

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9.04:621.941.01

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.М. Ярославцев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: 13@bmstu.ru

Экспериментально установлена возможность обработки полимерных композиционных материалов в области высоких, закритических скоростей резания, при которых интенсифицируются процессы термической деструкции, приводящие к недопустимому ухудшению свойств обработанной поверхности. Рассмотрена конструкция лабораторной установки, позволяющая осуществлять экспериментальные исследования процесса резания полимерных композиционных материалов в широком диапазоне частот вращения шпинделя станка (от 225 до 18000 мин⁻¹) и скоростей резания до 117 м/с. Приведено физическое обоснование существования двух возможных интервалов скоростей обработки: обычного и сверхскоростного резания.

Ключевые слова: обработка резанием, полимерные композиционные материалы, высокоскоростная обработка, термическая деструкция материала, лабораторная установка, физический механизм, высокопроизводительная обработка.

REVISITING THE POSSIBILITY OF HIGH-SPEED POLYMER COMPOSITE PROCESSING

V.M. Yaroslavtsev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: 13@bmstu.ru

Experiments showed the possibility of processing polymer composite materials (PCM) at high supercritical cutting speeds when the processes of thermal degradation are intensified, resulting in an unacceptable degradation of the processed surface. The design of the laboratory setup is described. It allows carrying out experimental studies of the process of PCM cutting within a wide range of both work spindle speeds (from 225 to 18 000 min⁻¹) and cutting speeds up to 117 m/s. A physical justification for the existence of two possible intervals of PCM processing speeds: conventional and high-speed cutting is provided.

Keywords: machining, polymer composites, high-speed cutting, thermal breakdown, laboratory setup, physical mechanism, high-performance processing.

Одним из направлений повышения производительности механической обработки материалов является увеличение скорости резания. Это направление поддерживается в мире современными тенденциями и уровнем развития станкостроения. Теоретические и опытные исследования технологических возможностей высокоскоростной обработки

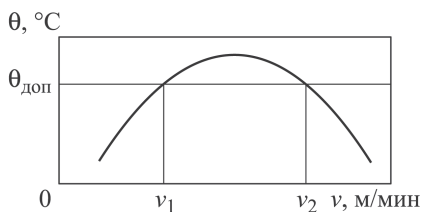


Рис. 1. Зависимость температуры θ от скорости резания v по Саломону

металлов и металлических сплавов резанием [1–5] позволяют в настоящее время разрабатывать и применять на практике эффективные технологические процессы скоростного резания, обеспечивающие высокую производительность и высокое качество изготовления деталей машин [6–10].

Технологической предпосылкой возможности реализации процесса высокоскоростной обработки послужила гипотеза Саломона (патент № 553594, Германия, 1931 г.), который предположил, что зависимость температуры от скорости резания носит экстремальный характер (рис. 1), т.е. начиная с определенной скорости температура резания уменьшается и при больших скоростях ($v > v_2$) температура в зоне обработки не превышает допустимых для эксплуатации режущего инструмента значений $\theta_{\text{доп}}$. В ряде технологических исследований высокоскоростной обработки металлов и сплавов [1, 3, 5] характер зависимости $\theta(v)$ получил опытное подтверждение.

Следует отметить, что в последние десятилетия резко возрос спрос на высокопрочные полимерные композиционные материалы (ПКМ), зарекомендовавшие себя в качестве перспективных конструкционных материалов для изготовления ответственных изделий машиностроения и технологии их высокопроизводительной обработки [11–16]. В отдельных видах производства на долю деталей из композиционных материалов приходится 20...80% общей массы конструкции. В связи с этим большой интерес представляют исследования самой возможности использования высокоскоростного резания при обработке композиционных материалов, а также его эффектов.

Впервые такие исследования были выполнены в МГТУ им. Н.Э. Баумана. При обработке ПКМ критические температуры резания ограничиваются в отличие от металлов и их сплавов теплостойкостью не инструментального, а обрабатываемого материала. Так, при температурах 250...350 °C проявляются и с повышением температуры резко интенсифицируются процессы термомеханической деструкции ПКМ [17, 18]. Термомеханическая деструкция материала характеризуется нарушением устойчивости и разрушением химических связей молекулярных цепей полимера, возникновением прижогов с образованием коксового слоя, выделением газообразных продуктов распада связующего. При этом наблюдается потемнение поверхности материала.

В связи с этим при обработке ПКМ режимные параметры, и в первую очередь скорость резания, назначают из условия отсутствия тер-

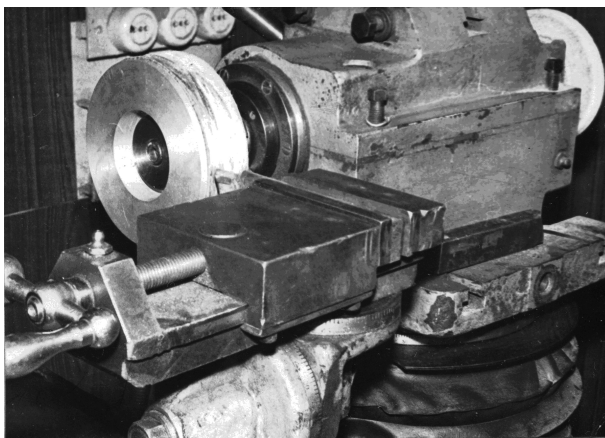


Рис. 2. Общий вид зоны скоростной обработки резанием образцов из органо-пластика на станке 3А64Д

моокислительной 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. Это находит отражение в действующих нормативах по режимам резания, стандартах предприятий и справочных материалах [17, 19, 20], что существенно ограничивает производительность обработки.

В настоящей статье приведены результаты исследования возможности высокопроизводительной обработки заготовок из ПКМ и обеспечения качества на режимах скоростного и сверхскоростного резания.

Предварительная оценка принципиальной возможности такой обработки проводилась на специальной лабораторной установке, позволяющей обеспечить скорость резания ~ 40 м/с.

Установка была создана на базе универсального заточного станка модели 3А64Д с максимальной частотой вращения шпинделя шлифовальной головки 6300 мин^{-1} . На шлифовальной головке станка устанавливали специальную оправку для крепления кольцевого образца (рис. 2). Режущий инструмент (резец токарный) закреплялся в поворотных тисках, расположенных на рабочем столе станка. Рабочее перемещение инструмента осуществляли в поперечном направлении, параллельно оси вращения образца. Инструмент подавался вручную ($\sim 0,1$ мм/об). При выполнении эксперимента скорость резания (окружная скорость обрабатываемого образца из органо-пластика “Вискоза-77” диаметром 125 мм) составляла ~ 41 м/с ($n_{\text{шп}} = 6300$ об/мин).

Обработка образцов из органопластика “Вискоза-77” при указанных значениях скорости резания, подачи и толщинах среза от 0,1 до 1,0 мм показала, что качество обработанной поверхности практически не уступает поверхности образцов, обработанных в аналогичных условиях при скорости резания 1...5 м/с. Таким образом, в области высоких, закритических скоростей резания ПКМ существуют скорости, при которых обеспечивается необходимое качество обработки при значительном повышении производительности процесса.

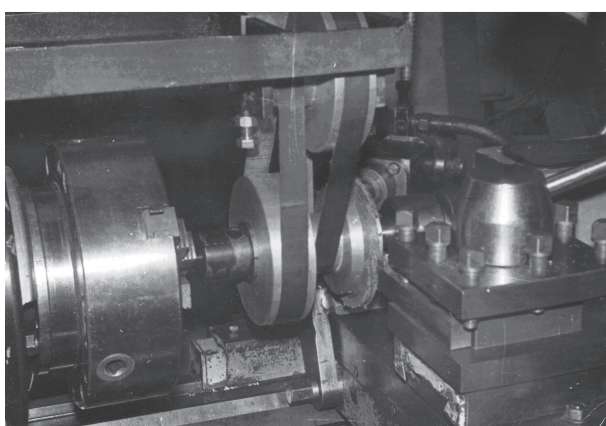
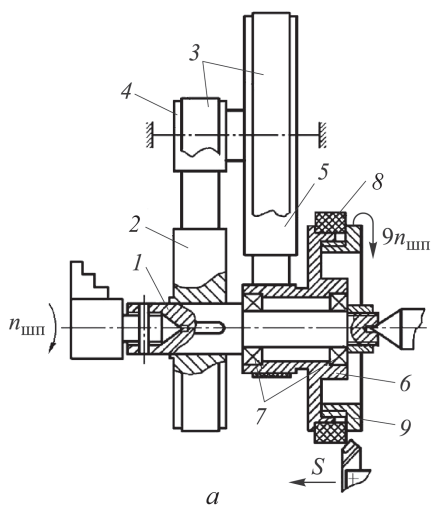
Результаты опытного опробования скоростного резания на станке 3А64Д послужили основой проведения исследований процесса обработки ПКМ в широком диапазоне скоростей резания, включая интервалы скоростной и сверхскоростной обработки.

В настоящее время разработаны металлорежущие станки (фрезерные, шлифовальные, токарные, многоцелевые, обрабатывающие центры), предназначенные для высокоскоростной (частота вращения шпинделя до 7500 мин^{-1} , рабочая подача до 1500 мм/мин) и сверхвысокоскоростной (соответственно до 15000 мин^{-1} и до 3000 мм/мин) обработки заготовок. Вместе с тем высокая стоимость такого оборудования затрудняет его применение в лабораторных исследованиях.

Для выполнения экспериментальных исследований изменения качества обработки ПКМ в широком диапазоне скоростей резания в МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе универсального токарно-винторезного станка модели 16К20 была разработана опытная установка с повышенным числом оборотов обрабатываемой заготовки. Изменение механики станка и увеличение предельных значений чисел оборотов обеспечивается за счет встроенного мультипликатора, принципиальная схема и общий вид которого представлены на рис. 3. Мультипликатор связывает вращение шпинделя станка с вращением опытного образца и представляет собой двухступенчатую плоскоременную передачу с передаточным отношением $(3 : 1) \cdot (3 : 1)$.

Конструкция мультипликатора состоит из оправки 1, установленной в центрах станка (см. рис. 3, а), на которой закреплен шкив 2, передающий вращательное движение от шпинделя станка $n_{\text{шп}}$ с помощью плоского высокоскоростного ремня 3 промежуточной ступени мультипликатора, представляющей собой двойной блок из шкивов 4 и 5. Далее со шкива 5 движение передается на корпус 6. Независимое вращение корпуса 6 и оправки 1 обеспечивается за счет их соединения между собой с помощью подшипников качения 7. Конструктивное исполнение корпуса 6 предусматривает установку на своей рабочей части кольцевого образца 8 с закреплением его гайкой 9. На силовом кронштейне, с помощью которого блок шкивов 4 и 5 крепится на станке, предусмотрен механизм натяжения приводных ремней.

Мультипликатор обеспечивает частоты вращения корпуса 6 с обрабатываемым образцом 8 в интервале чисел оборотов от 112,5 до



б

Рис. 3. Конструктивная схема (а) и общий вид (б) лабораторной установки для исследования процесса резания ПКМ в широком диапазоне скоростей обработки

18000 мин⁻¹. При диаметре образцов 125 мм диапазон скоростей резания лабораторной установки составляет от 0,74 до 118 м/с при различных сочетаниях глубины резания и подачи.

Для изучения процесса термического разрушения химических связей полимерного связующего в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана экспериментальная фотометрическая установка, основанная на методе динамического спектроскопирования отраженного от поверхности изделия светового потока и позволяющая оценивать величину деструкции D поверхностного слоя материала непосредственно в ходе процесса резания [21–23]. В основу принципа действия установки положено физическое явление изменения оптических свойств поверхности, испытавшей воздействие термической деструкции. Зондирующий световой поток от осветителя направляется на локализованный участок поверхности изделия. Отраженный от поверхности изделия свето-

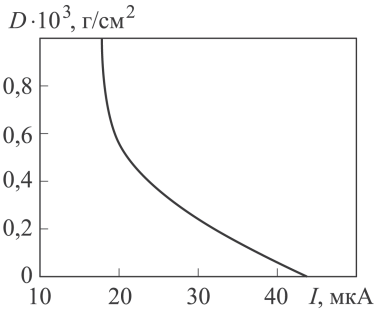


Рис. 4. Зависимость величины фототока I от меры деструкции D поверхностного слоя образца из органоластика СВМ

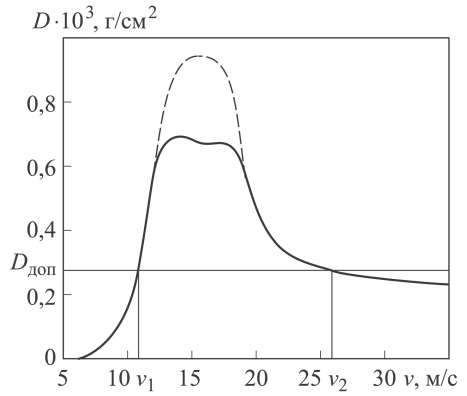


Рис. 5. Зависимость меры деструкции D от скорости резания v (обрабатываемый материал органоластик “Вискоза-77”; $S = 0,12$ мм/об; $t = 1$ мм)

вой поток по световоду попадает на фотоумножитель ФЭУ-85, где преобразуется в электрические сигналы постоянного тока, пропорциональные величине светового потока. Сигналы регистрируются на шлейфовом осциллографе Н-700 или на цифровом микроамперметре М1632.

Меру термической деструкции D оценивали термогравиметрическим методом [24], основанном на замерах изменения массы деструктированного образца в результате определенных температурных воздействий. Деструкцию при обработке резанием определяли по тарифовочному графику $D = f(I)$ (рис. 4) зависимости деструкции от светового потока, отраженного от поверхности изделия и преобразованного в электрический сигнал I в фотоумножителе, причем большей величине деструкции соответствует меньшее значение светового потока.

На рис. 5 представлен фрагмент полученной опытным путем зависимости $D = f(v)$ в интервале скоростей 5...35 м/с (сплошная линия). Если принять за допустимую величину деструкции $D_{\text{доп}}$ ее значение, при котором на глубине 2 мкм обработанной поверхности не фиксируются изменения структуры обрабатываемого материала, то на кривой $D = f(v)$ (см. рис. 5) при заданных условиях обработки можно выделить два критических значения скорости резания: $v_1 = 10,8$ м/с и $v_2 = 26$ м/с. В соответствии с этим существует два диапазона скоростей резания, в которых обеспечивается качество обработанной поверхности: ($v < v_1$) – обычное резание и ($v > v_2$) – за критическая сверхскоростная обработка резанием.

Следует отметить, что применявшийся в экспериментах фотометрический метод не отражает меры термической деструкции материала при повышенных значениях $D > 0,6 \cdot 10^{-3}$ г/см², когда увеличение

толщины коксового слоя практически не проявляется в соответствующих изменениях оптических свойств поверхности (см. рис. 4). В соответствие с этим предполагаемый вид зависимости $D = f(v)$ при $D > 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^2$ представлен на рис. 5 штриховой линией.

Как видно на рис. 5, кривая изменения термической деструкции от скорости резания в целом повторяет экстремальный характер зависимости температуры резания θ от скорости v на рис. 1. Вместе с тем особенности изменения степени деструкции материала (а следовательно, и качества обрабатываемой поверхности) по мере увеличения скорости резания в случае обработки ПКМ не являются отражением однозначной связи с закономерностями изменения температуры резания, как это следует из гипотезы Саломона. Исследованиями тепловых явлений при резании органопластика, выполненными в МГТУ им. Н.Э. Баумана, установлено, что в диапазоне скоростей резания от 0 до 117 м/с температура резания монотонно увеличивается. Так, при токарной обработке степень влияния элементов режима резания (скорости v , м/с; подачи S , мм/об; глубины t , мм) на приращение температуры резания определяется зависимостью

$$\theta = 208v^{0,32}S^{0,1}t^{0,4}.$$

Измерение средней температуры на контактных поверхностях инструмента проводили методом подведенной термопары, используя при этом стандартные термопары хромель-копель с известными термоэлектрическими характеристиками. Термопара встраивалась в отверстие диаметром $\sim 0,9$ мм, выполненное электроискровым методом на передней поверхности лезвия резца и расположенное на расстоянии $\sim 0,15$ мм от режущей кромки. Спай термопары представлял собой шарик диаметром $\sim 0,3$ мм, полученный конденсаторной сваркой. Для изоляции от тела резца термопара покрывалась цапонлаком № 951, пропускалась через керамическую соломку и заливалась на выходе из резца (на уровне передней поверхности) слоем протакрила. Значение термоэлектродвижущей силы, возникающей в термопаре в процессе резания, регистрировали с помощью электронного цифрового вольт-амперметра марки ВК2-20.

На рис. 6 представлены совмещенные зависимости деструкции D и температуры θ от скорости резания v при одинаковых условиях обработки. Из рисунка следует, что значение температуры является не единственным фактором, который определяет интенсивность протекания термической деструкции материала. Так, согласно данным опытных исследований [25], разрушение полимерных материалов зависит не только от температуры, но и действующих напряжений, а также времени воздействия t_d указанных нагрузок. Известно, что радиальная составляющая силы резания P_y , определяющая удельное давление

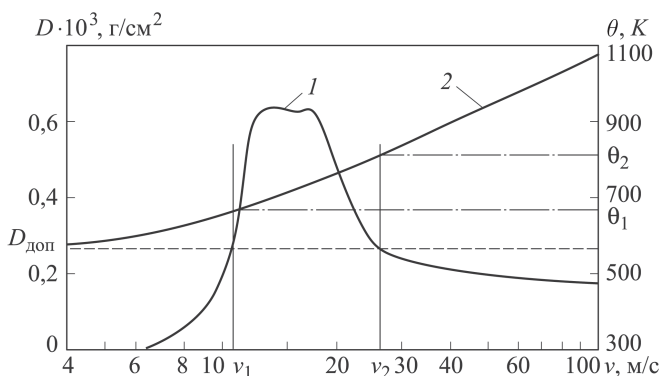


Рис. 6. Зависимость изменения степени деструкции D (1) и температуры резания θ (2) от скорости резания в диапазоне скоростей резания от 4 до 100 м/с (обрабатываемый материал органопластик “Вискоза-77”; $S = 0,12$ мм/об; $t = 1$ мм)

на заднюю поверхность режущего инструмента, в интервале значений v до 39 м/с изменяется мало и действующие напряжения на обработанную поверхность могут быть приняты как постоянные. Вместе с тем продолжительность контакта задней поверхности инструмента с обработанной поверхностью и соответствующее время t_d воздействия температуры резания на материал заготовки с увеличением скорости резания v уменьшается и составляет $t_d = l_k/v$, где l_k — длина контакта по задней поверхности инструмента.

Величину контактной площадки l_k определяли методом химического осаждения на рабочие поверхности лезвия инструмента медной пленки. Для этого поверхности лезвия предварительно обезжировали в 10%-ном растворе каустика NaOH. Затем рабочую часть резца на 5...6 с погружали в кислый раствор медного электролита: применяли раствор сернокислой меди и серной кислоты (сернокислая медь — 240...260 г/л; серная кислота — 50...70 г/л). На поверхностях инструмента осаждалась контактная (без действия тока) медь, имеющая плохое сцепление с основным металлом. В процессе течения в зоне действия контактных нагрузок медная пленка истиралась. В условиях выполнявшихся экспериментов размеры контактных площадок стабилизировались через 10...15 с момента начала процесса течения. Измерение образовавшихся контактных площадок выполняли на малом инструментальном микроскопе с точностью до 5 мкм. Было установлено, что при точении остро заточенным резцом и повышении скорости резания v от 1,5 до 47 м/с ($S = 0,12$ мм/об; $t = 1$ мм) размер контактной площадки по задней поверхности инструмента, образовавшейся в результате упругого последействия обрабатываемого материала, изменялся сравнительно мало и составлял 0,270...0,225 мм, в среднем $l_k \sim 0,25$ мм.

Таким образом, при критических значениях скоростей резания v_1 и v_2 время воздействия $t_d = l_k/v$ температуры задней поверхности

инструмента на обработанную поверхность заготовки составляет примерно 0,23 и 0,096 мс соответственно, т.е. с повышением скорости снижается в 2,4 раза. При этом повышение температуры на том же участке скоростей резания изменяется на 32,5% (от $\theta_1 = 678$ до $\theta_2 = 801$ К — см. рис. 6). Разная интенсивность изменения температуры резания θ и времени t_d ее воздействия на обработанную поверхность с повышением скорости резания и определяет экстремальный характер зависимости степени деструкции $D = f(v)$.

Таким образом, опытным путем установлена возможность сверхскоростной обработки резанием изделий из ПКМ. Рассмотрен физический механизм снижения степени деструкции материала на высоких и сверхвысоких скоростях резания. Экспериментальные исследования особенностей изменения физических параметров в зоне обработки позволили выявить два главных и разнонаправленных фактора, определяющих экстремальный характер протекания термоокислительных процессов деструкции полимерного связующего ПКМ при увеличении скорости резания — это повышение температуры контакта задней поверхности резца с обрабатываемым изделием θ_k и уменьшение времени ее воздействия t_k на обработанную поверхность. Показано, что фотометрический способ оценки степени термической деструкции ПКМ может применяться как средство активного контроля качества обработки поверхностей непосредственно в процессе резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грабин В.Г., Подураев В.Н., Короткевич Ю.Н. Исследование процесса сверхскоростного резания и установка взрывного типа для его осуществления // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1964. № 11. С. 98–105.
2. Milberg J. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung mit spanenden Fertigungsverfahren // Werksstattstechnik. 1983. Vol. 73. No. 1. S. 5–10.
3. Scherer J. Zerspanen von Aluminium bei hoch Schnittgeschwindigkeiten // Werkstatt und Betrieb. 1984. Vol. 117. No. 6. S. 355–358.
4. Дитман К., Горинг К. Высокоскоростное шлифование — современный метод обработки металлов резанием // Станки и инструмент. 1988. № 12. С. 21–24.
5. Schulz H. The History of High-Speed Machining // Revista de Cincia e Tecnologia. 1990. No. 13. P. 9–18.
6. Bäumel K. Entwicklungstendenzen bei Fraesmaschinen // Werkstatt und Betrieb. 1983. Vol. 116. No. 8. S. 463–466.
7. Waldvogel W. Hochgeschwindigkeitfräsen mit Schnellfrequenz — Motor-frässpindeln // Microtechnic. 1984. No. 4. S. 26–27.
8. Потапов В.А., Айзеништок Г.И. Высокоскоростная обработка // Обзорная информация. ВНИИТЭМР. Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Сер. 1. Металлорежущее оборудование (Вып. 9). 1986. 60 с.
9. Schtrer J. Hochgeschwindigkeitfräsen wird industriereif // Werkstatt und Betrieb. 1986. Vol. 119. No. 1. S. 45–49.
10. Dey H. Bearbeitungszentren auf dem Weg zur Integration in flexible Fertigungseinrichtungen // Werkstatt und Betrieb. 1985. Vol. 118. No. 12. S. 792–797.

11. *Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ярославцев В.М.* Нетрадиционные методы обработки материалов. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 212 с.
12. *Ярославцев В.М., Мирсков А.Н.* Метод широких срезов как средство интенсификации процесса резания // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. 1992. № 1. С. 41–51.
13. *Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А.* Эффективность обработки резанием с опережающим пластическим деформированием // Вестник машиностроения. 1972. № 12. С. 58–61.
14. *Ярославцев В.М.* Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. выпуск “Композиционные материалы, конструкции и технологии”. 2005. С. 41–62.
15. *Ярославцев В.М.* Разработка методологии поиска новых методов обработки и ее практическая реализация // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2007. № 2 (67). С. 56–70.
16. *Ярославцев В.М., Назаров Н.Г.* Оценка эффективности прерывистого резания на основе использования закономерностей изменения теплонапряженности процесса // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 10. <http://technomag.bmstu.ru/doc/623113.html> (дата обращения: 10.02.2014) DOI: 10.7463/1013.0623113
17. *Степанов А.А.* Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1987. 176 с.
18. *Буланов И.М., Воробей В.В.* Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
19. *Общемашиностроительные* нормативы режимов резания, норм износа и расхода резцов, сверл и фрез при обработке неметаллических конструкционных материалов. М.: НИИМАШ, 1982. 144 с.
20. *Буловский П.И., Петрова Н.А.* Механическая обработка стеклопластиков. Л.: Машиностроение, 1969. 152 с.
21. *Патент* РФ № 132199 U1, МПК G01N3/58. Устройство для определения начала наступления термической деструкции полимерных композиционных материалов и пластмасс при их обработке резанием [Текст] / Ярославцев В.М., Назаров Н.Г.; заявитель и патентообладатель Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (RU). № 2013114748/28. Заявл. 02.04.2013. Оpubл. 10.09.2013.
22. *Ярославцев В.М., Мирсков А.Н.* Фотометрическая установка для определения величины термической деструкции полимерных материалов при обработке резанием // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 9. <http://technomag.edu.ru/doc/591230.html> (дата обращения: 10.02.2014) DOI: 10.7463/0913.0591230
23. *Ярославцев В.М.* Обработка резанием полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / В.М. Ярославцев. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 180 с.
24. *Уэндландт У.* Термические методы анализа / пер. с англ. под ред. В.А. Степанова и В.А. Бернштейна. М.: Мир, 1978. 526 с.
25. *Журков С.Н., Регель В.Р., Санфиорова Т.А.* Связь между температурно-временной зависимостью прочности и характером термической деструкции полимеров // Высокомолекулярные соединения. 1964. № 6. С. 1092–1098.

REFERENCES

- [1] Grabin V.G., Poduraev V.N., Korotkevich Yu.N. Study of High-Speed Cutting Process and Explosive Type Installation for Its Implementation. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1964, no. 11, pp. 98–105 (in Russ.).

- [2] Milberg J. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung mit spanenden Fertigungsverfahren. *Werkstattstechnik*, 1983, vol. 73, no. 1, pp. 5–10.
- [3] Scherer J. Zerspanen von Aluminium bei hoch Schnittgeschwindigkeiten. *Werkstatt und Betrieb*, 1984, vol. 117, no. 6, pp. 355–358.
- [4] Ditman K., Gyuring K. High-speed grinding — a modern method of metal cutting. *Stanki i instrument* [Machines and Tooling], 1988, no. 12, pp. 21–24 (in Russ.).
- [5] Schulz H. The History of High-Speed Machining. *Revista de Ciència e Tecnologia*, 1990, no. 13, pp. 9–18.
- [6] Böeml K. Entwicklungstendenzen bei Fraesmaschinen. *Werkstatt und Betrieb*, 1983, vol. 116, no. 8, pp. 463–466.
- [7] Waldvogel W. Hochgeschwindigkeitfräsen mit Schnellfrequenz — Motorfrässpindeln. *Microtechnic*, 1984, no. 4, pp. 26–27.
- [8] Potapov V.A., Ayzenshtok G.I. High-Speed Machining. *Overview VNIITEMR. Technology, Equipment, Organization and Economics of Machinery Production. Series 1. Cutting Equipment*, iss. 9, 1986. 60 p. (in Russ.).
- [9] Schtrer J. Hochgeschwindigkeitfräsen wird industriereif. *Werkstatt und Betrieb*, 1986, vol. 119, no. 1, pp. 45–49.
- [10] Dey H. Bearbeitungszentren auf dem Weg zur Integration in flexible Fertigungseinrichtungen. *Werkstatt und Betrieb*, 1985, vol. 118, no. 12, pp. 792–797.
- [11] Kovshov A.N., Nazarov Yu.F., Yaroslavtsev V.M. *Netraditsionnye metody obrabotki materialov* [Nontraditional Methods of Material Processing]. Moscow, MGOU Publ., 2007. 212 p.
- [12] Yaroslavtsev V.M., Mirskov A.N. Method of Broad Cuts as a Means of Intensifying the Process of Cutting. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii. Mezhdunar. zhurnal* [Engineering and Automation Problems], 1992, no. 1, pp. 41–51 (in Russ.).
- [13] Poduraev V.N., Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. Efficiency of Machining with Advanced Plastic Deformation. *Vestn. Mashinost.* [Russian Engineering Research], 1972, no. 12, pp. 58–61 (in Russ.).
- [14] Yaroslavtsev V.M. Technological Solutions to the Problems of Treatment of Rocket and Aerospace Composite Structures. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost., Spetsvyp. "Kompozitsionnye materialy, konstruksii i tekhnologii"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng., Spec. Iss. "Composite Materials, Structures and Techniques"], 2005, pp. 41–62 (in Russ.).
- [15] Yaroslavtsev V.M. Development and Practical Implementation of Methodology of Search of New Methods of Material Processing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2007, no. 2 (67), pp. 56–70 (in Russ.).
- [16] Yaroslavtsev V.M., Nazarov N.G. Assessment of the Efficiency of Intermittent Cutting Through the Use of Thermal Stress Change Patterns of the Process. *Jelektr. Nauchno-Tehn. Izd "Nauka i obrazovanie"* [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education"]. 2013, no. 10. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/623113.html> DOI: 10.7463/1013.0623113
- [17] Stepanov A.A. *Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh materialov* [Machining of High-Strength Composite Materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 176 p.
- [18] Bulanov I.M., Vorobey V.V. *Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Technology of Rocket and Aerospace Structures Made of Composite Materials]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 1998. 516 p.
- [19] *Obschemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniya, norm iznosa i raskhoda reztsov, sverl i frez pri obrabotke nemetallicheskich konstruksionnykh materialov* [Engineering Standards of Cutting Rates, Norms of Wear and Consumption of Cutters, Drills and Mills When Cutting Non-Metallic Structural Materials]. Moscow, NIIMASH Publ., 1982. 144 p.

- [20] Bulovskiy P.I., Petrova N.A. Mekhanicheskaya obrabotka stekloplastikov [Machining Glass-Reinforced Plastic]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1969. 152 p.
- [21] Yaroslavtsev V.M., Nazarov N.G. Ustroystvo dlya opredeleniya nachala nastupleniya termicheskoy destruktzii polimernykh kompozitsionnykh materialov i plastmass pri ikh obrabotke rezaniem [Apparatus for Determining the Start of the Onset of Thermal Breakdown of Polymer Composite Materials and Plastics During Machining]. Patent RF no. 132199 U1, MPK G01N3/58. Bauman Moscow State Technical University (RU), no. 2013114748/28.
- [22] Yaroslavtsev V.M. Mirskov A.N. Photometric Installation for Determining the Value of Polymer Material Thermal Breakdown during the Cutting Process. *Jelekt. Nauchno-Tehn. Izd "Nauka i obrazovanie" MGTU im. N.E. Baumana*. [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education" of Bauman MSTU], 2013, no. 9 (in Russ.). Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/591230.html> DOI: 10.7463/0913.0591230
- [23] Yaroslavtsev V.M. Obrabotka rezaniem polimernykh kompozitsionnykh materialov [Cutting Polymer Composite Materials: Tutorial]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2012. 180 p.
- [24] Uendlandt U. Termicheskie metody analiza [Thermal Methods of Analysis]. Russ. Ed. Moscow, Mir Publ., 1978. 526 p.
- [25] Zhurkov S.N., Regel' V.R., Sanfirova T.A. The Relation between the Temperature-Time Dependence of the Strength and the Character of Polymer Thermal Breakdown. *Vysokomolekulyarnye soedineniya [Polymer Science]*, 1964, no. 6, pp. 1092–1098 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.06.2014

Ярославцев Виктор Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 290 научных работ в области теории резания, технологии производства летательных аппаратов, разработки новых методов обработки композиционных и труднообрабатываемых материалов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Yaroslavtsev V.M. — Dr. Sci. (Eng.), professor of the “Technologies of Treatment of Materials” Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 290 publications in the fields of theory of cutting, technology of flying vehicles production, development of new methods for treatment of composite and churlish materials.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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.

Please cite this article in English as:

Yaroslavtsev V.M. Revisiting the Possibility of High-Speed Polymer Composite Processing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 3, pp. 59–70.