

УДК 621.91.01:621.7.01

Совершенствование метода резания с дополнительным технологическим покрытием для чистовой обработки волокнистых компазитов

Ярославцев В. М.^{1,*}

[*mt13@bmstu.ru](mailto:mt13@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приводятся технологические возможности высокоэффективного метода резания с дополнительным технологическим покрытием (ДТП), предназначенного для чистовой обработки волокнистых композитов, при которой в условиях обычного резания возникают значительные трудности обеспечения качества поверхности – ворсистость, образование локальных дефектов поверхностного слоя. Представлены результаты экспериментального исследования и рекомендации по выбору условий обработки (толщина слоя покрытия, исходная ворсистость поверхности, величина износа режущего инструмента и др.), гарантирующие высокое качество обработанных поверхностей изделий из органопластика СВМ-6 при резании с ДТП (7-8 класс шероховатости). Рассмотрены способы повышения производительности обработки путем сокращения времени отверждения наносимого покрытия.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, ворсистость, резание с дополнительным технологическим покрытием, повышение качества поверхности, повышение производительности обработки

Введение

Обработка резанием отдельных разновидностей волокнистых композиционных материалов (КМ) приводит к образованию на обработанной поверхности ворса в результате перерезания режущим инструментом волокон наполнителя [1–6], что в большинстве случаев исключает возможность достижения требуемых показателей качества поверхностного слоя изделия. Микромеханика разрушения волокон носит сложный микрофибрилярный характер [7–12], когда в процессе нагружения волокно расщепляется на тончайшие, расположенные вдоль оси нитевидные структуры (микрофибриллы) с последующим обрывом отдельных структурных элементов. Последнее приводит к тому, что образующийся на обработанной поверхности ворс представляет собой пучки микрофибрилл разной длины, возникших в процессе перерезания волокон КМ ("щеткообразное" разрушенные [7]).

К материалам с высокой склонностью к образованию ворса (ворсистой) на обработанной резанием поверхности относятся полиармированные гибридные КМ, содержащие гетероволоконные нити, существенно отличающиеся прочностными и упругими свойствами, пространственные многокомпонентные структуры КМ (например, каркас 3D из стеклянных и кварцевых волокон) и, особенно, органопластики или композиции, содержащие органические волокна из арамидных полимеров: Амос, СВМ, Терлон и др. (рис. 1, а, б).

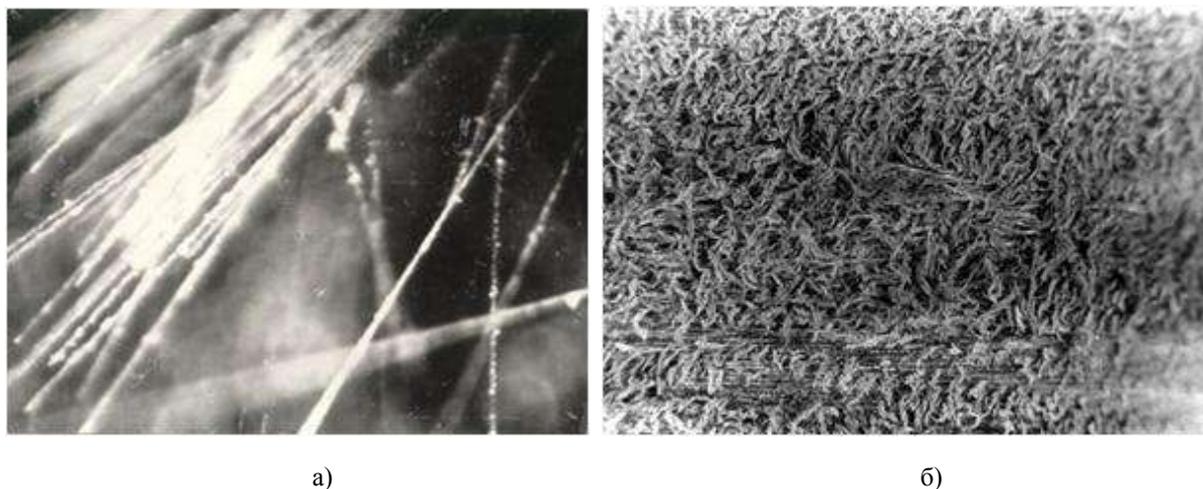


Рис. 1. Вид поверхности изделия из волокнистого ПКМ после токарной обработки: а – трехмерный пространственный стеклопластик 3К1Ф3, армированный кварцевыми волокнами; б – органопластик СВМ-6;

Образование ворсистой сопровождается формированием микроповреждений и дефектного слоя материала обработанной поверхности: сетка микротрещин в виде надрезов, специфические трещины, края которых соединены волокнами полимера, локальные расслоения, микро- и макроотслоениями и др. [5–7, 11–14].

Образовавшаяся после механической обработки резанием ворсистость поверхности не устраняется ни одним из традиционных способов, включая отделочные методы обработки такие, как отделочное шлифование, доводка, притирка, полирование, хонингование, суперфиниширование, а также методы поверхностного пластического деформирования. Дополнительное механическое воздействие на поверхностный слой волокнистых композитов зачастую вызывает формирование новых дефектов и развитие уже имеющихся, накопление микроповреждений.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод чистовой обработки ПКМ – резание с дополнительным технологическим покрытием (ДТП) [15], позволяющий значительно повысить качество обработанной поверхности. Сущность метода заключается в том, что обработка в окончательный размер осуществляется за два прохода инструмента. Первым проходом в окончательный размер обрабатывается поверхность изделия; затем путем нанесения твердеющего технологического покрытия (рис. 2) связывают образовавшийся после обработки изделия ворс (рис. 1, а, б), и уже вторым (чистовым) проходом в оконча-

тельный размер удаляется ворс, прочно удерживаемый связующим (рис. 3), вместе с затвердевшим временным покрытием.

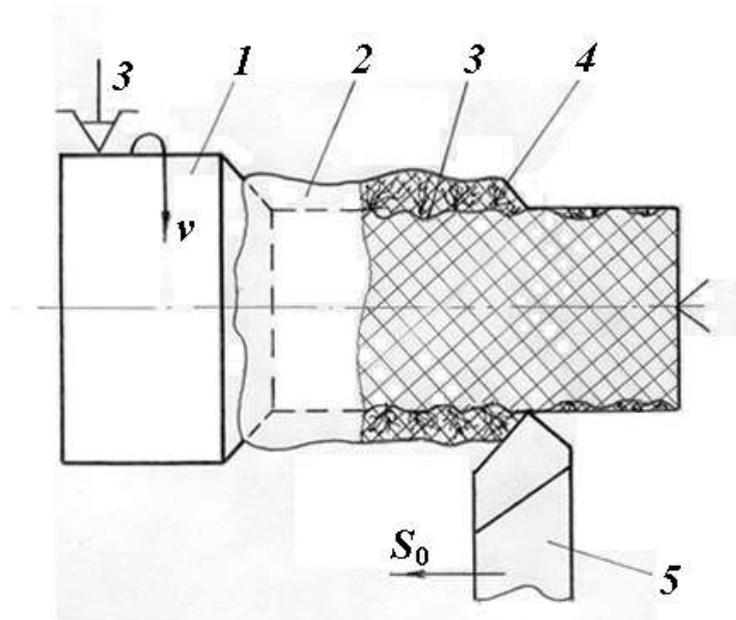


Рис. 2. Схема точения ПКМ с дополнительным технологическим покрытием (чистовой проход):
1 – заготовка; 2 – технологическое покрытие; 3 – профиль обработанной поверхности после первого (предварительного) прохода инструмента; 4 – ворс, образовавшийся на поверхности после первого прохода; 5 – инструмент

В качестве покрытия используют различные типы связующего, применяемого при изготовлении ПКМ, или быстротвердеющие клеи и лаки, имеющие химическое сродство с материалом изделия [16].

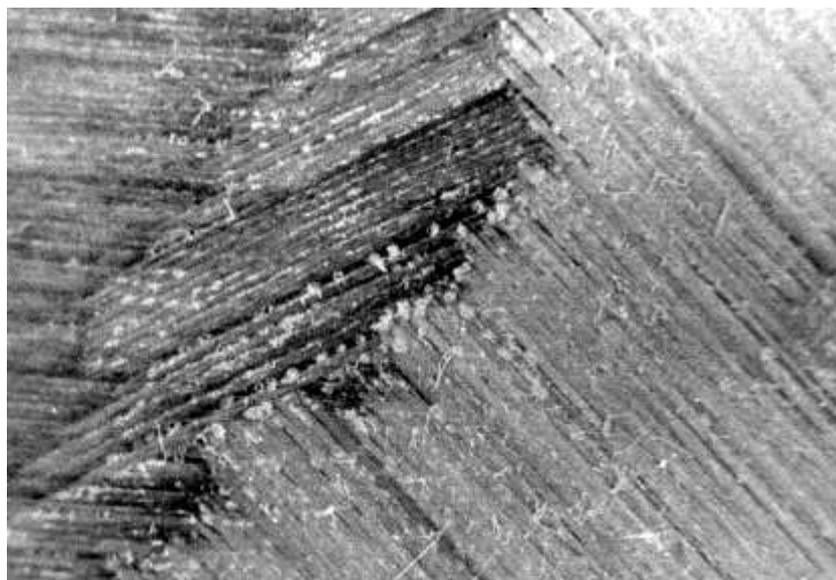


Рис. 3. Вид поверхности изделия из органопластика СВМ-6 после токарной обработки с ДТП

Технологическое покрытие заполняет макро- и микронеровности обрабатываемой поверхности заготовки, образует после полимеризации (или отверждения) прочное соединение компонента с обрабатываемым материалом и обеспечивает хорошую адгезию отдельных перерезанных волокон со связующим. При этом, как правило, существенно снижается шероховатость обработанной поверхности, частично устраняются дефекты поверхностного слоя изделия (микротрещины, локальные сколы и отслоения матрицы), связанные с процессом стружкообразования на первом проходе инструмента в окончательный размер [16, 17]. Эффективность применения метода резания с ДТП при обработке волокнистых композитов зависит, прежде всего, от достигнутой после отверждения покрытия адгезионной прочности сцепления нанесенного покрытия с материалом поверхностного слоя изделия и ворсом, образовавшимся на нем.

Однако, время, затрачиваемое на отверждение покрытия перед вторым проходом режущего инструмента в окончательный размер, существенно увеличивает норму времени, необходимую для выполнения технологической операции чистовой обработки КМ с ДТП, снижает производительность обработки, повышает себестоимость изделия.

В статье приводятся результаты экспериментального исследования, направленные на повышение производительности метода чистовой обработки резанием с ДТП путем поиска способов сокращения времени полимеризации или отверждения наносимого покрытия при условии обеспечения высокого качества обработанных поверхностей.

Методика испытаний

Технологические испытания метода резания с ДТП выполняли на операции наружного точения трубчатых образцов ($D_{нар} = 130$ мм, $D_{вн} = 110$ мм, $L = 55$ мм) из органопластика на основе арамидного волокна СВМ-6, полученных методом тангенциальной намотки. При изготовлении образцов в качестве материала матрицы использовалось эпоксидное связующее ЭДТ-10 (ОСТ 3-3178-75), состоящее из эпоксидного компаунда и отвердителя полиэтиленполиамина (ПЭПА) – ТУ 6-02-594-85.

Обработку производили на токарно-винторезном станке модели 1К62 резцами из быстрорежущей стали Р6М5 с установленными ранее [17] оптимальными геометрическими параметрами режущей части: передний угол $\gamma = 20^\circ$, задний угол $\alpha = 20^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 5^\circ$, радиус вершины $r_\epsilon = 2$ мм. Эксперименты осуществляли на следующем режиме обработки: скорость резания $v \approx 2,5$ м/с, подача $S = 0,21$ мм/об, глубина резания $t = 0,3$ мм; без СОЖ. Качество обработки оценивали величиной параметра шероховатости поверхности Ra . Дополнительными характеристиками качества обработки были приняты показатель ворсистости поверхности и фиксируемые дефекты поверхностного слоя: микротрещины, отслоения и др.

Измерение высоты микронеровностей производили на двойном микроскопе Линника – МИС-1. Полученные значения Rz конвертировали с помощью корреляционных зависимостей в параметр шероховатости Ra . Количественной мерой ворсистости служит «коэф-

фициент ворсистости» K_B , представляющий отношение площади поверхности, покрытой ворсом (см. рис. 1), к площади всей обработанной поверхности [16, 18].

При испытаниях рассматриваемого метода обработки резанием в качестве дополнительного технологического покрытия использовали то же эпоксидное связующее ЭДТ-10, которое применялось и при изготовлении обрабатываемых образцов, что обеспечило высокую адгезионную прочность сцепления нанесенного слоя покрытия с основным материалом заготовки и ворсом, образовавшимся на первом проходе инструмента в окончательный размер.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Уменьшение оперативного времени чистовой обработки резанием с ДТП

Качество обработанной с ДТП поверхности определяется составом (массовым соотношением K_m между смолой и отвердителем) и степенью отверждения покрытия. Экспериментально было установлено, что в случае применения покрытия из эпоксидного связующего ЭДТ-10 с отношением компонентов 10:1 ($K_m = 10$) высокое качество обработанной поверхности достигается после холодного отверждения (при комнатной температуре) длительностью 10–11 часов. Увеличение времени отверждения до 15, 20 и 24 часов не приводит к заметному повышению фиксируемых показателей качества поверхности.

Одним из способов сокращения времени полимеризации покрытия и, тем самым, повышения производительности обработки за счет уменьшения оперативного времени является изменение весового соотношения между эпоксидной смолой и отвердителем. В процессе исследования влияния состава связующего соотношение масс смолы и отвердителя изменяли в интервале от 10:1 до 5:1 ($K_m = 10...5$). Обработку покрытия резанием осуществляли после полного отверждения нанесенного слоя.

На рис. 4 представлена зависимость изменения параметра шероховатости поверхности Ra от массового соотношения K_m между смолой и отвердителем (кривая 1). Из графика 1 рис. 4 видно, что наиболее высокое качество обработанной поверхности (8-й класс шероховатости) достигается при соотношении компонентов смолы и отвердителя 10:1 ($K_m = 10$). Такой состав эпоксидного связующего марки ЭДТ-10 считают оптимальным при изготовлении конструкций из органопластика, позволяющим наиболее полно реализовать прочностные характеристики материала в условиях эксплуатации изделия. Повышение содержания отвердителя в связующем вызывает увеличение параметра шероховатости, что объясняется снижением прочности адгезионной связи ДТП с поверхностью изделия и ворсом, образовавшимся на первом проходе инструмента в окончательный размер. Кроме того, при $K_m \leq 7$ на обработанной поверхности появляются локальные отслоения покрытия, отдельные сколы и раковины.

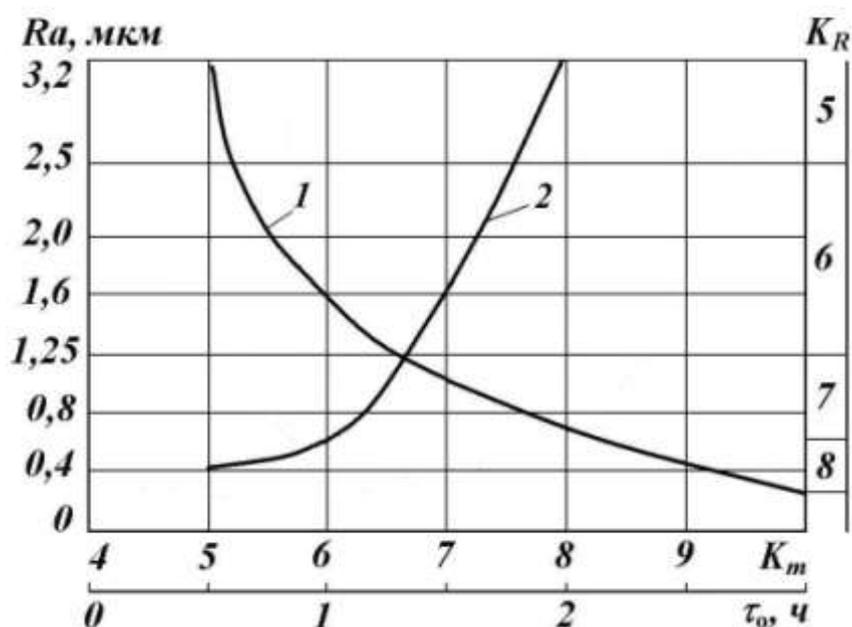


Рис. 4. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности Ra (класса шероховатости поверхности K_R) при резании с ДТП от состава эпоксидного связующего K_m (кривая 1) и времени его предварительного отверждения τ_0 (2)

Вместе с тем, увеличение массовой доли отвердителя сокращает время полимеризации покрытия. Так, при увеличении в эпоксидном связующем отвердителя ПЭПА вдвое (отношение 5:1, т.е. $K_m = 5$) время полимеризации уменьшается примерно в 4 раза. Таким образом, если требования к шероховатости поверхности не являются предельными, соотношение между компонентами связующего может выбираться в соответствии с зависимостью $Ra = f(K_m)$ (см. рис. 4, кривая 1). В этом случае отрезок времени между первым проходом инструмента в окончательный размер и его вторым проходом для обработки поверхности с нанесенным на нее покрытием может быть существенно уменьшен.

Сокращение продолжительности технологического цикла можно также достигнуть путем нанесения подготовленного связующего на обрабатываемую поверхность не сразу после смешивания его компонентов, а через некоторый промежуток времени. Влияние времени предварительной выдержки связующего (вне изделия) на качество обработанной поверхности определяли для оптимального массового соотношения между смолой и отвердителем – 10:1. Обработку изделия производили после полимеризации полимерной композиции, примерно через 10 часов от момента смешивания компонентов связующего.

Зависимость изменения шероховатости поверхности от времени τ_0 предварительного отверждения композиции, предшествующего ее нанесению на обрабатываемую поверхность, приведена на рис. 4, кривая 2. Согласно рис. 4 нанесение покрытия примерно через один час предварительной полимеризации мало отражается на величине шероховатости обработанной поверхности, которая остается в пределах 8-го класса. Дальнейшее увеличение времени τ_0 предварительной полимеризации связующего вызывает значительное ухудшение качества обработанной резанием с ДТП поверхности.

Одним из средств повышения производительности процесса резания с ДТП волокнистых ПКМ путем уменьшения длительности цикла чистовой обработки и снижения, тем самым, оперативного времени является применение повышенных температур в период полимеризации или отверждения покрытия.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости изменения времени полимеризации технологического покрытия τ_n от температуры θ . Как видно, при массовом соотношении между смолой и отвердителем 10:1 (кривая 1) нагрев до температуры 120 °С снижает время полимеризации слоя покрытия с 9 часов при комнатной температуре (20 °С) до 30 мин. Для композиции с соотношением 7:1 (кривая 2) время полимеризации при нагреве до 100°С уменьшается с 7 часов до 25 мин. Это позволяет значительно, до 18 раз, сократить необходимый промежуток времени между первым и окончательным чистовым проходами инструмента в окончательный размер при реализации процесса резания с ДТП.

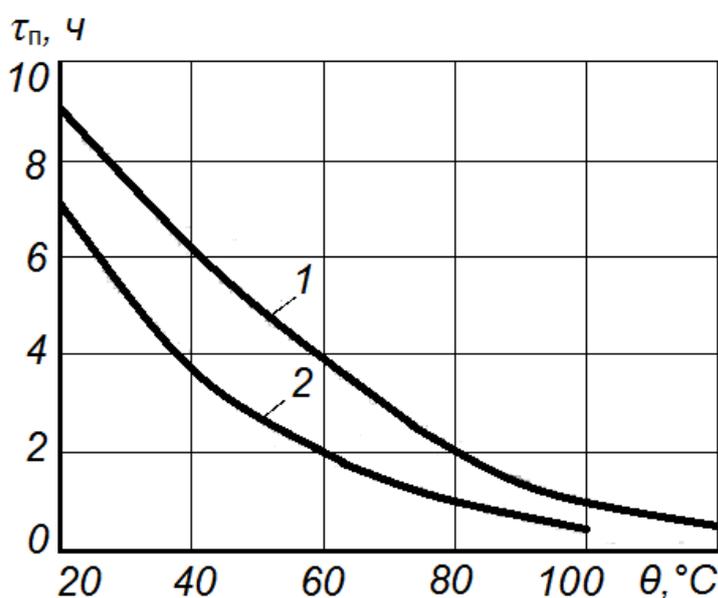


Рис. 5. Влияние температуры на время полимеризации эпоксидного дополнительного технологического покрытия: 1 – $K_m = 10$ (соотношение между смолой и отвердителем 10:1); 2 – $K_m = 7$ (7:1)

2. Обеспечение качества обработанной поверхности при резании с ДТП

Микрогеометрия и состояние поверхности (ворсистость, глубина дефектного слоя и др.) при обработке КМ резанием с ДТП зависят от ряда сопутствующих факторов, таких как толщина слоя покрытия h_n , ворсистость поверхности, подготовленной под покрытие, мера износа режущего инструмента и др.

При экспериментальном определении влияния толщины покрытия на шероховатость поверхности эпоксидное связующее 1 (рис. 6) из патрубка 2 наносили на предварительно обработанную резанием поверхность 3 при непрерывном вращении заготовки с малой угловой скоростью $n_{шп} = 12,5 \text{ мин}^{-1}$, что позволяло обеспечивать равномерное распределение технологического покрытия по всей окружности заготовки. Вращение заготовки осуществляли до полного отверждения связующего. Для регулирования толщины слоя по-

крытия применяли специальную "прижимную" планку 4, которую устанавливали в резцедержателе станка с зазором, величина которого составляла по отношению к поверхности 2 заготовки необходимую величину слоя ДТП – $h_{\text{п}}$. Планку изготавливали из фторопласта, отличающегося малой адгезией по отношению к технологическому покрытию.

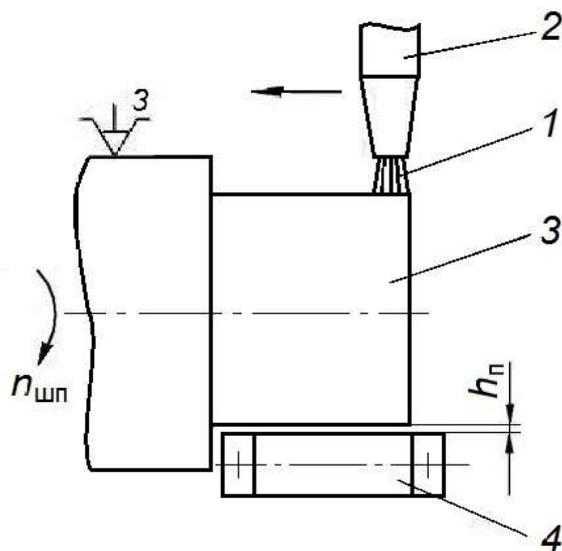


Рис. 6. Схема нанесения на поверхность образца технологического покрытия заданной толщины:
1 - покрытие, 2 - патрубок, 3 - образец, 4 - планка прижимная

Из графика 1 на рис. 7 видно, что уменьшение толщины слоя покрытия менее 0,8...1 мм вызывает резкое повышение величины параметра Ra шероховатости поверхности. Одновременно увеличивается коэффициент ворсистости обработанной поверхности.

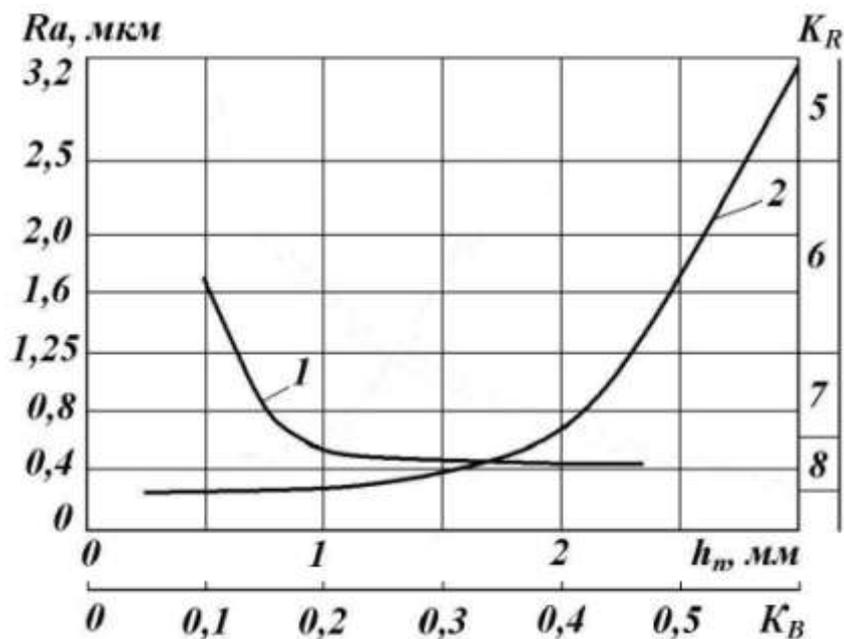


Рис. 7. Изменение параметра шероховатости обработанной поверхности Ra (класса шероховатости поверхности K_R) при резании с ДТП в зависимости от толщины слоя покрытия $h_{\text{п}}$ (1) и коэффициента исходной ворсистости поверхности K_B (2)

Прочность адгезионного взаимодействия ворса со связующим при малой толщине покрытия оказывается недостаточной для перерезания режущим инструментом выступающих волокон, которые под действием силовых факторов будут вытягиваться из связующего. В результате на обработанной поверхности при окончательном чистовом проходе инструмента образуются новые участки, покрытые ворсом, а также проявляются и другие поверхностные дефекты: локальные отслоения покрытия, микротрещины и т.п.

Кроме того, качество обработки при резании с ДТП во многом определяется состоянием поверхности после предварительного (первого) прохода инструмента перед нанесением дополнительного покрытия. На рис. 7 представлены опытные данные влияния величины коэффициента ворсистости K_B исходной поверхности на параметр шероховатости Ra после чистового точения с ДТП (кривая 2). Из графика видно, что при относительно небольших величинах коэффициента K_B (до 0,35) метод резания с ДТП обеспечивает высокое качество обработки – 8-ой класс шероховатости поверхности. Рост коэффициента ворсистости $K_B > 0,4$ вызывает значительное увеличение параметра шероховатости поверхности Ra после удаления временного покрытия на чистовом проходе инструмента при резании с ДТП, приводит к образованию дефектов в наружном слое обработанной поверхности.

Характеристики качества обработанной поверхности и, в первую очередь, ее ворсистость зависят от величины износа инструмента. На рис. 8 представлены типовые закономерности изменения коэффициента ворсистости K_B от величины износа по задней поверхности режущего инструмента h_3 при токарной обработке поверхности изделия из органо-пластика СВМ-6 под покрытие (кривая 1) и чистовой обработке резанием с ДТП (кривая 2).

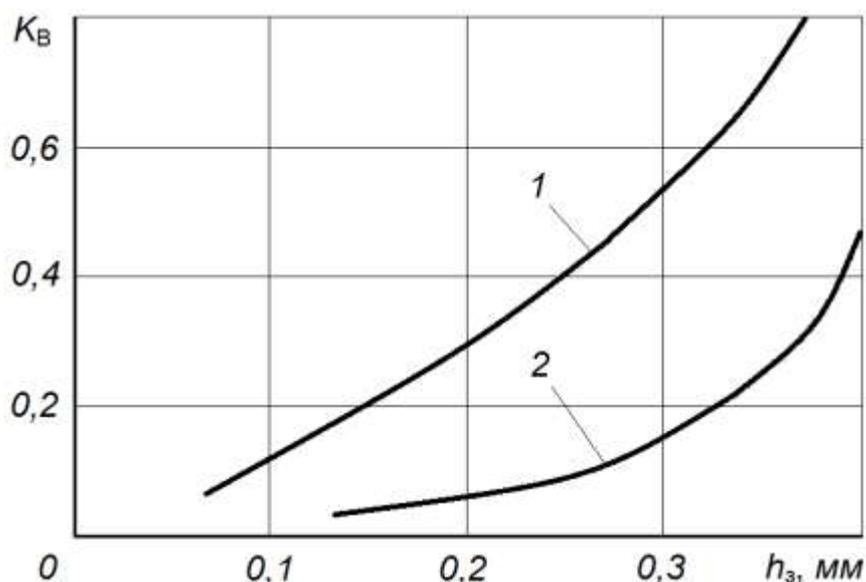


Рис. 8. Изменение коэффициента ворсистости K_B в зависимости от износа режущего инструмента h_3 ($K_m = 10$): 1 – после предварительного обтачивания поверхности под покрытие; 2 – после окончательного, чистового прохода инструмента с удалением слоя ДТП.

Из рис. 8 видно, что с ростом величины фаски износа h_3 ворсистость поверхности монотонно увеличивается. При значениях h_3 более 0,2...0,25 мм интенсивность повышения коэффициента ворсистости возрастает. Вместе с этим изменяется и шероховатость поверхности. Согласно опытным данным при обработке резанием с ДТП органопластика СВМ-6 увеличение фаски износа резца h_3 в интервале 0,13...0,4 мм вызывает рост параметра шероховатости поверхности Ra от 0,32 мкм до 4,0 мкм.

Заключение

Метод обработки резанием с дополнительным технологическим покрытием разрабатывался для решения производственных задач, связанных с обеспечением качества поверхностного слоя изделий из ПКМ с наполнителем из непрерывных нитевидных волокон. При этом наибольшие проблемы возникают при производстве изделий из органопластиков или композиций, содержащих органические волокна, что проявляется в образовании на обработанной поверхности ворса из перерезанных волокон наполнителя, низкими значениями класса шероховатости поверхности и формировании дефектного слоя на обработанной поверхности. Разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана метод чистовой обработки волокнистых ПКМ при оптимальных условиях обработки органопластика СВМ-6 позволил практически полностью исключить образование ворса на обработанной поверхности и обеспечить 7–8-й класс шероховатости при отсутствии заметных дефектов поверхностного слоя.

Кроме того, результаты исследований, направленных на совершенствование технологии обработки резанием с ДТП, позволили дать рекомендации по рациональному выбору температуры отверждения покрытия и условий обработки с учетом требований к качеству изготовления, и таким путем достичь многократного сокращения времени, затрачиваемого на выполнение технологического процесса и длительность цикла обработки резанием с ДТП.

Список литературы

1. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение, 1987. 176 с.
2. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. DOI: [10.7463/0412.0361759](https://doi.org/10.7463/0412.0361759)
3. Криворучко Д.В., Залого В.А., Пасечник В.А., Колесник В.А., Емельяненко С.С., Некрасов С.С. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов: аналитический обзор / под общ. ред. проф. В.А. Залого. Сумы: Университетская книга, 2013. 272 с.
4. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 752 с.

5. Ярославцев В.М. Процесс образования стружки при резании полимерных композиционных материалов с волокнистыми наполнителями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 2. С. 81-87.
6. Бойцов А.Г., Дудаков В.Б., Плешаков А.В. [Новое в обработке композитов](#) // [РИТМ: Ремонт, Инновации, Технологии, Модернизация](#). 2014. № 6 (94). С. 34-36.
7. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В., Алфутов Н.А., Бейль А.И., Бунаков В.А., Дымков И.А., Ермоленко А.Ф., Жигун И.Г., Зиновьев П.А., Кинцис Т.Я., Клейменов В.В., Круклиныш А.А., Кульков А.А., Мануйлов В.Ф., Попов Б.Г., Портнов Г.Г., Сироткин О.С., Скудра А.М., Соловьев И.А., Тарнопольский Ю.М., Царахов К.С. Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
8. Вильдеман В.Э., Рочев И.Н. Кинетика разрушения волокнистых композитов с упруго-пластической матрицей // Вестник ПГТУ. Математическое моделирование систем и процессов. 1996. № 4. С. 14-19.
9. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
10. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. М.: Издательский дом «Интеллект», 2010. 352 с.
11. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978. 294 с.
12. Баженов С.Л. Механика и технология композиционных материалов. М.: Издательский дом «Интеллект», 2014. 328 с.
13. Миронов Ю.М., Храповицкая Ю.В., Макеев М.О., Нелюб В.А., Бородулин А.С., Чуднов И.В., Буянов И.А. Оценка структурных дефектов углеродных волокон и полимерных композиционных материалов на их основе // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11.
14. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
15. Ярославцев В.М., Буланова М.В. Способ обработки композиционных материалов: а. с. № 839711 СССР. 1981. Бюл. № 23.
16. Ярославцев В.М. Обработка резанием полимерных композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 182 с.
17. Ярославцев В.М., Сабельников В.В., Гусенко А.Ю. Технологические возможности чистовой обработки резанием волокнистых композиционных материалов с применением технологического покрытия // Известия вузов. Машиностроение. 1998. № 4-6. С. 100-104.
18. Ярославцев В.М. Особенности и метрологические резервы оценки качества изделий из полимерных композиционных материалов // Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам. 2012. № 11. С. 30-35.

An Improved Cutting Method with Additional Technological Coating for Clean Finishing of Fibrous Composites

V.M. Yaroslavtsev^{1,*}

[*mt13@bmstu.ru](mailto:mt13@bmstu.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: polymer composites, hairiness, cutting with an additional technological coating, improvement of the surface quality, increase in productivity

Due to specifics of structure and properties of some kinds of polymer fibrous composites (organoplastics, hybrid materials containing organofibers etc.), when cutting, a hairiness of cut fibrous material and a property damage of surface appear on the machined surface, thereby substantially restricting achievable classes of surface quality, i.e. surface roughness, material condition of the surface layer, dimensional accuracy, etc. These features of polymer composite materials (PCM) allow their referring to a special group of hard-to-cut materials, which requires creation and use of unconventional machining methods and tools to provide high-quality treatment and desirable engineering and economic indicators.

The BMSTU has developed a clean finishing method of PCM, i.e. cutting with an additional technological coating (ATC). A principle of the method is that the two-pass machining in the finish size is provided. The first cutting tool pass provides processing in the pre-finish size of the product surface; then the hairiness appeared after machining is bound by applying a curing technological coating, and the second (finishing) pass in the final size removes a tightly binder-held hairiness together with cured temporary coating. This allows us to reduce roughness, significantly reduce dimensions and number of defects of the surface layer. However, the time required to cure the temporary coating before the second (final) pass of a cutting tool results in lower production rates of finishing with ATC, reduced performance rate, and higher product cost. Increased performance rate in ATC cutting, with the same high quality of the processed surfaces of fibrous composites, has been achieved by reducing the curing time of coating that can be realized in different ways.

It has been experimentally established that under optimum processing conditions high quality of surface (roughness class of 7-8) and substantially reduced curing time of coating, i.e. the time interval between preliminary and final tool passes are achieved through the temperature control of ATC curing. Thus, the coating heated from 20 °C to 120 °C provides 18 times reduction of its curing time. Time of ATC cutting operation can be lessened more through pre-curing of technological coating on the site where components are mixed before applying it on the prod-

uct to be cut. Changing weight ratio between the epoxide compound and the curing agent also has a significant impact on the curing time.

The study has shown that the quality of the machined surface when cutting with ATC is also dependent on processing conditions such as the thickness of the coating layer (0.8 ... 1 mm at least), the surface crispness after preliminary pass of a tool before applying the temporary coating, and the wear rate of a cutting tool. To ensure the economic efficiency of the ATC cutting process and high quality of treatment it is necessary to take into account all abovementioned factors that affect the machined surface.

References

1. Stepanov A.A. *Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov* [Processing by cutting of high-strength composite polymer materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 176 p. (in Russian).
2. Yaroslavtsev V.M. High efficiency technologies of machining of products made of composite materials. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 4. DOI: [10.7463/0412.0361759](https://doi.org/10.7463/0412.0361759) (in Russian).
3. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A., Pasechnik V.A., Kolesnik V.A., Emel'yanenko S.S., Nekrasov S.S. *Mekhanicheskaya obrabotka kompozitsionnykh materialov pri sborke letatel'nykh apparatov: analiticheskii obzor* [Machining of composite materials in the assembly of aircrafts: an analytical review]. Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2013. 272 p. (in Russian).
4. Mikhailin Yu.A. *Voloknistye polimernye kompozitsionnye materialy v tekhnike* [Fibrous polymer composite materials in technique]. St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2013. 752 p. (in Russian).
5. Yaroslavtsev V.M. Process of Chip Forming in Cutting of Polymer Composite Materials with Fibrous Fillers. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2012, no. 2, pp. 81-87. (in Russian).
6. Boitsov A.G., Dudakov V.B., Pleshakov A.V. [New in processing of composites](#). *RITM: Remont, Innovatsii, Tekhnologii, Modernizatsiya*, 2014, no. 6, pp. 34-36. (in Russian).
7. Vasil'ev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V., Alfutov N.A., Beil' A.I., Bunakov V.A., Dymkov I.A., Ermolenko A.F., Zhigun I.G., Zinov'ev P.A., Kintsis T.Ya., Kleimenov V.V., Kruklin'sh A.A., Kul'kov A.A., Manuilov V.F., Popov B.G., Portnov G.G., Sirotkin O.S., Skudra A.M., Solov'ev I.A., Tarnopol'skii Yu.M., Tsarakhov K.S. *Kompozitsionnye materialy: spravochnik* [Composite materials: a handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 512 p. (in Russian).
8. Vil'deman V.E., Rochev I.N. Kinetics of destruction of fiber composites with elastic-plastic matrix. *Vestnik PGTU. Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov*, 1996, no. 4, pp. 14-19. (in Russian).

9. Bartenev G.M. *Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov* [Strength and mechanism of destruction of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 280 p. (in Russian).
10. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kul'kov A.A., Oshmyan V.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy. Prochnost' i tekhnologiya* [Polymer composite materials. Strength and technology]. Moscow, Publishing House "Intellect", 2010. 352 p. (in Russian).
11. Tamuzh V.P., Kuksenko V.S. *Mikromekhanika razrusheniya polimernykh materialov* [Micro-mechanics of destruction of polymeric materials]. Riga, Zinatne Publ., 1978. 294 p. (in Russian).
12. Bazhenov S.L. *Mekhanika i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* [Mechanics and technology of composite materials]. Moscow, Publishing House "Intellect", 2014. 328 p. (in Russian).
13. Mironov Yu.M., Khrapovitskaya Yu.V., Makeev M.O., Nelyub V.A., Borodulin A.S., Chudnov I.V., Buyanov I.A. Structural defect estimation of carbon fibers and polymer composites based on these fibers. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 11. (in Russian).
14. Bulanov I.M., Vorobei V.V. *Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruksii iz kompozitsionnykh materialov: ucheb. dlya vuzov* [Technology of missile and aerospace constructions from composite materials: textbook for universities]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1998. 516 p. (in Russian).
15. Yaroslavtsev V.M., Bulanova M.V. *Sposob obrabotki kompozitsionnykh materialov* [Method of processing of composite materials]. Author's certificate USSR, no. 839711, 1981. (in Russian).
16. Yaroslavtsev V.M. *Obrabotka rezaniem polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Processing by cutting of polymer composites]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 182 p. (in Russian).
17. Yaroslavtsev V.M., Sabel'nikov V.V., Gusenko A.Yu. Technological possibilities of clean processing by cutting of fibrous composite materials with the use of technological coating. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 1998, no. 4-6, pp. 100-104. (in Russian).
18. Yaroslavtsev V.M. Features and metrological reserves for quality rating of products made of polymer composite materials. *Kommentarii k standartam, TU, sertifikatam = Comments to the standards, specifications, certificates*, 2012, no. 11, pp. 30-35. (in Russian).