

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М. В. Андреев¹, А. А. Шитюк²

¹ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,

² Акционерное общество «Алтайский приборостроительный завод Ротор»,
г. Барнаул, Россия

Статья посвящена анализу особенностей фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (ВСО) с целью обеспечения высокого качества при обработке полимерных композиционных материалов (ПКМ) в области высоких скоростей резания, при которых возможна термическая деструкция, приводящая к ухудшению качества обработанной поверхности.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, фрезерование, полимерные композиционные материалы, термическая деструкция материала

FEATURES OF HIGH-SPEED POLYMER COMPOSITE PROCESSING

M. V. Andreev¹, A. A. Shityuk²

¹ Altai State Technical University, Barnaul, Russia

² Joint-stock company «APZ Rotor», Barnaul, Russia

The article is devoted to analysis of peculiarities of milling during high-speed processing (HSM) to ensure high quality processing of polymer composite materials (PCM) in high-speed cutting in which thermal degradation, leading to deterioration of the surface quality.

Keywords: high-speed machining, milling, polymer composites, thermal breakdown

Высокоскоростная обработка (ВСО) – одна из современных интенсивно развивающихся технологий обработки материалов резанием. Особенности ВСО металлов и сплавов достаточно хорошо изучены. Однако в настоящее время все большее применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ). Поэтому актуальной задачей на сегодняшний день является исследование обработки ПКМ в области высоких скоростей.

В настоящее время для изготовления изделий из ПКМ применяют лезвийные и абразивные методы механической обработки. ПКМ, получаемые с применением стеклянных или углеродных волокон на эпоксидной, фенольной или полиамидной смолах, чаще всего обрабатывают методами резания, включая раскройные операции, обработку отверстий, контурное фрезерование, фрезерование поверхностей и конструктивных элементов, точение и шлифование тел вращения.

Для обеспечения требований по качеству обработанной поверхности ПКМ после лезвийной обработки необходимо чтобы фреза удовлетворяла следующим требова-

ниям: лезвия имеют режущие кромки с малым радиусом скругления и большим задним углом, высокая износостойкость передней и задней поверхностей.

Кроме того, важно, чтобы эти поверхности имели низкую шероховатость, так как стружка, состоящая из волокон и компонентов матрицы ПКМ, интенсивно изнашивает режущую кромку, что приводит к возрастанию силы резания и температуры, и, как следствие, снижению качества обработанных поверхностей [6].

В качестве инструментальных материалов, обеспечивающих приемлемую износостойкость, используют твердые сплавы, твердые сплавы с упрочняющими покрытиями, кубический нитрид бора, поликристаллические спеченные и CVD-алмазы. Перспективным является инструмент с алмазными, получаемыми по технологии CVD, и алмазоподобными (АПП) покрытиями.

Рекомендуемые параметры инструмента и режимов обработки при использовании и резании резцами из спеченного поликристаллического алмаза приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры, рекомендуемые при обработке ПКМ [3]

Параметр режущей части или обработки	Стеклопластик	Углепластик
Радиус режущей кромки, мм	0,001...0,003	0,0007-0,0025
Задний угол, град.	5...20	5...20
Передний угол, град.	0...5	0...5
Скорость резания, м/мин	150...1000	150...500
Глубина резания, мм	от 0,01	от 0,001
Величина подачи, мм/об	0,05...0,25	0,01...0,15

Особенности фрезерования ПКМ, вызывающие образование дефектов обработанной поверхности описаны в работах [8, 10]. К таким дефектам относятся растрескивание и расслоение матрицы, ее термическая деструкция, разломачивание поверхности. Мероприятия по устранению дефектов связаны с оптимизацией конструктивно-геометрических параметров инструмента, выбором рациональных режимов резания и условий обработки, снижающих теплонапряженность процесса фрезерования. Последнее особенно актуально, так как при обработке ПКМ невозможно применение СОЖ. Температура, при которой происходит термодеструкция большинства ПКМ составляет около 250...350 °С при этом, учитывая низкую теплопроводность таких материалов (примерно в 100 – 600 раз меньше, чем у цветных металлов, конструкционных сталей и чугунов), при проектировании операций фрезерования технолог в соответствии с действующими нормативами и справочными материалами вынужден назначать «мягкие» режимы резания, в частности скорость резания [13]. Кроме того, образующаяся при резании стружка представляет собой мелкодисперсную пыль, оказывающую вредное воздействие, как на подвижные узлы станка, так и на здоровье станочника-оператора [9].

Низкие скорости резания и введение дополнительных мероприятий по устранению влияния вредного воздействия стружки приводят к возрастанию себестоимости обработки и снижению ее производительности.

Принципиальная возможность обработки ПКМ в области высоких скоростей резания была установлена при проведении ряда исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными. Полученные в МГТУ им. Н. Э. Баумана результаты [13] свидетельствуют, что значительное увеличение скорости (до 41 м/с) не приводит к снижению качества обработанной поверхности, по сравнению с обработкой на низких скоростях, рекомендованных нормативами (до 5 м/с). На ри-

сунке 1 представлены зависимости деструкции D и температуры θ от скорости резания v при одинаковых условиях обработки.

Аналогичный характер имеет зависимость температуры T от скорости резания v и при обработке металлов (рисунок 2): увеличение скорости резания сначала приводит к росту температуры, а затем к ее стабилизации по достижению температуры, равной температуре плавления обрабатываемого металла [12].

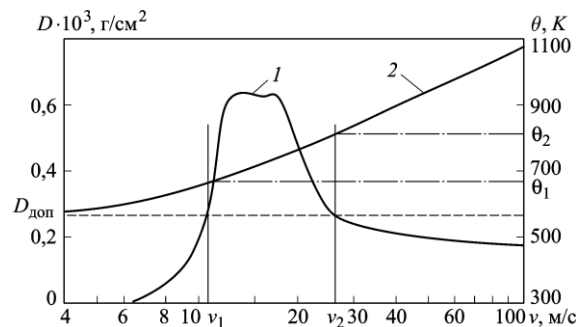


Рисунок 1 – Зависимости деструкции D (1) и температура в зоне резания θ (2) от скорости резания v при точении органопластика «Вискоза-77» ($t = 1$ мм, $s = 0,12$ мм/об) [13].

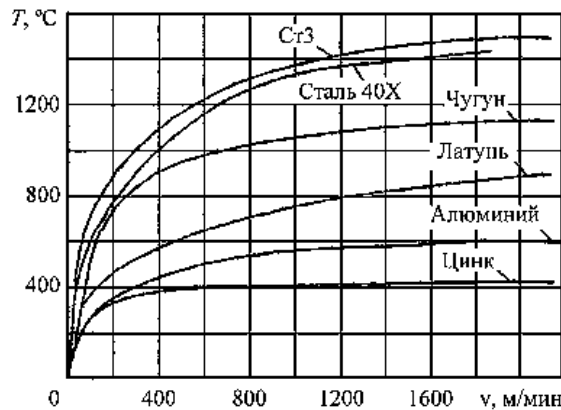


Рисунок 2 – Влияние скорости резания на температуру при точении металлов [12]

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

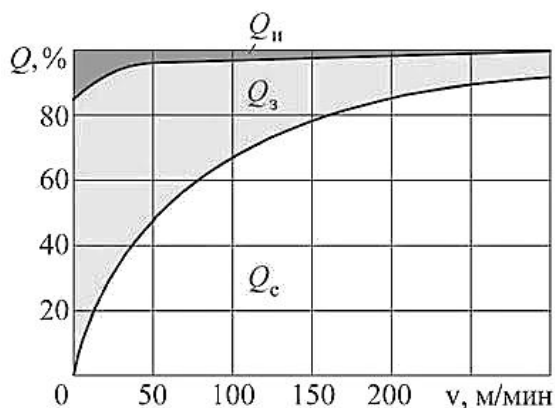


Рисунок 3 – Распределение теплоты между стружкой, заготовкой и инструментом при точении стали 40Х (Т15К6, $t = 1,5$ мм, $s = 0,12$ мм/об) [2, 7, 11]

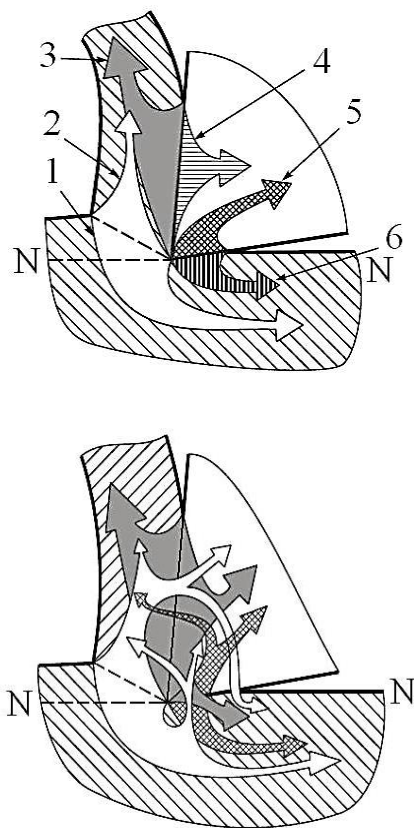


Рисунок 4 – Схемы движения тепловых потоков при резании [1]

Кроме этого при увеличении скорости резания происходит перераспределение тепловых потоков в стружку – заготовку – инструмент [2, 7, 11]. Количество теплоты уходящей в стружку (Q_c) возрастает значительно интенсивнее, чем количество теплоты уходящей в заготовку (Q_z) и инструмент ($Q_{ин}$), по-
Ползуновский альманах № 4 2016

этому относительное значение (Q_c/Q) увеличивается, а значения (Q_z/Q) и ($Q_{ин}/Q$) уменьшаются (рисунок 3).

Уменьшение количества теплоты, уходящей в заготовку, вследствие возрастания скорости резания объясняется изменением величины соотношения между скоростью фрезерования и скоростью теплового потока направленного из зоны деформации на условной плоскости сдвига.

При возрастании скорости (резания) уменьшается как время взаимодействия режущего лезвия и теплового потока, так и время контакта инструмента и заготовки. Следовательно, меньшее количество тепла успевает перейти от инструмента в заготовку. [4, 5]. При этом большее количество теплоты перераспределяется в стружку [2]. Как видно из рисунка 4 в деталь перейдет только та часть тепловой энергии, которая успевает пересечь линию среза N–N [1]. На рисунке 4 обозначены тепловые потоки, возникающие при резании:

1 – количество теплоты образующейся при деформации и уходящей в деталь;

2 – количество теплоты образующейся при деформации и уходящей в стружку;

3 – количество теплоты возникающей от трения стружки по передней поверхности режущего лезвия;

4 – суммарное количество теплоты, образующейся как результат теплообмена на площадке контакта стружки (надрезцовая сторона) и передней поверхности режущего лезвия;

5 – суммарное количество теплоты, образующейся как результат теплообмена на площадке контакта поверхности резания и задней поверхности режущего лезвия;

6 – количество теплоты образующейся как результат трения обработанной поверхности детали и задней поверхности режущего лезвия.

Малый нагрев заготовки при ВСО дает возможность обрабатывать закаленные стальные детали без риска отпуса их поверхностного слоя, а также позволит производить обработку ПКМ, не опасаясь возникновения термодеструкции.

Уменьшение количества теплоты, уходящей в инструмент, при увеличении скорости резания, связано с уменьшением ширины площадки контакта на передней поверхности, через которую тепло из стружки переходит в инструмент [2]. При этом не следует полагать, что это приводит к снижению температуры на площадках контакта и внутри режущего клина. Более того, увеличение скорости

резания приводит к росту температуры. В первую очередь это связано с концентрацией температуры в весьма тонких слоях инструментального материала контактных площадок инструмента (десятичные доли микрометра). Кроме того, увеличение скорости схода стружки приводит к пропорциональному возрастанию работы силы трения на передней поверхности инструмента [7]. При этом рост значения температуры резания будет компенсирован за счет уменьшения времени контакта зуба фрезы с заготовкой при их циклическом контакте. Локализация температурного поля в относительно тонком слое материала инструмента, находящегося в контакте со стружкой, приводит к уменьшению объема износа режущего лезвия. В этом случае максимальную защиту инструменту могут обеспечивать специальные одно- или многослойные покрытия, наносимые на переднюю поверхность инструмента и выполняющие роль теплового щита [1]. Наибольшее количество теплоты, вызванной деформацией, образуется при обработке высокопрочных материалов инструментом, имеющим малый передний угол. Поэтому для снижения силы резания и температуры деформации при ВСО, когда сечения среза малы, (особенно малые толщины) необходимо использовать режущий инструмент с увеличенным передним углом (с учетом допустимого предела прочности режущего клина) силы резания [1].

На основании исследований отечественных и зарубежных ученых можно принять допущение, что механическая энергия при резании полностью превращается в тепловую [11, 7].

С учетом этого допущения уравнение механической и тепловой энергии записывается в виде [11]:

$$P_z \cdot v = Q = Q_c + Q_3 + Q_{и},$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

v – скорость резания, м/с;

$P_z \cdot v$ – механическая работа, совершаемая за одну секунду обработки;

Q – общее количество теплоты, Дж/с;

$Q_c, Q_3, Q_{и}$ – теплота стружки, заготовки, инструмента, Дж/с.

В связи с тем, что процесс пластического деформирования протекает с высокой скоростью, это приводит к адиабатическому разогреву зоны резания. Происходит локализация выделяемой при этом теплоты в тонком сдвигаемом слое. Это способствует интенсивному разрушению срезаемого слоя при его деформировании. При этом также остается локали-

зованной и деформация, не распространяющаяся в окружающий материал, вследствие чего сопротивление деформации уменьшается. Таким образом, формообразование происходит в условиях локального высокотемпературного сдвига. [7].

Изменение подачи оказывает большее влияние на температуру резания, по сравнению с изменением глубины резания, но в значительно меньшей степени, чем изменение скорости. Затраты энергии при фрезеровании уменьшаются пропорционально уменьшению подачи на зуб, что приводит к уменьшению количества теплоты Q образуемой в зоне деформации. Кроме того рост скорости резания приводит к снижению как степени деформации обрабатываемого материала, так и силы резания [7]. В зоне стружкообразования не успевают произойти деформации, которые мог бы получить обрабатываемый материал при малой скорости резания. Образованная при этом стружка менее деформирована, имеет меньшую усадку, а работа и силы резания снижаются [1].

Задание подачи на зуб, при попутном фрезеровании (рекомендуемое для ВСО), меньше минимально допустимой может приводить к ухудшению условий резания и возрастанию износу. В связи с высокими оборотами фрезы, для обеспечения заданной подачи на зуб, минутная подача должна быть относительно высокой и стабильной при изменении траектории движения инструмента.

В заключении хочется отметить, что основная задача ВСО состоит в достижении высокого качества обработанных изделий, что, в свою очередь, позволит упростить структуру производственного процесса и уменьшить общее время изготовления изделий. Для ее обеспечения необходим правильный подбор всех составляющих данного процесса – станка, системы ЧПУ, режущего и вспомогательного инструмента, системы закрепления инструмента, системы программирования, квалификации, как технолога программиста, так и оператора станка с ЧПУ.

Список литературы

1. Андреев, В.Н. Инструмент для высокопроизводительного и экологически чистого резания. Серия «Библиотека инструментальщика» [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Н. Андреев, Г.В. Боровский, В.Г. Боровский [и др.]. – Электрон. дан. – М.: Машиностроение, 2010. – 480 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=716 – Загл. с экрана.

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
3. Бойцов А.Г., Дудаков В.Б., Плешаков А.В. Новое в обработке композитов [Электронный ресурс] // «РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация» №6 (94), 2014. С. 34–36 – Режим доступа к статье: <http://mirprom.ru/public/novoe-v-obrabotke-kompozitov.html>.
4. Гайст С.В. Исследование температуры при фрезеровании стеклопластика / С.В.Гайст, А.М.Марков, П.О. Черданцев, С.А.Катаева, Е.Ю.Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. - 2016. - № 3. С. 123-128.
5. Зобнев В.В. Технологические основы создания износостойкого инструмента / В.В. Зобнев, С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, А.М. Марков / Ползуновский альманах. - 2012. - № 1. С. 271-273.
6. Катаева С.А. Конструкции фрез для обработки стеклопластиков / С.А. Катаева, А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, Е.Ю. Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. - 2016. - № 3. С. 307-312.
7. Кожевников, Д.В. Резание материалов [Электронный ресурс]: учебник / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов. – Электрон. дан. – М.: Машиностроение, 2012. – 304 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=6322 1 – Загл. с экрана.
8. Лапенков Е.Ю. Исследование процесса фрезерования стеклопластиков / Е.Ю. Лапенков, С.А. Катаева, С.В. Гайст, П.О. Черданцев, А.М. Марков // Вестник алтайской науки. - 2015. - № 3-4 (25-26). С. 39-44.
9. Мозговой Н.И. Проектирование операций изготовления отверстий в деталях из стеклопластика / Н.И. Мозговой, А.М. Марков, Я.Г. Мозговая // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2012. - № 1. С. 45-49.
10. Мозговой Н.И. Стеклопластик и особенности его механической обработки. Все о стеклопластике / Н.И. Мозговой, А.М.Марков, М. Доц // Сибирбрюкен, 2012.
11. Силин С.С. Метод подобию при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
12. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов [Электронный ресурс]: . – Электрон. дан. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=760 – Загл. с экрана.
13. Ярославцев В.М. К вопросу о возможности применения высокоскоростной обработки полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. 2015. С. 59–70. – Режим доступа к статье: <http://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-vozmozhnosti-primeneniya-vysokoskorostnoy-obrabotki-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov>.

Андреев Михаил Витальевич¹ – к. т. н., доцент,
магистрант
Шитюк Алексей Александрович² – главный инженер

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия

²АО «Алтайский приборостроительный завод Ротор» (АО АПЗ «Ротор») г. Барнаул, Россия