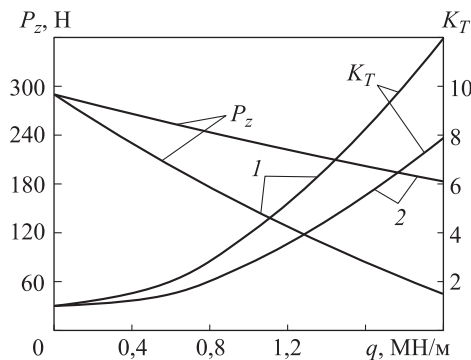


Рис. 5. Зависимость главной составляющей силы резания P_z и коэффициента относительного изменения периода стойкости режущего инструмента $K_T = T_0 / T$ от линейной нагрузки q при накатывании рифленным (1) и гладким (2) роликами (T и T_0 — периоды стойкости инструмента при обычном резании и с предразрушением)

На графиках (см. рис. 5) видно, что увеличение нагрузки предразрушения от 0 до 2 МН/м при применении гладкого и рифленного роликов увеличивает в 8 и 12 раз период стойкости инструмента, что позволяет при неизменной (нормативной) стойкости инструмента за счет повышения скорости резания увеличить в 2,5–3,3 раза производительность процесса. Повышенная обрабатываемость материала при накатывании рифленным роликом [19, 20] определяется более интенсивной механической деструкцией материала и соответствующим снижением силы резания по сравнению с применением гладкого накатного ролика при равных нагрузках q (см. рис. 5). Линейную нагрузку дополнительного механического воздействия на материал в случае токарной обработки рекомендуется принимать такой, при которой главная составляющая силы резания $P_z = 10...20$ % ее значения при обычном резании. Дальнейшее увеличение нагрузки может вызвать

ухудшение параметров обработанной поверхности — повышение шероховатости, волнистости, появление расслоений поверхностного слоя. При $v = 1,5 \dots 2,1$ м/с; $S_0 = 0,1 \dots 0,7$ мм/об и $t = 1 \dots 3$ мм и соответствующей коррекции нагрузки q на срезаемый слой эффективность метода оценивается показателями, близкими к приведенным на рис. 5.

Экспериментальные исследования периода стойкости инструмента, выполненные для случаев точения заготовок из стеклопластиков с хрупкой матрицей АГ-4С, СВМ 1:1 и углепластиков КМУ-4л-2М, ВКУ-25, показали результаты, аналогичные приведенным ранее. Высокая эффективность метода резания с предразрушением срезаемого слоя (повышение периода стойкости инструмента и производительности обработки) реализована также при наружном точении отличающихся низкой пластичностью и высокими абразивными свойствами песчано-полимерных оправок для намотки крупногабаритных корпусных изделий из ПКМ [3].

Рассмотренные технологические решения относятся к таким направлениям улучшения обрабатываемости резанием, как целенаправленное изменение энергетического состояния материала, применение комбинированных энергетических воздействий, использование физических закономерностей процесса резания с учетом особенностей обрабатываемого материала. Выполненные исследования МШС, методов резания с предразрушением срезаемого слоя и сверхскоростного резания показали, что при механической обработке ПКМ они являются эффективным средством интенсификации процесса резания и увеличения периода стойкости режущего инструмента без снижения качества обработанной поверхности. В ряде случаев названные методы позволяют наряду с повышением производительности обработки существенно повысить качество обрабатываемых изделий, например точность, за счет уменьшения размерного износа инструмента (МШС) или в результате снижения упругих деформаций технологической системы путем управления направлением приложения силы дополнительного нагружающего устройства (резание с предразрушением).

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов К.В., ред. Машиностроение. Т. III-3. Технология изготовления деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 840 с.
2. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1987. 176 с.
3. Ярославцев В.М. Обработка резанием полимерных композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 180 с.
4. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов // Наука и образование: научное издание. 2012. № 4.
DOI: 10.7463/0412.0361759
5. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2015. Т. 17. № 2. С. 30–40.

6. Залога В.А., ред. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов: аналитический обзор. Сумы: Университетская книга, 2013. 272 с.
 7. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гири Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12
 8. Ярославцев В.М., Гусенко А.Ю., Якушева С.А., Сайкин В.В. Исследование процесса механической обработки деталей из стеклонанополненного полиамида ПА6-211-ДС // Вопросы оборонной техники. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 1989. № 8 (215). С. 7–9.
 9. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Повышение эффективности применения лезвийного инструмента при обработке композиционных неметаллических материалов // Проблемы механики современных машин. Т. 2. Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2015. С. 205–210.
 10. Ярославцев В.М. Влияние деформационной структурной анизотропии обрабатываемых материалов на силу резания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1976. № 12. С. 156–159.
 11. Ярославцев В.М. Новые технологии повышения качества поверхностного слоя при резании волокнистых полимерных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 6. С. 79–88. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-79-88
 12. Шур А.М. Высокомолекулярные соединения. М.: Высшая школа, 1981. 656 с.
 13. Ярославцев В.М. К вопросу о возможности применения высокоскоростной обработки полимерных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 59–70. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-3-59-70
 14. Ярославцев В.М., Назаров Н.Г. Устройство для определения начала наступления термической деструкции полимерных композиционных материалов и пластмасс при их обработке резанием. Патент РФ 132199 U1. Заявл. 02.04.2013, опубл. 10.09.2013.
 15. Ярославцев В.М., Мирсков А.Н. Фотометрическая установка для определения величины термической деструкции полимерных материалов при обработке резанием // Наука и образование: научное издание. 2013. № 9. DOI: 10.7463/0913.0591230
 16. Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 526 с.
 17. Ярославцев В.М., Мирсков А.Н. Метод широких срезов как средство интенсификации процесса резания // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1992. № 1. С. 41–51.
 18. Мирсков А.Н., Есаков С.А., Михайлов М.М. Определение прогибов заготовок из полимерных материалов при точении фасонными резцами // Вопросы оборонной техники. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 1989. № 1 (208). С. 12–16.
 19. Ярославцев В.М., Цуканов В.Н. Точение стеклопластиков с предразрушением срезаемого слоя // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1989. № 3. С. 122–126.
 20. Ярославцев В.М. Новая характеристика обрабатываемости металлов резанием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1989. № 5. С. 144–148.
 21. Ярославцев В.М. Технологический процесс — энергетический преобразователь // Наука и образование: научное издание. 2012. № 7. DOI: 10.7463/0712.0414854
- Ярославцев Виктор Михайлович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ярославцев В.М. Методы интенсификации обработки полимерных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 6. С. 60–71. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-6-60-71

INTENSIFICATION TECHNIQUES FOR POLYMER COMPOSITE MATERIAL PROCESSING

V.M. Yaroslavtsev

mt13@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents highly efficient manufacturing techniques for intensifying machining of polymer composite materials: high-speed machining, wide-cut method and cutting with preliminary damage to the chip. Such techniques greatly decrease process time, significantly improving labour productivity. Along with enhancing performance we considerably improve manufacturing precision and finish quality of surfaces. We achieve this by purposefully altering the energy state of the material, applying combined power effects and exploiting physical principles of the machining process taking into account the specifics of the material. In the case of cutting with preliminary damage to the chip, an increase in machining precision is ensured by using a low cutting force and correctly selecting the direction in which the additional device affecting the chip applies its pressure. In the case of wide-edge processing, a considerable increase in tool lifetime helps to improve precision, while using the main cutting edge of the tool to shape all work surfaces ensures low roughness

Keywords

Machining, polymer composite materials, high-speed processing, wide cut method, cutting with preliminary damage, high-performance processing, machining quality

Received 06.02.2018
© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Frolov K.V., ed. Mashinostroenie. Vol. III-3. Tekhnologiya izgotovleniya detaley mashin [Machine engineering. Vol. III-3. Production technology for machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 840 p.
- [2] Stepanov A.A. Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh materialov [Cutting processing of high-strength composites]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 176 p.
- [3] Yaroslavtsev V.M. Obrabotka rezaniem polimernykh kompozitsionnykh materialov [Cutting processing of polymer composites]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 180 p.
- [4] Yaroslavtsev V.M. High efficiency technologies of machining of products made of composite materials. *Nauka i Obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publications], 2012, no. 4 (in Russ.). DOI: 10.7463/0412.0361759
- [5] Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Research problems machining high strength composite materials used for the production of details of aviation and space-rocket technicians. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science], 2015, vol. 17, no. 2, pp. 30–40 (in Russ.).

- [6] Zaloga V.A., ed. *Mekhanicheskaya obrabotka kompozitsionnykh materialov pri sborke letatel'nykh apparatov: analiticheskiy obzor* [Machining of composites in process of aircraft assembling: analytical review]. Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2013. 272 p.
- [7] Raskutin A.E., Khrul'kov A.V., Girsh R.I. Technological features of composite materials machining in manufacturing details of structures (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 9 (45) (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12
- [8] Yaroslavtsev V.M., Gusenko A.Yu., Yakusheva S.A., Saykin V.V. Research on machining process of the parts made of glass-nylon composite PA6-211-DS. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroenii*, 1989, no. 8 (215), pp. 7–9 (in Russ.).
- [9] Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. [Improve the application of the cutting tool during processing of composite non-metallic materials]. *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin. T. 2* [Problems of modern machine mechanics. Vol. 2]. Ulan-Ude, ESSUTM Publ. 2015, pp. 205–210 (in Russ.).
- [10] Yaroslavtsev V.M. Effect of deformational structural anisotropy of treated materials on cutting strength. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 1976, no. 12, pp. 156–159 (in Russ.).
- [11] Yaroslavtsev V.M. New technologies for surface layer quality improvement in cutting fibrous polymer composite materials. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostroy.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2017, no. 6, pp. 79–88 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-79-88
- [12] Shur A.M. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [High-molecular compositions]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 656 p.
- [13] Yaroslavtsev V.M. Revisiting the possibility of highspeed polymer composite processing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostroy.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 3, pp. 59–70 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-3-59-70
- [14] Yaroslavtsev V.M., Nazarov N.G. *Ustroystvo dlya opredeleniya nachala nastupleniya termicheskoy destruktzii polimernykh kompozitsionnykh materialov i plastmass pri ikh obrabotke rezaniem* [Device for defining the beginning of composites and plastics thermal destruction in their cutting processing]. Patent RF 132199 U1. Appl. 02.04.2013, publ. 10.09.2013.
- [15] Yaroslavtsev V.M., Mirskov A.N. Photometrical equipment for determining the value of thermal decomposition of polymer materials during machining. *Nauka i Obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publications], 2013, no. 9 (in Russ.). DOI: 10.7463/0913.0591230
- [16] Wendlandt W.W. *Thermal methods of analysis*. Wiley, 1974. 505 p.
- [17] Yaroslavtsev V.M., Mirskov A.N. Wide cut-off method as a way to intensify cutting process. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems], 1992, no. 1, pp. 41–51 (in Russ.).
- [18] Mirskov A.N., Esakov S.A., Mikhaylov M.M. Definition of polymer blank part bending in grinding by forming cutters. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroenii*, 1989, no. 1 (208), pp. 12–16 (in Russ.).
- [19] Yaroslavtsev V.M., Tsukanov V.N. Grinding of fiberglass prefracture of cut-off layer. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 1989, no. 3, pp. 122–126 (in Russ.).

[20] Yaroslavtsev V.M. New characteristics of metal machinability by cutting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 1989, no. 5, pp. 144–148 (in Russ.).

[21] Technological process as an energy conversion device. *Nauka i Obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publications], 2012, no. 7 (in Russ.).

DOI: 10.7463/0712.0414854

Yaroslavtsev V.M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Material Processing Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Yaroslavtsev V.M. Intensification Techniques for Polymer Composite Material Processing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 6, pp. 60–71 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-6-60-71



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
Е.А. Власовой, В.С. Зарубина, Г.Н. Кувыркина

**«Математические модели процессов
теплопроводности»**

Изложены сведения, составляющие содержание раздела «Математические модели тепловых систем» курса «Математические модели технических систем». Приведены примеры решения задач, а также контрольные вопросы и задачи для самостоятельной работы студентов. Часть задач может служить основой для проведения студентами самостоятельной научно-исследовательской работы.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru