

УДК 621.9

DOI: 10.12737/17157

А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена экономическая эффективность как основной критерий при проектировании технологического процесса. При определении этого критерия выявлены затраты производства. Предложенная методика оценки приведенных затрат реализована для оптимизации технологического процесса фрезерования композиционных

материалов. Разработаны рекомендации по назначению режимов резания для различных типов производства.

**Ключевые слова:** экономическая эффективность, режимы резания, полимерные композиционные материалы, приведенные затраты.

A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, D.V. Lobanov

## COST-EFFECTIVENESS IN POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL CUTTING

The creation of new structural materials for manufacturing parts of various technical destinations is an integral part of modern industry, inasmuch as the requirements to products are mainly directed to the decrease of their mass, hardening, conservation of properties at the influence of hostile environment and temperature without attraction of additional expenditures for manufacturing. But, in the course of cutting a tool is worn out quickly and cannot ensure high efficiency of machining. The purpose of researches consists in the technological process efficiency increase of composite material edge cutting machining. As a problem of researches is the development of the procedure for the assessment of expenditures presented depending on the peculiarities of the tool design, its capacity for work and

cutting modes. For the solution of problems set there is offered a procedure for the assessment of expenditures presented which takes into account the expenses for a cutter, work material, electric power and other parameters characterizing the techniques taking into account the specificity of composite material machining. There is an expenditure binding to empirical values of the technological period of tool life and machining productivity depending on cutting modes. The procedure is realized for the optimization of the technological process of composite material milling. The recommendation for the definition of cutting modes ensuring low expenditures for manufacturing is developed.

**Key words:** cost-effectiveness, cutting modes, polymeric composite materials, expenditures shown.

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 связующим с последующим прессованием, что требует дополнительной обработки резанием [1 – 3]. 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 [4 – 6].

Повысить эффективность производства возможно путем подбора рациональных параметров технологического процесса механической обработки и конструктивных характеристик режущего инструмента. Однако это требует проведения многочисленных лабораторных и теоретических исследований, которые часто экономически не выгодны для производства.

Научная литература в области резания полимерных композиционных материалов содержит недостаточно полную информацию, поскольку исследования направлены в

основном на получение качества поверхности без учета влияния режимов резания и работоспособности режущего инструмента на производительность и экономическую эффективность обработки. Для снижения затрат и повышения работоспособности режущего инструмента рекомендуется применять сборные инструменты, режущая часть которых имеет специфическую геометрию и выполнена из высокопрочных материалов, например твердых сплавов и сверхтвердых материалов [5; 7; 8].

В связи с этим целью является повышение эффективности технологического процесса лезвийной обработки композиционных материалов, а в задачи исследования входит разработка методики оценки приведенных затрат в зависимости от особенностей конструкции инструмента, его работоспособности и режимов резания.

**Теоретическая основа исследования.** Эффективность технологического процесса обработки представлена различными критериями: качества, производительности, надежности, стабильности, экономичности и т.п. В настоящем 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. Расходы на амортизацию станочного оборудования, содержание и текущий ремонт зданий.
7. Затраты на основной материал.

Таким образом, для каждого режущего инструмента можно рассчитать затраты производства на изготовление деталей. Приведя все затраты к времени эксплуатации инструмента либо объему выпущенной продукции, получим стоимость выполнения технологического процесса за единицу времени либо объема.

**Методика оценки приведенных затрат.** Суммарные затраты на обработку деталей одним сборным режущим инструментом ( $Z$ , руб.) можно определить по формуле

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

где  $C_{\text{и}}$  – стоимость инструмента, 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.;  $Э$  – затраты на электроэнергию, руб.;  $M$  – затраты на обрабатываемый материал, руб.;  $A$  – амортизация основного оборудования, полученная за ресурс режущего инструмента, руб.

Суммарные затраты на смену режущих элементов ( $Z_{\text{с.э}}$ , руб.) определяются по формуле

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

где  $n_{\text{р}}$  – число смен режущих элементов, допускаемое конструкцией корпуса сборного инструмента;  $C_{\text{э}}$  – цена одного режущего элемента, руб.;  $z$  – число режущих элементов.

Затраты на затачивание режущего инструмента ( $Z_{\text{з.и}}$ , руб) определяются по формуле

$$Z_{\text{з.и}} = t_{\text{з.п}} z \frac{C_{\text{з}}}{60} i n_{\text{р}}, \quad (3)$$

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

Основная заработная плата станочника ( $O_{з.п}$ , руб.) определяется по формуле

$$O_{з.п} = P \frac{C_ч}{60}, \quad (4)$$

где  $P$  – ресурс режущего инструмента, мин.

В настоящей методике ресурс определяется временем работы режущего инструмента от начала его эксплуатации до полной выработки. Ресурс связан с технологическим периодом стойкости, допустимым количеством переточек режущего инструмента и числом смен режущих элементов,



Рис. 1. Схема для определения количества переточек

При заточивании необходимо с задней поверхности снять припуск  $e_3$  для устранения фаски износа  $h_{3\max}$  и припуск  $e_f$  для устранения возможных дефектов поверхности. Из прямоугольного треугольника  $abc$  видно, что  $e_3 = ac$  и угол  $bac$  равен углу заострения  $\beta$ . Тогда  $e_3 = h_{3\max} \cos \beta$ . Величину припуска  $e_f$  целесообразно выбрать в соответствии с рекомендациями равной 0,1 мм [11].

Таким образом, максимальное количество переточек определяется по формуле

$$i = \frac{l_{\max}}{e_3 + e_f} = \frac{l_{\max}}{h_{3\max} \cos \beta + 0,1},$$

где  $l_{\max}$  – максимальная рабочая длина режущего элемента, мм;  $h_{3\max}$  – фаска износа по задней поверхности инструмента, мм;  $\beta$  – угол заострения режущей кромки.

допускаемым конструкцией корпуса сборного инструмента:

$$P = Tin_p,$$

где  $T$  – технологический период стойкости режущего инструмента, мин.

Допустимое число переточек режущего лезвия  $i$  рассчитывается теоретически в зависимости от характера износа инструмента и величины снимаемого припуска при заточивании. При обработке композиционных полимерных материалов характерен износ по задней поверхности [9; 10], поэтому величина снимаемого припуска зависит от фаски износа по задней поверхности  $h_3$ . Схема для определения количества переточек приведена на рис. 1.

Затраты на электроэнергию ( $\mathcal{E}$ , руб.) рассчитываются исходя из энергозатрат за весь ресурс режущего инструмента:

$$\mathcal{E} = NPC_3, \quad (5)$$

где  $N$  – средняя мощность резания при обработке исследуемым инструментом, кВт;  $C_3$  – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч.

Средняя мощность резания рассчитывается эмпирически на основе 3 и более испытаний при обработке детали на исследуемом оборудовании.

Затраты на обрабатываемый материал ( $M$ , руб.) можно определить по формуле

$$M = Q\rho C_M \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

где  $Q$  – объем материала, снятый за ресурс режущего инструмента, мм<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $C_M$  – стоимость одного килограмма обрабатываемого материала, руб./кг.

Подставив выражения (2 - 6) в формулу (1), получим:

$$З = C_{и} + n_p C_3 z + t_{3.п.} z C_4 in_p / 60 + Tin_p C_4 / 60 + NTin_p C_3 + Q \rho C_M \cdot 10^{-6} + A. \quad (7)$$

Для оптимизации технологического процесса рационально оценивать эффективность обработки величиной приведенных затрат. В настоящей методике приведенные затраты относятся к объему материала, снятому за ресурс режущего инструмента. Это позволит дать оценку экономической эффективности обработки в зависимости от параметров технологического процесса.

Приведенные затраты (ПЗ, руб./мм<sup>3</sup>), взятые за ресурс режущего инструмента, определяются по формуле

$$ПЗ = \frac{З}{Q}. \quad (8)$$

Объем материала, снятый за ресурс режущего инструмента ( $Q$ , мм<sup>3</sup>), зависит от производительности непрерывной обработки – величины, учитывающей затраты вспомогательного времени в производственном процессе:

$$Q = РП = Tin_p \Pi, \quad (9)$$

где  $\Pi$  – производительность непрерывной обработки, мм<sup>3</sup>/мин.

Подставив выражения (7, 9) в формулу (8), получим:

$$ПЗ = \frac{C_{и} + n_p C_3 z + t_{3.п.} z C_4 in_p / 60}{Tin_p \Pi} + \frac{C_4 / 60 + NC_3 + A}{\Pi} + \rho C_M \cdot 10^{-6}. \quad (10)$$

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

**Результаты и обсуждение.** Одним из примеров применения методики оценки приведенных затрат является оптимизация режимов резания при фрезеровании композиционных материалов.

В формуле (10) 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

$$\Pi = \frac{lb}{T + t_b}, \quad (11)$$

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.

При этом длина пути  $l$  зависит от величины подачи и технологического периода стойкости режущего инструмента и определяется по формуле

$$l = TS_M, \quad (12)$$

где  $S_M = S_z z n$  – минутная подача фрезы, мм/мин;  $S_z$  – подача на зуб фрезы, мм/зуб;  $z$  – число зубьев фрезы;  $n$  – частота вращения шпинделя станка, мин<sup>-1</sup>.

Подставив формулу (12) в формулу (11), получим:

$$\Pi = \frac{TS_z z n t b}{T + t_b}. \quad (13)$$

Вспомогательное время, затрачиваемое на смену изношенного режущего инструмента и подналадку станка, рассчитывается по формуле:

$$t_b = t_y + t_n, \quad (14)$$

где  $t_y$  – время, затрачиваемое на снятие и установку режущего инструмента, включающее время на пуск и остановку станка, мин;  $t_n$  – время, затрачиваемое на подналадку технологического оборудования, мин.

С увеличением серийности производства применяются различные приспособле-

ния и средства автоматизации, сокращающие вспомогательное время. Так, для единичного производства время  $t_b$  будет максимальным, а для массового производства – минимальным.

Зависимость периода стойкости режущего инструмента от режимов резания определяется некоторой функцией  $T = f(S_z, t, n)$ . Эта функция может быть получена путем математического моделирования зависимости на основе экспериментальных данных.

В ходе лабораторных исследований технологического периода стойкости при фрезеровании стеклотекстолита режущим инструментом, оснащенным твердым сплавом ВКЗМ, получена зависимость периода стойкости от режимов обработки [12]:

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

Значение технологического периода стойкости, определенное по зависимости (15), используется в формулах (10, 13) для расчета производительности непрерывной обработки и приведенных затрат при различных режимах резания. При этом число зубьев инструмента  $z = 2$ , частота вращения шпинделя  $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$ , ширина резания  $b = 10 \text{ мм}$ .

На основе математической модели (15) и формул (10, 13, 14) получены графики зависимости приведенных затрат от режимов резания для разных типов производства (рис. 2).

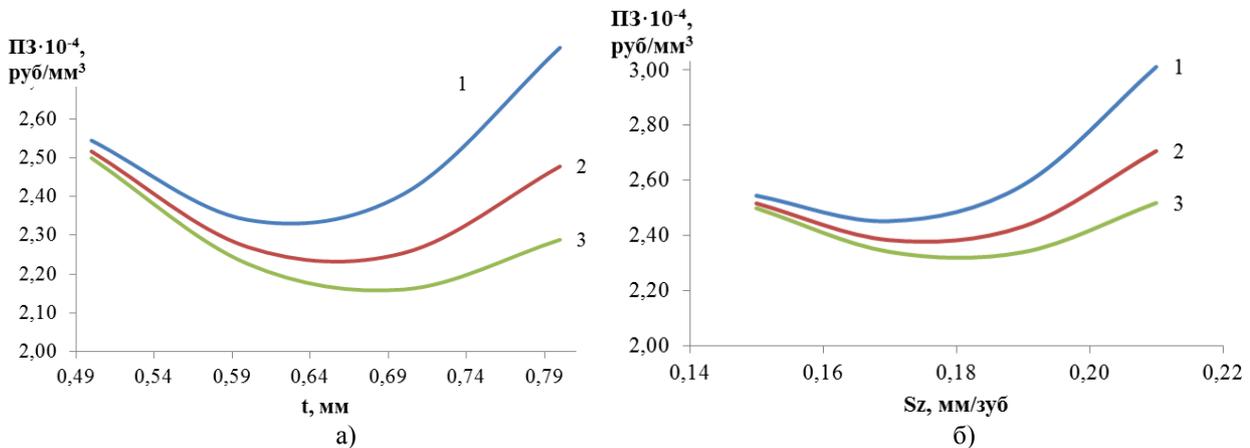


Рис. 2. Зависимость приведенных затрат для единичного (1), серийного (2) и массового (3) типов производства: а – от глубины резания при  $S_z = 0,15 \text{ мм/зуб}$ ; б – от подачи на зуб при  $t = 0,5 \text{ мм}$

Из графиков на рис. 2 видно, что зависимость приведенных затрат от режимов резания имеет экстремальный характер. При повышении серийности производства точка минимума приведенных затрат смещается в сторону увеличения режимов резания. Для единичного производства минимальные приведенные затраты наблюдаются при подаче на зуб  $S_z = 0,167 \text{ мм/зуб}$  и глубине резания  $t = 0,62 \text{ мм}$ , для серийного производства - при  $S_z = 0,176 \text{ мм/зуб}$ ,  $t = 0,65 \text{ мм}$ , а для массового производства - при  $S_z = 0,18 \text{ мм/зуб}$ ,  $t = 0,69 \text{ мм}$ .

Экстремальный характер графиков связан с уменьшением технологического периода стойкости режущего инструмента и увеличением частоты его смены при интенсификации режимов резания. При се-

рийном 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:

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

2. Методика реализована на примере оптимизации технологического процесса фрезерования стеклотекстолита. Даны рекомендации по назначению режимов реза-

ния, обеспечивающих минимальные затраты производства:

- для единичного производства  $S_z = 0,16$  мм/зуб,  $t = 0,6$  мм;

- для серийного производства  $S_z = 0,17$  мм/зуб,  $t = 0,65$  мм;

- для массового производства  $S_z = 0,18$  мм/зуб,  $t = 0,7$  мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симонов, Д.В. Оптимизация процесса прессования стеклотекстолитов / Д.В. Симонов, В.Г. Огоньков, Е.В. Афошина // Вестник Московского энергетического института. – 2011. – № 6. – С. 199 – 205.
2. Gallant, F.M. Graded polymer composites using twin-screw extrusion: a combinatorial approach to developing new energetic materials / F.M. Gallant, H.A. Bruck, S.E. Prickett, M. Cesarec // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2006. – Т. 37. – № 6. – P. 957 – 969.
3. Gorokhovskiy, A.V. 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. – Т. 25. – № 7. – P. 733 – 736.
4. Bailleul, J.L. 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. – Т. 34. – № 8. – P. 695 – 708.
5. Мордвин, М.А. Рекомендации по механической обработке композиционных материалов / М.А. Мордвин, С.В. Якимов, С.М. Баклушин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 26 – 29.
6. Марков, А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов / А.М. Марков // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 7 (37). – С. 3 – 8.
7. Янюшкин, А.С. Производительность непрерывной обработки резанием стеклонаполненных полимеров / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 2 (26). – С. 32 – 43.
8. Янюшкин, А.С. Повышение эффективности производства за счет автоматизации подготовки режущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 4 (46). – С. 25 – 30.
9. Рычков, Д.А. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов / Д.А. Рычков, В.А. Скрипняк, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 6 – 13.
10. Рычков, Д.А. Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолоконистых композиционных материалов на полимерной основе / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.В. Базаркина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 150 – 153.
11. Грановский, Г.И. Резание металлов: учеб. для машиностроит. и приборостроит. специальностей вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
12. Yanyushkin, A.S. Surface quality of the fiberglass composite material after milling / A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, D.V. Lobanov // Applied mechanics and materials. – 2014. – № 682. – P. 183 – 187.
1. Simonov, D.V., Optimization of glass fiber plastic pressing / D.V. Simonov, V.G. Ogonkov, E.V. Afoshina // *Bulletin of Moscow Energy Institute*. – 2011. – No 6. – pp. 199 – 205.
2. Gallant, F.M. Graded polymer composites using twin-screw extrusion: a combinatorial approach to developing new energetic materials / F.M. Gallant, H.A. Bruck, S.E. Prickett, M. Cesarec // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2006. – Т. 37. – № 6. – P. 957 – 969.
3. Gorokhovskiy, A.V. 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. – Т. 25. – № 7. – P. 733 – 736.
4. Bailleul, J.L. 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. – Т. 34. – № 8. – P. 695 – 708.
5. Mordvin, M.A., Recommendations on composite material machining / M.A. Mordvin, S.V. Yakimov, S.M. Baklushin // *Bulletin of Izhevsk State Technical University*. – 2010. – No 2. – pp. 26-29.
6. Markov, A.M., Technological peculiarities of composite part machining / A.M. Markov // *High Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No 7(37). – pp. 3-8.
7. Yanyushkin, A.S., Productivity of glass-filled polymer continuous cutting / A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, D.V. Lobanov // *Systems. Methods. Techniques*. – 2015. – No 2(26). – pp. 32-43.
8. Yanyushkin, A.S., Productivity efficiency increase at expense of cutter preparation automation / A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, D.A. Rychkov // *High Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No 4(46). – pp. 25-30.
9. Rychkov, D.A., Technique development for cutter preparation for layered composite material machining / D.A. Rychkov, V.A. Skripnyak, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov // *Metal Machining (Techniques, Equipment, Toolware)*. – 2014. – No 2(63). – pp. 6-13.

10. Rychkov, D.A., Techniques upgrade for shaping high-strength fiber-glass composite materials on polymer base / D.A. Rychkov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, V.V. Bazarkina // *Metal Machining (Techniques, Equipment, Toolware)*.
11. Granovsky, G. I. Cutting of metals: studies. for mashinostroit. also priborostroit. specialties of higher education institutions / G. I. Granovsky, V. G. Granovsky. – М.: Vyssh. shk., 1985. – 304 pages.
12. Yuanyushkin, A.S. Surface quality of the fiberglass composite material after milling/A.S. Yuanyushkin, D.A. Rychkov, D.V. Lobanov//Applied mechanics and materials. – 2014. – No. 682. – P. 183 – 187.

*Материал поступил в редколлегию  
29.06.15.*

*Рецензент: д.т.н., профессор  
Новосибирского государственного технического  
университета В.В. Иванцовский*

#### Сведения об авторах:

**Янюшкин Александр Сергеевич**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Технология машиностроения» Братского государственного университета, e-mail: [yanyushkin@brstu.ru](mailto:yanyushkin@brstu.ru).

**Рычков Даниил Александрович**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Братско-

**Yanyushkin Alexander Sergeevich**, D.Eng., Prof., Head of the Dep. «Engineering Techniques» Bratsk State University, e-mail: [yanyushkin@brstu.ru](mailto:yanyushkin@brstu.ru).

**Rychkov Daniil Alexandrovich**, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. «Engineering Techniques», Bratsk State University, e-mail: [dielektrik84@mail.ru](mailto:dielektrik84@mail.ru).

го государственного университета, e-mail: [dielektrik84@mail.ru](mailto:dielektrik84@mail.ru).

**Лобанов Дмитрий Владимирович**, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Братского государственного университета, e-mail: [mf\\_mauka@brstu.ru](mailto:mf_mauka@brstu.ru).

**Lobanov Dmitry Vladimirovich**, D.Eng., Prof. of the Dep. «Engineering Techniques» Bratsk State University, e-mail: [mf\\_mauka@brstu.ru](mailto:mf_mauka@brstu.ru).