

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

^{1,2}Болотников И.С.*, ¹Косенко Е.А.

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

²ЗАО «Универсал-Аэро»,

*igor_bolotnikov@rambler.ru

Приводятся результаты теоретического анализа факторов, оказывающих влияние на качество механической обработки полимерных композиционных материалов (ПКМ). На примере механической обработки базальтопластиков инструментом из быстрорежущей стали продемонстрировано влияние режимов резания и использования смазочно-охлаждающей жидкости на качество поверхности реза. На базе математического аппарата линейного программирования разработана модель выбора оптимального технологического процесса механической обработки ПКМ.

Ключевые слова: базальтопластик, детали машин, математическое моделирование, механическая обработка, оптимизация, полимерные композиционные материалы, симплекс-метод, режим обработки, смазочно-охлаждающая жидкость.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MECHANICAL PROCESSING OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

^{1,2}Bolotnikov I.S., ¹Kosenko E.A.

¹Moscow automobile and road construction state technical university (MADI)

²Universal-Aero

The results of a theoretical analysis of the factors influencing the quality of mechanical processing of polymer composite materials (PCM) are presented. On the example of mechanical treatment of basalt plastics with a tool made of high-speed steel, the influence of cutting modes and the use of lubricating fluid on the quality of the cutting surface has been demonstrated. On the basis of the mathematical apparatus of linear programming, a model was developed for choosing the optimal technological process for machining PCM.

Keywords: basalt plastics, machine parts, mathematical modeling, machining, optimization, polymer composite materials, simplex method, processing mode, cutting fluid.

Введение

Одним из перспективных направлений развития промышленности, в частности, машиностроения, является создание высокотехнологичных наземных транспортно-технологических машин с применением композиционных материалов. Композиционные материалы имеют высокие значения удельной прочности и жесткости, усталостной долговечности, могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур, имеют малый температурный коэффициент линейного расширения, что делает их материалами с широкими технологическими возможностями [1]. На международном и российском рынках наибольшее распространение среди различных типов композитов получили полимерные композиционные материалы (ПКМ).

Благодаря возможности создавать изделия с заданным, зачастую противоречивым комплексом свойств, небольшой массы и повышенной коррозионной стойкости, ПКМ нашли широкое применение при производстве как мелких, но конструктивно сложных и ответственных деталей, так и крупногабаритных корпусных деталей, несущих значительные нагрузки [2]. Однако расширению использования ПКМ в различных отраслях промышленности, в том числе в дорожно-строительном машиностроении, препятствует недостаточная осведомленность инженерных и научных работников в вопросах их прочности, надежности и долговечности. Эти свойства приобретают особое значение, поскольку они менее изучены по сравнению с такими традиционными конструкционными материалами, как металлы и их сплавы [3].

На долговечность изделий из ПКМ, помимо применяемых компонентов и способов формования [4], большое влияние оказывает качество их обработки, которая связана с подрезкой торцов и кромок, раскроем листов ПКМ, удалением и обработкой технологических припусков, а также с выполнением отверстий под крепежные и резьбовые соединения [5, 6]. Обработку ПКМ, как правило, осуществляют механическим, лазерным и гидроабразивным методами [7]. Благодаря простоте и универсальности наибольшее распространение получил механический способ обработки ПКМ. Механическая обработка изделий из ПКМ, как правило, осуществляется точением, фрезерованием и сверлением.

Выбор способа, режущего инструмента (его геометрии и материала режущей кромки) и определение оптимальных режимов механической обработки изделий из ПКМ является важной и актуальной задачей, направленной на обеспечение заданного качества обрабатываемой поверхности. Основная проблема решения данной задачи заключается в анизотропии и уникальности свойств ПКМ, которые зависят не только от структуры, состава и используемых компонентов, но и от способа формования изделий и их последующего отверждения.

При выборе инструментального материала для обработки ПКМ необходимо учитывать такие его свойства как высокая твердость, сопротивляемость на сжатие и изгиб, предел выносливости, ударная вязкость, теплостойкость, теплопроводность и износостойкость [8].

В качестве инструментальных материалов для обработки ПКМ используют быстрорежущие стали, твердые сплавы и алмазный режущий инструмент (инструмент с алмазным напылением).

Наибольшее распространение получил твердосплавный режущий инструмент и инструмент с алмазным напылением [9, 10]. В частности, широко используются рашпильные фрезы, у которых левые и правые спирали находятся на периферии инструмента, пересекаясь создают множество режущих ромбовидных зубьев. Данные фрезы используют для получения чистого реза при повышенных скоростях резания и подачи [10].

Широкое применение твердосплавного режущего инструмента при обработке ПКМ обусловлено их высокой износостойкостью и теплопроводностью. При этом более высокой стойкостью обладают мелкозернистые сплавы с высоким содержанием кобальта [11].

Использование алмазного режущего инструмента позволяет снизить силы резания и температуру в зоне резания за счет более низкого, чем у твердосплавного инструмента, коэффициента трения.

Инструмент из быстрорежущей стали обладает высокими режущими свойствами, что достигается легированием такими элементами, как вольфрам, молибден, кобальт, ванадий, хром и др. Важнейшим легирующим элементом быстрорежущей стали является вольфрам. Недостатком инструмента из быстрорежущей стали является его более низкая износостойкость и теплопроводность по сравнению с твердыми сплавами.

Под воздействием механических и термических нагрузок в процессе механической обработки происходит деструкция компонентов ПКМ, что негативно влияет на качество получаемых изделий. Температура в зоне резания не должна превышать значения температуры, при котором происходит деструкция материала связующего.

Снижение температуры в зоне резания помимо использования алмазного режущего инструмента достигается путем подбора оптимальных режимов резания, а также охлаждением сжатым воздухом или охлаждающей жидкостью (при этом важно учитывать вероятность поглощения влаги полимерным композиционным материалом).

Цель работы заключается в экспериментальном определении факторов, оказывающих влияние на качество механической обработки ПКМ на примере фрезерования базальтопластика инструментом из быстрорежущей стали и разработке математической модели выбора оптимальной технологии выполнения обработки.

Материалы и метод проведения эксперимента

Для выполнения исследований были изготовлены плоские образцы базальтопластика по препреговой технологии вакуумформованием. Данная технология является сравнительно простой и позволяет получить высокое качество структуры композита. Образцы изготавливались из четырех слоев биаксиальной базальтовой ткани БТ400 с направлением волокон 0/90°.

Предварительно пропитанные связующим Epolam 2017 слои базальтовой ткани укладывались на плоскую оснастку, после чего формировался вакуумный мешок и создавалось вакуумное разряжение. Отверждение образцов осуществлялось в вакуумном мешке при нагреве до температуры $t=80\pm 2$ °C с помощью инфракрасных ламп. Толщина полученных образцов составила 2,7 мм.

Полученный базальтопластик подвергался резке на фрезерном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) концевой фрезой Ø 6 мм из быстрорежущей стали марки P6AM5.

Обработка образцов осуществлялась с использованием и без использования смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на 4-х режимах: 1) $n = 15000$ об/мин, $v = 3000$ мм/мин (максимальный режим); 2) $n = 5000$

об/мин, $v = 500$ мм/мин (высокий режим); 3) $n = 3000$ об/мин, $v = 100$ мм/мин (средний режим); 4) $n = 1000$ об/мин, $v = 100$ мм/мин (низкий режим).

В качестве СОЖ был использован Эмульсол ЭГТ (ТУ 0258-004-27192068-2002). Резание осуществлялось на заданную длину $l = 90$ мм.

Результаты и обсуждение

Исследования качества поверхности реза базальтопластика осуществлялось с помощью микровизора металлографического инвертированного Vizo-MET-221 при увеличении в 100 крат (рис. 1 и 2).

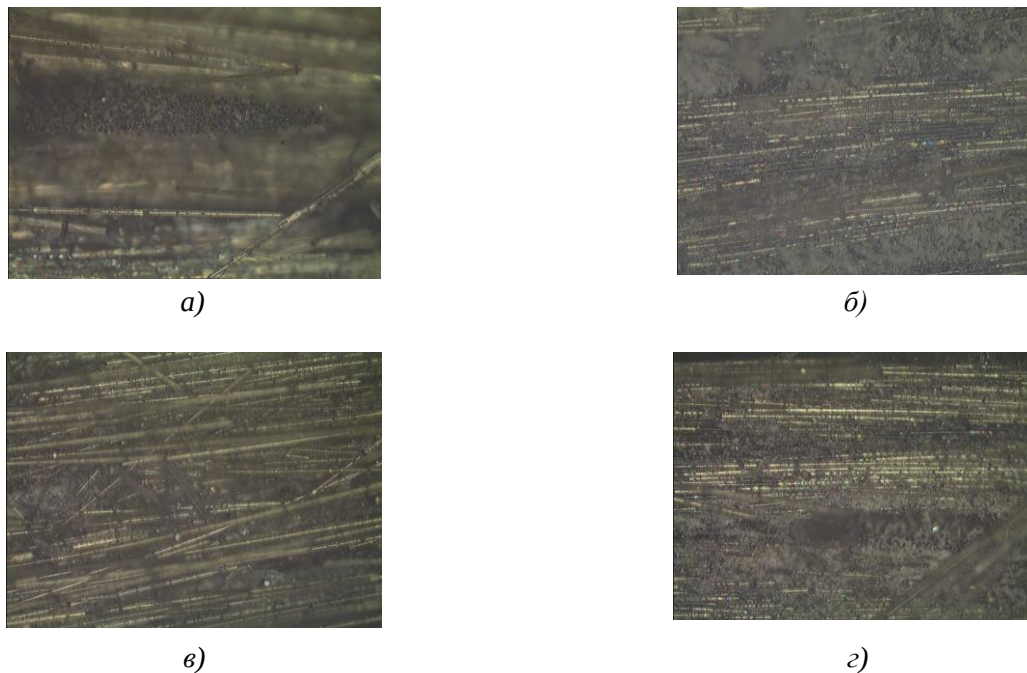


Рис. 1. Поверхность реза базальтопластика после фрезерования без применения СОЖ:

а) на максимальных режимах; б) на высоких режимах; в) на средних режимах; г) на низких режимах

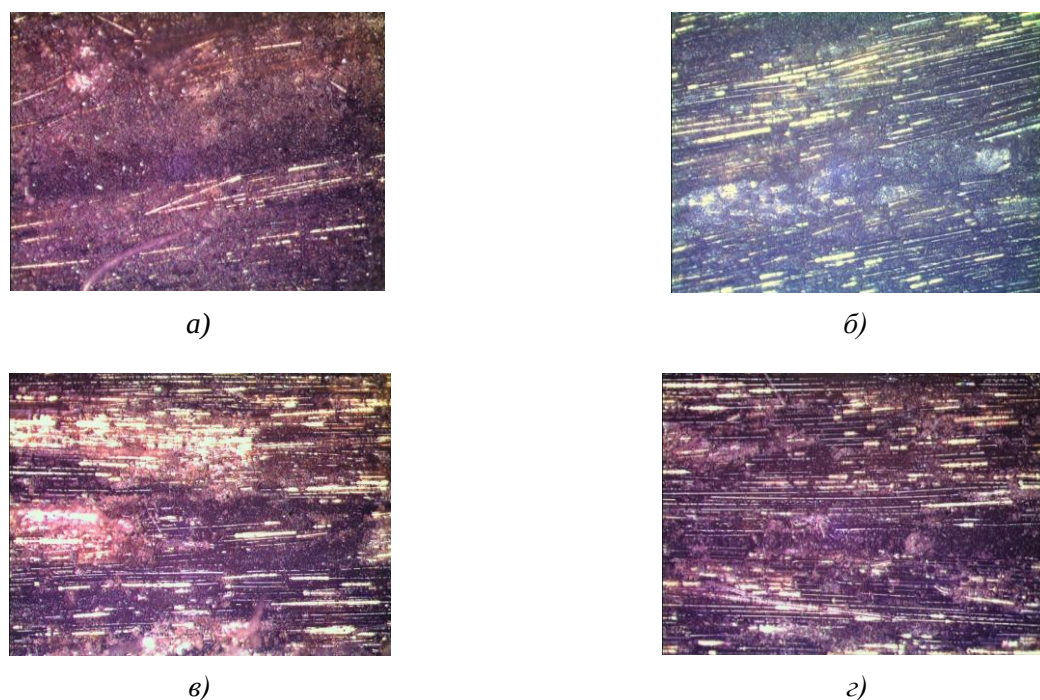


Рис. 2. Поверхность реза базальтопластика после фрезерования с применением СОЖ:

а) на максимальных режимах; б) на высоких режимах; в) на средних режимах; г) на низких режимах

Выполнение механической обработки на максимальных режимах как с применением СОЖ, так и без ее использования приводит к горению связующего и интенсивному износу режущего инструмента (рис. 1а и 2а).

Без использования СОЖ наилучшее качество поверхности реза наблюдается у образца, обработанного на высоких режимах (рис. 1б) (однако наблюдается выкрашивание материала матрицы и ее расслоение), а с использованием СОЖ – у образца, обработанного на средних режимах (однако наблюдается вытаскивание волокон и растрескивание матрицы) (рис. 2в).

Применение низких режимов резания не позволяет получить хорошего качества реза (рис. 1г и 2г). Характерными дефектами базальтопластиков, обработанных как с использованием, так и без использования СОЖ является непрорезание волокон и ворсистость, что требует применения постобработки. Применение СОЖ позволяет избежать излома волокон и значительно снизить объем пиролитического остатка (рис. 2г), однако наблюдается растрескивание матрицы.

При использовании СОЖ в процессе механической обработки базальтопластика существует вероятность поглощения СОЖ в зоне реза, в результате чего свойства композита могут ухудшаться.

Следует отметить, что композит в процессе обработки подвергается воздействию СОЖ крайне непродолжительное время. При этом СОЖ обладает достаточно густой консистенцией. В совокупности эти два фактора не приводят к сорбции СОЖ композитом в процессе обработки.

Выполненные исследования позволяют судить о перспективности применения инструмента из быстрорежущей стали для выполнения механической обработки ПКМ при условии оптимизации показателей режимов резания.

Математическая модель выбора оптимального технологического процесса механической обработки ПКМ

Для обработки кромок изделий из ПКМ длиной l может быть использовано m возможных технологических процессов, отличающихся типом используемого инструмента и вариацией режимов обработки, которые являются n факторами производства. При этом каждый производственный процесс характеризуется соответствующими технологическими коэффициентами, которые определяют затраты отдельного фактора производства на единицу длины обработки при использовании данного технологического процесса. Эти коэффициенты можно представить в виде матрицы способов производства.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{n1}$ – технологические коэффициенты первого производственного процесса, $a_{12}, a_{22}, \dots, a_{n2}$ – технологические коэффициенты второго производственного процесса, $a_{1m}, a_{2m}, \dots, a_{nm}$ – технологические коэффициенты m -ого производственного процесса.

В представленной матрице (1) столбцы выражают технологические процессы, а строки затраты факторов производства (на единицу длины обработки), соответствующие различным процессам.

Тогда, количество отдельных факторов, необходимое для обработки определенной длины l изделия при использовании m -ого технологического процесса будет равно $a_{1m}l, a_{2m}l, \dots, a_{nm}l$.

Анализ способов производства характеризуется конечным числом процессов, из которых выбирается один оптимальный или комбинация некоторого количества так, чтобы достигался наибольший производственный эффект.

Производственную функцию можно представить в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= a_{11}l; & x_1 &= a_{12}l; & \dots; & x_1 &= a_{1m}l \\ x_2 &= a_{21}l; & x_2 &= a_{22}l; & \dots; & x_2 &= a_{2m}l \\ \dots & & \dots & & \dots & & \dots \\ x_n &= a_{n1}l; & x_n &= a_{n2}l; & \dots; & x_n &= a_{nm}l \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В данной системе (2) m -й столбец содержит количества отдельных факторов производства, необходимые для обработки кромок изделия длиной l при использовании m -го технологического процесса. В строках системы определяются количества того же фактора производства, необходимые для обработки кромок изделия длиной l с использованием различных технологических процессов.

Для выбора оптимального технологического процесса рассмотрим два фактора производства: 1) тип инструмента, характеризующийся периодом стойкости инструмента; 2) режим обработки, характеризующийся скоростью резания. Предположим, что обработка кромок изделий из ПКМ может осуществляться тремя технологическими процессами. Технологические коэффициенты a_{im} ($I = 1, 2$; $m = 1, 2, 3$), определяющие количество i -го фактора, необходимое для обработки кромок изделий ПКМ длиной l представим в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Технологическая матрица

	1	2	3	c_i
1. Период стойкости инструмента	a_{11}	a_{12}	a_{13}	c_1
2. Скорость резания	a_{21}	a_{22}	a_{23}	c_2

В последнем столбце приводится значение количества отдельных факторов, которые могут быть использованы в технологическом процессе, т. е. период стойкости инструмента не может быть меньше c_1 , а скорость резания не может быть меньше c_2 .

Обозначив через μ_1, μ_2, μ_3 «масштабы применения», то есть длину обработки кромок изделий из ПКМ с помощью каждой из рассматриваемых технологий, то задачу можно сформулировать следующим образом:

$$l = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = \max \quad (3)$$

При выполнении побочных условий (4):

$$\begin{aligned} a_{11}\mu_1 + a_{12}\mu_2 + a_{13}\mu_3 &\geq c_1, \\ a_{21}\mu_1 + a_{22}\mu_2 + a_{23}\mu_3 &\geq c_2. \end{aligned} \quad (4)$$

и граничных условий (5):

$$\mu_1 \geq 0; \mu_2 \geq 0; \mu_3 \geq 0. \quad (5)$$

Далее с помощью симплекс-метода определяются оптимальные значения масштабов применения способов обработки и руководствуясь их значениями определяется наиболее эффективный метод обработки.

Также возможно решение двойственной задачи, которая заключается в том, чтобы найти такие λ_1 и λ_2 , чтобы выполнялось условие (6):

$$v = c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2 = \min, \quad (6)$$

При выполнении побочных условий (7):

$$\begin{aligned} a_{11}\lambda_1 + a_{21}\lambda_2 &\geq l, \\ a_{12}\lambda_1 + a_{22}\lambda_2 &\geq l, \\ a_{13}\lambda_1 + a_{23}\lambda_2 &\geq l. \end{aligned} \quad (7)$$

и граничных условий (8):

$$\lambda_1 \geq 0; \lambda_2 \geq 0. \quad (8)$$

Применяя симплекс метод, определяются значения λ_1 и λ_2 , тогда $v_{\min} = l_{\max}$.

Заключение

Для обеспечения высокого качества механической обработки изделий из ПКМ, повышения производительности процесса их резания и снижения себестоимости технологического процесса необходимо решить ряд задач, связанных с изучением кинематики процесса резания, геометрии и изнашивания режущего

инструмента, применяемых инструментальных материалов, деформации и стружкообразования при резании, тепловых явлений, сопровождающих процесс резания, функционирования системы резания, ее оптимизации и управления, а также точности и качества обработанной поверхности изделий из ПКМ.

Комплексное изучение этих вопросов позволит разработать новые прогрессивные технологические методы и рекомендации механической обработки различных видов ПКМ, определить пути интенсификации процесса резания за счет комбинации поверхностных и энергетических воздействий на ПКМ, оптимизировать параметры обработки и разработать технологические решения по их изменению.

«Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ»

Библиография

1. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Лашов О.А., Подживотов Н.Ю., Качан Д.В. Расчет напряжений в слоистом материале // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). С. 93–106.
2. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 6 (54). С. 7.
3. Баурова Н.И., Макаров К.А. Механическая обработка деталей машин из полимерных композиционных материалов // Технология металлов. 2017. № 2. С. 15–19.
4. Kosenko E.A., Baurova N.I., Zorin V.A. Service properties of composites with various types of hybrid matrices // Russian Metallurgy (Metally). 2020. V. 2020, N. 13. P. 1526–1530.
5. Буянов И.А., Малышева Г.В., Гузева Т.А., Федоров А.А. Современные технологии получения сквозных отверстий в углепластике в процессе формования // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 8. С. 43–47.
6. Болотников И.С., Косенко Е.А. Способы механической обработки деталей машин, изготовленных из волокнистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 6. С. 35–38.
7. Котов С.А., Дябин Н.А., Казарян М.А., Сачков В.И. Современные полимерные композиционные материалы и возможности их лазерной обработки // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 10–12 (258–260). С. 82–104.
8. Geiera N., Davimb J. P., Szalaya T. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. V. 125. Номер статьи 105552.
9. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). С. 12.
10. Минибаев М.И., Усачева М.Н., Дыщенко В.С., Гончаров В.А. Приспособление и инструмент для изготовления образцов из полимерных композиционных материалов на станке с ЧПУ (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). С. 100–109.
11. Лобанов Д.В. Разработка и реализация технологических методов создания, изготовления и выбора фрезерного инструмента для эффективной обработки композиционных неметаллических материалов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Лобанов Дмитрий Владимирович; ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»; ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный университет». Новосибирск, 2013. 381 с.