

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

*Д.А. РЫЧКОВ, канд. техн. наук, доцент
А.С. ЯНЮШКИН, доктор техн. наук, профессор
(БрГУ, г. Братск)*

Поступила 21 июня 2016
Рецензирование 15 июля 2016
Принята к печати 15 августа 2016

Рычков Д.А. – 665709, г. Братск, ул. Макаренко 40,
Братский государственный университет,
e-mail: dielektrik84@mail.ru

Экономическая эффективность является одним из основных критериев при проектировании производственного процесса. Этот критерий определяется затратами производства, включающими стоимость режущего инструмента и его подготовку к работе, затраты на заработную плату, энергию, материалы и т.п. Для различных параметров технологического процесса определяются приведенные затраты. Параметрами технологического процесса являются режимы резания, конструктивные и технологические характеристики режущего инструмента, а также свойства обрабатываемого материала. На основе расчетных данных и результатов экспериментальных исследований проведена рационализация технологических параметров с целью повышения экономической эффективности механической обработки полимерных композиционных материалов на примере фрезерования стеклотекстолита. Исследования показывают, что зависимость приведенных затрат от режимов резания имеет экстремальный характер, а положение точки минимума зависит от серийности производства. По результатам исследований разработаны рекомендации по назначению характеристик, обеспечивающих минимальные затраты производства.

Ключевые слова: эффективность производства, приведенные затраты, композиционный материал, режущий инструмент.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30

Введение

Создание новых конструкционных материалов для изготовления деталей различного технического назначения является неотъемлемой частью современной промышленности, поскольку требования к изделиям в основном направлены на снижение их массы, увеличение прочности, сохранение свойств при воздействии агрессивных сред и температуры без привлечения дополнительных затрат на производство. Этим требованиям удовлетворяют полимерные композиционные материалы с наполнителями из высокопрочных волокон или тканей. Изделия из упрочненных полимеров получают пропиткой волокон или тканей полимерным связую-

щим с последующим прессованием, что требует дополнительной обработки резанием [1–6]. Однако в процессе резания инструмент быстро изнашивается и не способен обеспечить высокую эффективность обработки. Это связано с особенностями структуры и свойств полимеров с высокопрочными наполнителями, которые могут изменяться в процессе механической обработки и влиять на работоспособность режущего инструмента, производительность обработки и качество обработанной поверхности [7–14]. При этом качество обработанных поверхностей оказывается неприемлемым.

Повышение качества обработки возможно путем подбора рациональных параметров тех-

нологического процесса механической обработки и конструктивных характеристик режущего инструмента. Это требует проведения многочисленных лабораторных и теоретических исследований, которые часто экономически не выгодны для производства. Существующие рекомендации в области обработки полимеров, армированных высокопрочными компонентами, сводятся к необходимости применения в качестве режущей части твердых сплавов и сверхтвердых материалов [4, 8, 16, 17]. Однако следует учитывать специфическую геометрию инструмента, которая предполагает наличие увеличенных углов резания: переднего и заднего. Возникает проблема получения такой геометрии у режущих элементов, выполненных из высокопрочных инструментальных материалов. При затачивании инструмента с малым углом заострения традиционными методами невозможно обеспечить требуемое качество режущей кромки [15]. Одной из прогрессивных технологий обработки высокопрочных материалов является алмазное шлифование с одновременным травлением детали и правкой круга на металлической связке [18–21]. Способ позволяет добиться высокого качества режущих поверхностей и кромок инструмента, что необходимо для обеспечения эффективности производства изделий из полимерных армированных композиционных материалов.

Существующие мероприятия по рационализации параметров технологического процесса не учитывают затрат, определяющих экономическую эффективность производства [22–27]. Таким образом, актуальной проблемой является повышение эффективности технологического процесса лезвийной обработки композиционных материалов. Для решения этой проблемы необходимо разработать методику оценки приведенных затрат, учитывающую особенности конструкции инструмента, его работоспособность и режимы резания, что позволит оптимизировать производственный процесс.

Теоретическая часть исследования

Эффективность технологического процесса обработки представлена различными критериями: качества, производительности, надежности, стабильности, экономичности и т. п. В настоя-

щем исследовании рассматривается экономическая эффективность как основной критерий при проектировании технологического процесса. При определении этого критерия необходимо выявить затраты производства. Они включают в себя затраты на режущий инструмент, основные материалы, оборудование, заработную плату рабочих, энергозатраты и прочие расходы. Значительную часть составляют затраты на режущий инструмент и его обслуживание за весь период эксплуатации. Стоит отметить, что экономически эффективно применение сборных конструкций инструментов, поскольку это повышает варьированность инструментальных материалов, а при полном износе режущих элементов достаточно заменить их новыми. При этом корпус сборного инструмента имеет определенный срок эксплуатации, который регламентируется заводом-изготовителем.

Акцентируя внимание на режущем инструменте, можно выделить затраты на обработку деталей за период от начала эксплуатации одного сборного режущего инструмента до полной его выработки:

- 1) стоимость сборного инструмента;
- 2) суммарные затраты на смену режущих элементов;
- 3) затраты на затачивание инструмента;
- 4) основная заработная плата станочника;
- 5) затраты на электроэнергию;
- 6) затраты на основной материал.

Таким образом, для каждой технологической операции изготовления детали можно рассчитать затраты производства:

$$Z = C_{\text{и}} + Z_{\text{с.э}} + Z_{\text{з.и}} + O_{\text{з.п}} + \Theta + M, \quad (1)$$

где $C_{\text{и}}$ – стоимость инструмента, руб.; Z – суммарные затраты на обработку одним режущим инструментом, руб.; $Z_{\text{с.э}}$ – суммарные затраты на смену режущих элементов, руб.; $Z_{\text{з.и}}$ – затраты на затачивание режущего инструмента, руб.; $O_{\text{з.п}}$ – основная заработная плата станочника, руб.; Θ – затраты на электроэнергию, руб.; M – затраты на обрабатываемый материал, руб.

$$Z_{\text{с.э}} = n_{\text{р}} C_{\text{р.э}} z, \quad (2)$$

где $n_{\text{р}}$ – число смен режущих элементов, допускаемое конструкцией корпуса сборного инстру-



мента; $C_{p,э}$ – цена одного режущего элемента, руб.; z – число режущих элементов.

$$Z_{3,и} = t_{3,п} z \frac{C_q}{60} in_p, \quad (3)$$

где $t_{3,п}$ – время на заточку одного режущего элемента, мин; C_q – часовая ставка станочника, руб/ч; i – допустимое число переточек режущих элементов.

$$O_{3,п} = P \frac{C_q}{60}, \quad (4)$$

где P – ресурс режущего инструмента, мин.

В настоящем исследовании ресурс определяется временем работы режущего инструмента от начала его эксплуатации до полной выработки:

$$P = Tin_p, \quad (5)$$

где T – период технологической стойкости режущего инструмента, мин.

Затраты на электроэнергию рассчитываются исходя из энергозатрат за весь ресурс режущего инструмента, причем средняя мощность резания рассчитывается эмпирически на основе трех и более испытаний при обработке детали на исследуемом оборудовании.

$$\mathcal{E} = PC_э, \quad (6)$$

где N – средняя мощность резания при обработке исследуемым инструментом, кВт; $C_э$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч.

$$M = Q_p \cdot C_m \cdot 10^{-9}, \quad (7)$$

где Q – объем материала, снятый за ресурс режущего инструмента, мм³; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; C_m – стоимость одного килограмма обрабатываемого материала, руб/кг.

Подставив выражения (2)–(7) в формулу (1) получим:

$$Z = C_{и} + n_p C_{p,э} z + t_{3,п} z C_q in_p / 60 + Tin_p C_q / 60 + NTin_p C_э + Q_p \cdot C_m \cdot 10^{-9}. \quad (8)$$

Для оптимизации технологического процесса используется удельная величина затрат производства, приведенная к объему материала, снятого за ресурс режущего инструмента:

$$ПЗ = \frac{Z}{Q}; \quad (9)$$

$$Q = PP = Tin_p П, \quad (10)$$

где $П$ – производительность непрерывной обработки, мм³/мин.

Подставив выражения (8), (10) в формулу (9), получим:

$$ПЗ = \frac{C_{и} + n_p C_{p,э} z + t_{3,п} z C_q in_p / 60}{Tin_p П} + \frac{C_q / 60 + NC_э}{П} + \rho C_m \cdot 10^{-9}. \quad (11)$$

Первое слагаемое в формуле характеризует затраты на режущий инструмент, второе – стоимость труда рабочего и энергозатрат, а третье – стоимость основных материалов.

В формуле (11) зависимость приведенных затрат от режимов резания выражена неявно. Для установления функциональной связи в явном виде выразим производительность непрерывной обработки и период стойкости режущего инструмента через режимы резания.

Производительность непрерывной обработки при фрезеровании определяется по формуле

$$П = \frac{ltb}{T + t_b} = \frac{TS_z z ntb}{T + t_b}, \quad (12)$$

где l – длина пути, пройденного режущим инструментом за период стойкости, мм; t – глубина фрезерования, мм; b – ширина фрезерования, мм; t_b – вспомогательное время, затрачиваемое на смену изношенного режущего инструмента и подналадку станка, мин; S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб; z – число зубьев фрезы; n – частота вращения шпинделя станка, мин⁻¹.

С увеличением серийности производства применяются различные приспособления и средства автоматизации, сокращающие вспомогательное время. Так, для единичного производства время t_b будет максимальным, а для массового производства – минимальным.

Период стойкости режущего инструмента T определяется некоторой функцией, которая может быть получена в результате экспериментальных исследований.

При варьировании параметров технологического процесса изменяется расчетное значение приведенных затрат, которое должно быть минимальным для оптимальных условий производства.

Результаты и обсуждение

Для рационализации режимов резания композиционных материалов с целью повышения экономической эффективности производства проведены лабораторные исследования технологического периода стойкости при фрезеровании стеклотекстолита разными инструментальными материалами. В результате были получены математические модели:

для ВК8:

$$T = 0,82 \cdot S_z^{4,75+2,94 \ln S_z + 2,38 \ln t} \cdot t^{0,46+1,13 \ln t}; \quad (13)$$

для ВК15:

$$T = 0,66 \cdot S_z^{2,08+1,11 \ln S_z + 3,02 \ln t} \cdot t^{2,54+0,65 \ln t}; \quad (14)$$

для ВК3М:

$$T = 0,64 \cdot S_z^{3,49+2,42 \ln S_z + 3,44 \ln t} \cdot t^{2,05+1,04 \ln t}. \quad (15)$$

На основе расчетных и экспериментальных данных получены графики зависимости при-

веденных затрат от режимов резания (рис. 1, 2). Увеличение подачи на зуб при постоянной глубине резания (рис. 1) приводит к равномерному росту приведенных затрат до подачи на зуб порядка 0,25 мм/зуб с последующим резким увеличением. С увеличением серийности производства зависимости принимают более равномерный характер.

В то же время зависимость приведенных затрат от глубины резания имеет экстремальный характер (рис. 2). При повышении серийности производства точка минимума приведенных затрат смещается в сторону увеличения глубины резания. Кроме того, положение точки минимума смещается в зависимости от применяемого инструментального материала. Так, при единичном производстве для твердого сплава ВК3М приведенные затраты будут минимальными при глубине резания 1,5 мм, для сплава ВК8 – 1,2 мм, для сплава ВК15 – 1,0 мм.

Экстремальный характер зависимостей связан с уменьшением технологического периода

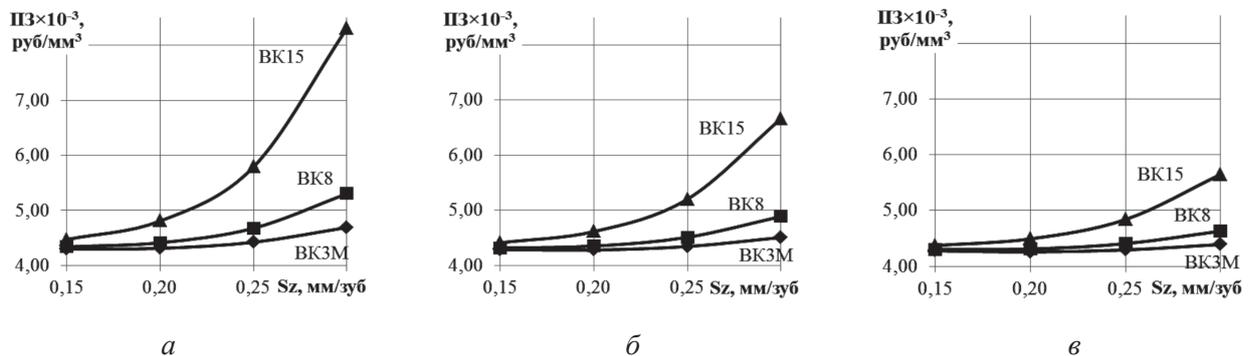


Рис. 1. Зависимость приведенных затрат от подачи на зуб S_z при глубине резания $t = 1,0$ мм для типов производства:

a – единичного; *б* – серийного; *в* – массового

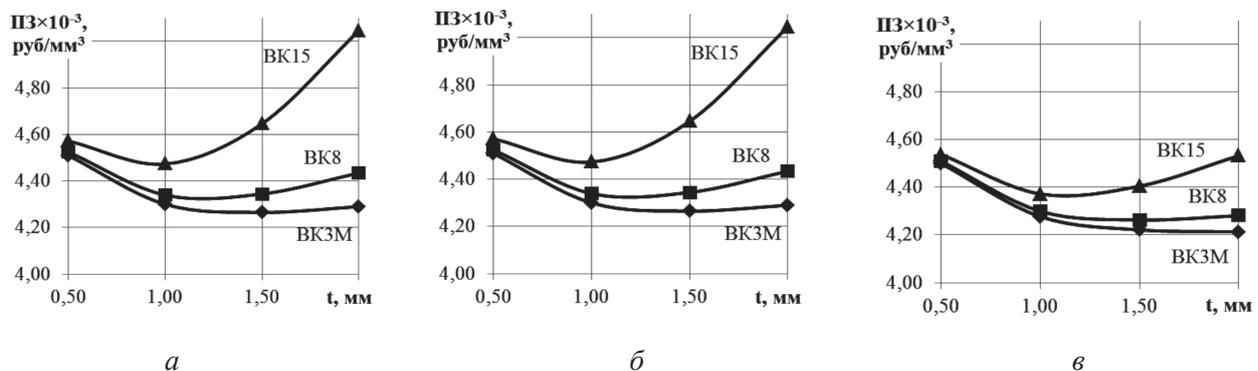


Рис. 2. Зависимость приведенных затрат от глубины резания t при подаче на зуб $S_z = 0,15$ мм/зуб для типов производства:

a – единичного; *б* – серийного; *в* – массового

стойкости режущего инструмента и увеличением частоты его смены при интенсификации режимов резания. При серийном и массовом типах производства увеличение подачи на зуб и глубины резания обеспечивает рост производительности непрерывной обработки и снижение приведенных затрат, поскольку сокращается время на смену режущего инструмента.

Выводы

По результатам исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Разработана методика определения приведенных затрат, позволяющая оптимизировать технологические параметры процесса обработки композиционных материалов и повысить эффективность производства.

2. Получены математические зависимости периода стойкости режущего инструмента от режимов резания, позволяющие прогнозировать характер обработки композиционных материалов.

3. Для снижения затрат рекомендуется применять твердые сплавы с повышенной прочностью и твердостью, например, твердый сплав марки ВКЗМ либо ВК8.

4. Разработаны рекомендации по назначению режимов резания, обеспечивающих минимальные затраты для типов производства:

– единичного:

$$S_z = 0,15 \dots 0,16 \text{ мм/зуб}, t = 1,0 \dots 1,2 \text{ мм};$$

– серийного:

$$S_z = 0,17 \dots 0,20 \text{ мм/зуб}, t = 1,2 \dots 1,5 \text{ мм};$$

– массового:

$$S_z = 0,20 \dots 0,25 \text{ мм/зуб}, t = 1,4 \dots 2,0 \text{ мм}.$$

Список литературы

1. *Matthews F.L., Rawlings R.D.* Composite materials: engineering and science. – Oxford: The Alden Press, 1999. – 480 p. – ISBN 978-1-8557-3473-9.

2. *Мордвин М.А., Якимов С.В., Баклушин С.М.* Рекомендации по механической обработке композиционных материалов // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 26–29.

3. Composite materials based on wastes of flat glass processing / A.V. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, G.Yu. Gashnikova, L.P. Nikulina, S.E. Artemenko // Waste Management. – 2005. – Vol. 25, iss. 7. – P. 733–736. – doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007.

4. *Chung D.D.L.* Composite materials: functional materials for modern technologies. – London: Springer-Verlag, 2004. – 293 p. – ISBN 978-1-4471-3734-0. – doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0.

5. *Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N., Kvachev K.V.* Investigation of impregnation fibrous materials in pultrusion process of polymer composite materials // International Polymer Science and Technology. – 2014. – Vol. 41, iss. 7. – P. 59–62.

6. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites / V. Dhand, G. Mittal, K.Y. Rhee, S.-J. Park, D. Hui // Composites Part B: Engineering. – 2015. – Vol. 73. – P. 166–180. – doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.

7. *Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V.* Surface quality of the fiberglass composite material after milling // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 183–187. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.183.

8. *Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A.* Automation tool preparation in the conditions of production // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 739–743. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.739.

9. *Matis I.G.* Methods and means of inspecting the quality of composite materials // Russian Journal of Non-destructive Testing. – 1991. – Vol. 27, iss. 4. – P. 277–285.

10. Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation / E. Lemma, L. Chen, E. Siores, J. Wang // Composite Structures. – 2002. – Vol. 57, iss. 1–4. – P. 297–303. – doi: 10.1016/S0263-8223(02)00097-1.

11. *Zaykin Y.A., Koztaeva U.P.* Radiation-induced processes and internal friction in polymer-based composite materials // Radiation Physics and Chemistry. – 2000. – Vol. 58, iss. 4. – P. 387–395. – doi: 10.1016/S0969-806X(99)00517-4.

12. *Bakulin V.N., Larin A.A., Reznichenko V.I.* Improving the quality of manufacture of polymer-composite products using computed tomography as a non-destructive-testing method // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, iss. 2. – P. 556–560. – doi: 10.1007/s10891-015-1221-7.

13. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing” / V.Yu. Skeebeba, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 125. – P. 012031. – doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

14. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N.V. Plotnikova, A.A. Losinskaya, V.Yu. Skeebeba, E. Nikitenko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. –

Vol. 698. – P. 351–354. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351.

15. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами / Д.А. Рычков, В.А. Скрипняк, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 42–46.

16. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 7 (37). – С. 3–8.

17. Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов / А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, С.А. Катаева // Инновации в машиностроении (ИнМаш–2015): VII Международная научно-практическая конференция: сборник трудов / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева и др.; под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2015. – С. 99–104.

18. Yanyushkin A.S., Saprykina N.A., Medvedeva O.I. Mechanism of protective membrane formation on the surface of metal-bonded diamond disks // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 327–331. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.327.

19. Contact processes in grinding / A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, V.V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.

20. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 68–74.

21. Шлифовальный инструмент на основе силикокарбида титана / Г.И. Смагин, В.Н. Филимоненко,

Н.Д. Яковлев, М.А. Корчагин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 1. – С. 27–30.

22. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 10. – С. 91–94.

23. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Зуб Н.П. Методика назначения режимов обработки, обеспечивающих рациональное распределение остаточных напряжений при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 3 (32). – С. 83–94.

24. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126. – P. 012016. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

25. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Н.П. Петров, Д.А. Рычков // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2013. – Т. 1. – С. 146–149.

26. Inverse algorithm for optimal processing of composite materials / J.L. Bailleul, V. Sobotka, D. Delaunay, Y. Jarny // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2003. – Vol. 34, iss. 8. – P. 695–708. – doi: 10.1016/S1359-835X(03)00141-6.

27. Fomin V.N., Malyukova E.B., Berlin A.I. Criteria for optimization of processing and fabrication of polymer composite materials // Doklady Chemistry. – 2004. – Vol. 394, iss. 4. – P. 39–41. – doi: 10.1023/B:DOCH.0000017274.33223.c8.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3 (72), July – September 2016, Pages 23–30

Method for improving the efficiency of products from polymer composites

Rychkov D.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: dielektrik84@mail.ru

Yanyushkin A.S., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: yanyushkin@brstu.ru

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

Improving the quality of treatment is possible by selecting rational parameters of the process of machining and design characteristics of the cutting tool. However, this requires a lot of laboratory and theoretical studies, which

often is not of economic benefit to produce. An important problem is to increase the process efficiency of the blade machining of composite materials. To solve this problem, it is necessary to develop a methodology for performance measurement that takes into account design features of the instrument, its efficiency and cutting conditions that allow optimizing the production process. Economic efficiency is one of the main criteria in the design of a technological parts processing. To determine this criterion the main production expenses, including the cost of the cutting tool, the cost of its training, workers' wages, energy and materials costs are identified. The values of the resulted expenses for different parameters of the technological process are obtained. The parameters of the process are the cutting conditions, structural and technological characteristics of cutting tools, as well as the properties of the material being processed. On the basis of the calculated data and experimental research carried out rationalization of the process parameters in order to increase economic efficiency machining of polymeric composite materials on the example of milling fiberglass. Research found that the dependence of the resulted expenses of the cutting conditions is an extreme character, where the minimum point shifted upward cutting conditions by increasing production. According to the research the technique of determining the reduced costs, derived mathematical relations tool life of the cutting tool of the cutting conditions is developed and recommendations on the appointment process parameters, ensuring minimal production costs, are drawn up.

Keywords

economic efficiency, resulted expenses, composite material, cutting tool.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30

References

1. Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite materials: engineering and science*. 1st ed. Oxford, The Alden Press, 1999. 480 p. ISBN 978-1-8557-3473-9
2. Mordvin M.A., Yakimov S.V., Baklushin S.M. Rekomendatsii po mekhanicheskoi obrabotke kompozitsionnykh materialov [Recommendations for the machining of composite materials]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Izhevsk State Technical University*, 2010, no. 2, pp. 26–29.
3. Gorokhovskiy A.V., Escalante-Garcia J.I., Gashnikova G.Yu., Nikulina L.P., Artemenko S.E. Composite materials based on wastes of flat glass processing. *Waste Management*, 2005, vol. 25, iss. 7, pp. 733–736. doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007
4. Chung D.D.L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. 2nd ed. London, Springer-Verlag, 2004. 293 p. ISBN 978-1-4471-3734-0. doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0
5. Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N., Kvachev K.V. Investigation of impregnation fibrous materials in pultrusion process of polymer composite materials. *International Polymer Science and Technology*, 2014, vol. 41, iss. 7, pp. 59–62.
6. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y., Park S.-J., Hui D. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 73, pp. 166–180. doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011
7. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Surface quality of the fiberglass composite material after milling. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 183–187. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.183
8. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Automation tool preparation in the conditions of production. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 739–743. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.739
9. Matis I.G. Methods and means of inspecting the quality of composite materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1991, vol. 27, iss. 4, pp. 277–285.
10. Lemma E., Chen L., Siores E., Wang J. Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation. *Composite Structures*, 2002, vol. 57, iss. 1–4, pp. 297–303. doi: 10.1016/S0263-8223(02)00097-1
11. Zaykin Yu.A., Koztaeva U.P. Radiation-induced processes and internal friction in polymer-based composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, vol. 58, iss. 4, pp. 387–395. doi: 10.1016/S0969-806X(99)00517-4
12. Bakulin V.N., Larin A.A., Reznichenko V.I. Improving the quality of manufacture of polymer-composite products using computed tomography as a nondestructive-testing method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, iss. 2, pp. 556–560. doi: 10.1007/s10891-015-1221-7
13. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 125, p. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031

14. Plotnikova N.V., Losinskaya A.A., Skeebe V.Yu., Nikitenko E. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351
15. Rychkov D.A., Skripnyak V.A., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V. Formirovanie rezhushchei kromki frezer-nogo instrumenta dlya obrabotki sloistyykh kompozitsionnykh materialov, armirovannykh steklyannymi voloknami [Formation of the cutting edge of the milling tool for machining laminated composite materials reinforced with glass fibers]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2 (22), pp. 42–46.
16. Markov A.M. Tekhnologicheskie osobennosti mekhanicheskoi obrabotki detalei iz kompozitsionnykh materialov [Technological features of machining of parts from composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii – Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, no. 7 (37), pp. 3–8.
17. Markov A.M., Cherdantsev P.O., Gaist S.V., Kataeva S.A. [Experimental studies milling of composite materials]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash–2015): VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik trudov* [Innovations in mechanical engineering: VII International scientific and practical conference: Materials]. Kemerovo, 2015, pp. 99–104. (In Russian)
18. Yanyushkin A.S., Saprykina N.A., Medvedeva O.I. Mechanism of protective membrane formation on the surface of metal-bonded diamond disks. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 327–331. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.327
19. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Ivancivsky V.V. Contact processes in grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 17–21. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17
20. Popov V.Y., Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Skeebe V.Y. Kontaktnye protsessy pri almaznoi obrabotke instrumental'nykh materialov [Contact processes in diamond processing of tool materials]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 3 (23), pp. 68–74.
21. Smagin G.I., Filimonenko V.N., Yakovlev N.D., Korchagin M.A., Skeebe V.Yu. Shlifoval'nyi instrument na osnove silikokarbida titana [The grinding tool on the basis of silicon carbide, titanium]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 1, pp. 27–30.
22. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Povyschenie proizvoditel'nosti frezerovaniya na osnove avtomatizatsii proektirovaniya sbornogo instrumenta [Production efficiency in the process of modular milling tool automated design]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 10, pp. 91–94.
23. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Zub N.P. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki, obespechivayushchikh ratsional'noe raspredelenie ostatochnyykh napryazhenii pri poverkhnostnoi zakalke VEN TVCh [Designation of the treatment processing conditions methodology ensuring rational allocation of residual stresses at surface hardening by high-energy heating by currents of high frequency]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 3 (32), pp. 83–94.
24. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshekin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, pp. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016
25. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Petrov N.P., Rychkov D.A. [Improved processing of high strength composite materials]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences], 2013, vol. 1, pp. 146–149. (In Russian)
26. Bailleul J.L., Sobotka V., Delaunay D., Jarny Y. Inverse algorithm for optimal processing of composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, vol. 34, iss. 8, pp. 695–708. doi: 10.1016/S1359-835X(03)00141-6
27. Fomin V.N., Malyukova E.B., Berlin A.I. Criteria for optimization of processing and fabrication of polymer composite materials. *Doklady Chemistry*, 2004, vol. 394, iss. 4, pp. 39–41. doi: 10.1023/B:DOCH.0000017274.33223.c8

Article history

Received 21 June 2016

Revised 15 July 2016

Accepted 15 August 2016