

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/article\_5ac24a2e8f2e80.74216269

Бешевли О.Б., аспирант,  
Дуюн Т.А., д-р техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ БАББИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНОЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

oleg-beshevli@yandex.ru

Представлена методика оптимизации технологических режимов фрезерования баббита в условиях восстановительной обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников с использованием специального станочного модуля. Цель оптимизации – повышение производительности при обеспечении заданного качества обрабатываемой поверхности. Оптимизируемыми параметрами являются подача на зуб фрезы и скорость резания, выраженная через частоту вращения фрезы, оказывающие наибольшее влияние на время обработки и параметры качества поверхности. Использован метод линейного программирования, в качестве технических ограничений приняты: обеспечиваемая шероховатость поверхности, заданная стойкость инструмента, мощность привода главного движения, время обработки, соответствующее периоду стойкости, допустимая температура резания. Оптимизация выполняется в два этапа: на первом решается система неравенств, а на втором – полученные значения корректируются.

**Ключевые слова:** оптимизация режимов, фрезерование баббита, специальный станочный модуль, крупногабаритные подшипники скольжения, метод линейного программирования.

**Введение.** Крупногабаритные подшипники скольжения нашли широкое применение в строительной и горнорудной промышленности в составе таких агрегатов, как мельницы самоизмельчения, мельницы полусамозмельчения, сушильные барабаны, бутары и прочее крупногабаритное вращающееся оборудование.

Традиционная технология ремонтной обработки крупногабаритных подшипников скольжения, выполняемая, как правило, по месту эксплуатации агрегата, имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является применение в качестве окончательного метода обработки опорной поверхности скольжения ручного шабрения, имеющего низкую производительность, высокую себестоимость, нестабильное качество, зависящее от квалификации исполнителя.

Для повышения эффективности обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников разработан специальный станочный модуль (рис. 1) [1–4]. Особенностью предлагаемого станочного модуля является перемещение инструмента по радиальной поверхности сегмента крупногабаритного подшипника скольжения. Кинематически движение продольной подачи реализовано с использованием четырехзвенного кривошипно-кулисного механизма. Вращательное движение кривошипу пе-

редается от электродвигателя через редуктор. Кулиса и коромысло преобразуют вращательное движение кривошипа в качательное движение стойки коромысла, на которой расположен режущий инструмент. За один полный оборот кривошипа режущий инструмент совершает один рабочий и один холостой ход, возвращаясь в исходное положение. Движение поперечной подачи осуществляется в конце полного цикла работы механизма – рабочего и холостого хода. Для отвода инструмента и выполнения поперечной подачи использованы шаговые электродвигатели, которые включаются при пересечении фрезы с лучом лазерных датчиков. Главное движение – вращение фрезы вокруг собственной оси осуществляется асинхронным электродвигателем.

Выполнение опорных элементов в виде специальных проточек, соответствующих проточкам подшипника скольжения позволяет совместить ось сектора подшипника скольжения и ось вращения качающейся рамы, что обеспечивает точность обработки.

**Методика.** Для эффективного использования предложенного оборудования необходимо оптимизировать технологические параметры с целью обеспечения его максимальной производительности при обеспечении заданных параметров качества обработки [5].

В качестве оптимизируемых параметров прием подачу на зуб и скорость резания, так как именно эти параметры оказывают наибольшее влияние на производительность обработки, кроме того, подача оказывает существенное влияние на шероховатость поверхности и мощность резания, а скорость резания определяет стойкость инструмента. На рис. 2 представлена схема структурных элементов оптимизации. Входными параметрами будут являться условия резания (марка обрабатываемого материала, диаметр фрезы, количество зубьев, ширина фрезерования, глубина резания) и конструктивные параметры обрабатываемого сегмента подшипника (диаметр и ширина), оказывающие влияние на общую длину обработки на одном переходе. В качестве технических ограничений приняты: допустимая температура резания, заданная шероховатость, которую необходимо обеспечить на выполняемом переходе, мощность привода главного движения, заданная стойкость инструмента. Выходные параметры – время обработки,

эффективная мощность резания, фактическая температура резания.

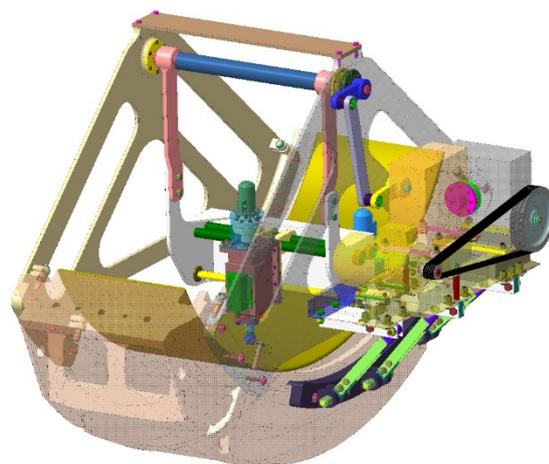


Рис. 1. Общий вид специального станочного модуля для обработки крупногабаритных подшипников

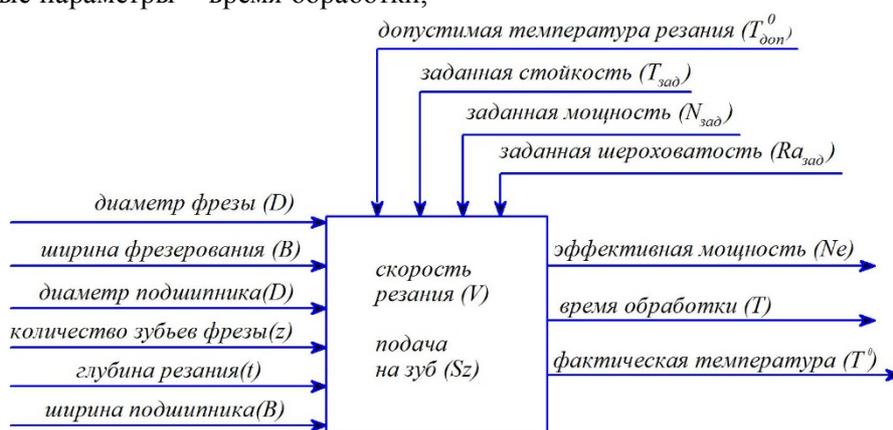


Рис. 2. Схема структурных элементов оптимизации

На рис. 3 представлен оптимизационный алгоритм, состоящий из двух основных этапов. После того, как определены исходные данные и заданы технологические ограничения, на первом этапе выполняется решение основной оптимизационной задачи при установленных ограничениях, без учета ограничения по шероховатости поверхности. В качестве ограничений выступают: заданная стойкость инструмента, допустимая температура и мощность резания. В качестве выходных параметров получаем значения оптимизируемых режимов, обеспечивающих установленные ограничения.

На втором этапе выполняется корректировка полученных значений с учетом ограничения по шероховатости поверхности, фиксируется полученная при оптимизации скорость резания, так как она не оказывает существенного влияния на величину шероховатости. Требуемое значение шероховатости поверхности обеспечивается

за счет корректировки подачи методом итерационного приближения. Второй этап необходим, так как функция шероховатости поверхности от технологических параметров, является функцией второго порядка, имеет квадратичные и парные члены, поэтому сложно линейризуется, в отличие от других ограничений, заданных степенными функциями.

**Основная часть.** Для выполнения оптимизации необходимо установить математические зависимости, связывающие оптимизируемые параметры с целевой функцией и системой технологических ограничений.

Ограничение по мощности резания устанавливает связь между мощностью, затрачиваемой на процесс резания, и оптимизируемыми параметрами (подачей и скоростью резания). Математическое выражение мощности привода главного движения при фрезеровании имеет вид:

$$Ne = \frac{Pz \cdot V}{1020 \cdot 60}, \quad (1) \quad \text{где } Pz \text{ – тангенциальная составляющая силы резания, Н, } V \text{ – скорость резания, м/мин.}$$

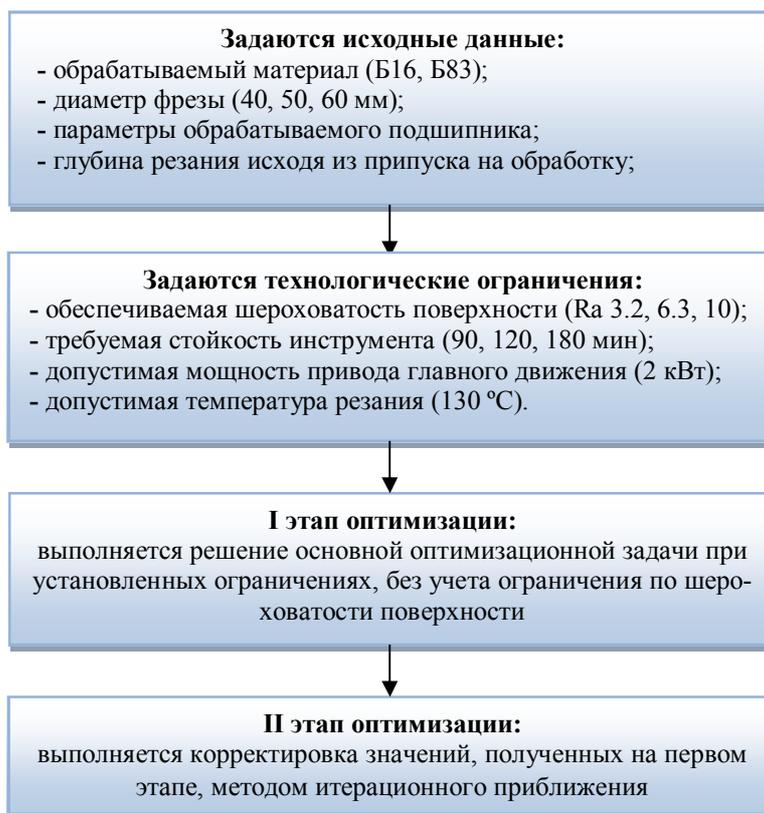


Рис. 3. Оптимизационный алгоритм

В качестве функции тангенциальной составляющей силы резания принята эмпирическая зависимость, полученная при проведении экспериментальных исследований:

$$Pz = 336 \frac{t^{0,85} \cdot Sz^{0,75} \cdot B^1}{n^{0,1} \cdot D^{0,8}}, \quad (2)$$

где  $t$  – глубина резания, мм;  $Sz$  – подача на зуб фрезы, мм/зуб;  $B$  – ширина фрезерования, мм;  $n$  – частота вращения фрезы, мм/об;  $D$  – диаметр фрезы, мм.

После преобразования выражения (1) с учетом (2), выразив скорость резания через частоту вращения фрезы и выполнив перенос оптимизируемых параметров в левую часть, получаем:

$$Sz^{0,75} \cdot n^{0,9} = \frac{Ne}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot B \cdot D^{0,2}}. \quad (3)$$

Уравнение (3) приводим к линейному виду логарифмированием, умножая подачу на 100 для получения величин одного порядка:

$$0,75 \ln(100 \cdot Sz) + 0,9 \ln n = \ln \left( \frac{Ne \cdot 100^{0,75}}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot B \cdot D^{0,2}} \right). \quad (4)$$

Вводим обозначения:

$$\begin{aligned} \ln(100Sz) &= x_1, \quad \ln(n) = x_2, \\ \ln \left( \frac{Ne \cdot 100^{0,75}}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,2}} \right) &= b_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Получаем линейное неравенство, являющееся ограничением, устанавливающим связь

между оптимизируемыми параметрами и эффективной мощностью резания:

$$0,75 \cdot x_1 + 0,9 \cdot x_2 \leq b_1. \quad (6)$$

Аналогичным образом формируем другие ограничения. Ограничение, связанное с режущими возможностями инструмента:

$$0,4 \ln(100 \cdot Sz) + \ln(n) = \ln \left( \frac{3,1 \cdot 10^5}{D^{0,75} \cdot T^{0,2} \cdot t^{0,1} \cdot B^{0,15} \cdot z^{0,1}} \right), \quad (7)$$

где  $T$  – период стойкости инструмента, мин;  $z$  – количество зубьев фрезы.

С учетом обозначений  $\ln(100Sz)=x_1$ ,  $\ln(n)=x_2$ , логарифм правой части уравнения (7) –  $b_2$  второе ограничение примет вид:

$$0,4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2 \quad (8)$$

Ограничение по времени обработки необходимо для регламентирования времени работы фрезы в процессе одного технологического перехода в пределах периода стойкости:

$$\ln(100 \cdot Sz) + \ln(n) = \ln\left(\frac{H \cdot L \cdot 100}{T \cdot z \cdot B}\right), \quad (9)$$

где  $H$  – ширина обрабатываемого подшипника, мм;  $L$  – длина дуги сегмента обрабатываемого подшипника, мм.

С учетом обозначений  $\ln(100Sz)=x_1$ ,  $\ln(n)=x_2$ , логарифм правой части уравнения (9) –  $b_3$  третье ограничение примет вид:

$$x_1 + x_2 \geq b_3 \quad (10)$$

Ограничение по температуре резания вводится с целью контроля температуры в пределах допустимых значений и предотвращения таких негативных явлений, как наростообразование. В качестве функций температуры резания использованы эмпирические зависимости, полученные при проведении экспериментальных исследований.

Температура в зоне резания при фрезеровании баббита марки Б16:

$$Tr = 4,22 \frac{t^{0,29} \cdot Sz^{0,5} \cdot B \cdot n^{0,6}}{D^{1,08}} \quad (11)$$

Температура в зоне резания при фрезеровании баббита марки Б83:

$$Tr = 33 \frac{t^{0,47} \cdot Sz^{0,57} \cdot B^{0,95} \cdot n^{0,38}}{D} \quad (12)$$

В соответствии с выражением (11) ограничение по температуре резания для баббита марки Б16:

$$0,5 \cdot \ln(100 \cdot Sz) + 0,6 \cdot \ln(n) = \ln\left(\frac{Tr \cdot D^{1,08} \cdot 100^{0,5}}{4,22 \cdot t^{0,29} \cdot B}\right) \quad (13)$$

В соответствии с выражением (12) ограничение по температуре резания для баббита марки Б83:

$$0,57 \cdot \ln(100 \cdot Sz) + 0,38 \cdot \ln(n) = \ln\left(\frac{Tr \cdot D \cdot 100^{0,57}}{33 \cdot t^{0,47} \cdot B^{0,95}}\right) \quad (14)$$

С учетом обозначений  $\ln(100Sz)=x_1$ ,  $\ln(n)=x_2$ , логарифм правой части уравнения (13) –  $b_4$  четвертое ограничение для баббита марки Б16 примет вид:

$$0,5 \cdot x_1 + 0,6 \cdot x_2 \leq b_4 \quad (15)$$

С учетом обозначений  $\ln(100Sz)=x_1$ ,  $\ln(n)=x_2$ , логарифм правой части уравнения (14) –  $b_4$  четвертое ограничение для баббита марки Б83 примет вид:

$$0,57 \cdot x_1 + 0,38 \cdot x_2 \leq b_4 \quad (16)$$

Используя полученные ограничения (6), (8), (10) и (15), запишем оптимизационную модель для фрезерования баббита Б16 в виде системы неравенств, добавив ограничение по предельным значениям оптимизируемых параметров в логарифмической форме

$$\begin{cases} 0,75 \cdot x_1 + 0,9 \cdot x_2 \leq b_1 \\ 0,4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2 \\ x_1 + x_2 \geq b_3 \\ 0,5 \cdot x_1 + 0,6 \cdot x_2 \leq b_4 \\ \ln(Sz \min \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz \max \cdot 100) \\ \ln(n \min) \leq x_2 \leq \ln(n \max) \end{cases} \quad (17)$$

Используя ограничения (6), (8), (10) и (16), запишем аналогичную оптимизационную модель для фрезерования баббита Б83:

$$\begin{cases} 0,75 \cdot x_1 + 0,9 \cdot x_2 \leq b_1 \\ 0,4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2 \\ x_1 + x_2 \geq b_3 \\ 0,57 \cdot x_1 + 0,38 \cdot x_2 \leq b_4 \\ \ln(Sz \min \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz \max \cdot 100) \\ \ln(n \min) \leq x_2 \leq \ln(n \max) \end{cases} \quad (18)$$

Система неравенств решается (17), (18) решается относительно целевой функции, имеющей вид:

$$f(x_1, x_2) = x_1 + x_2 \rightarrow \max \quad (19)$$

На рис. 4 представлено графическое отображение результатов оптимизации с учетом перечисленных ограничений.

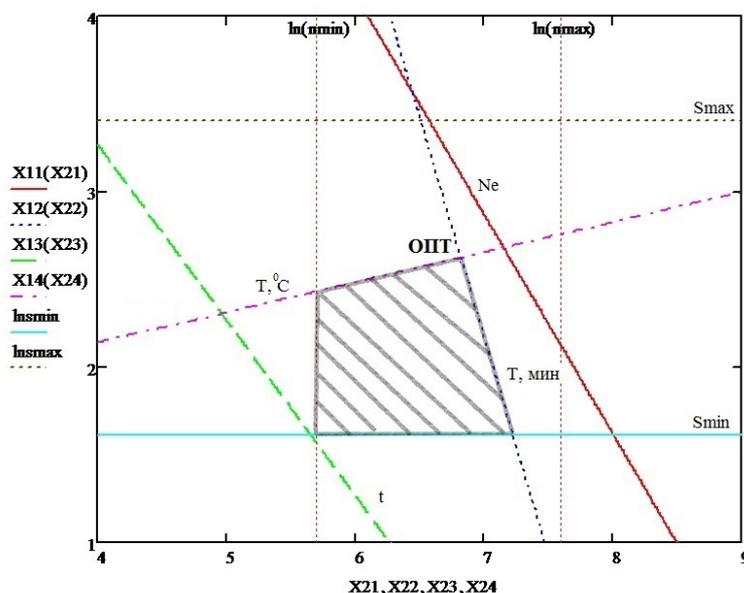


Рис. 4. Графическое представление максимизации целевой функции с учетом ограничений

Область допустимых решений лежит внутри замкнутого многогранника, образованного пересечением установленных ограничений. Так как в исходных данных принят один из меньших типоразмеров подшипника, ограничение по времени обработки практически не участвует в решении, все значения в принятом диапазоне ему удовлетворяют. Лимитирующими ограничениями являются ограничение по температуре резания и стойкости инструмента: оптимум расположен на их пересечении. Оптимальными значениями являются:  $x_1=2.622$  и  $x_2=6.825$ , что соответствует следующим натуральным значениям оптимизируемых параметров: подача на зуб 0,14 мм/зуб, частота вращения 920 об/мин, скорость

резания 145 м/мин. Полученные значения обеспечивают максимальную производительность с учетом заданных ограничений.

На втором этапе оптимизации полученные значения корректируются с учетом обеспечения шероховатости поверхности методом итерационного приближения. Так как скорость резания при фрезеровании баббитов не оказывает существенного влияния на шероховатость, то корректировка выполняется за счет изменения величины подачи на зуб. Для осуществления корректировки используются зависимости, полученные экспериментально [6]: для баббита Б16

$$Ra(s, v, t) = 8,35 - 6,7 \cdot 10^{-3} v + 11,26s - 3,8t + 3,33 \cdot 10^{-2} vs - 6,1 \cdot 10^{-1} st + 3 \cdot 10^{-4} v^2 + 8,2s^2 + 1,3t^2, \quad (20)$$

для баббита Б83

$$Ra(s, v, t) = 12,625 - 7,8 \cdot 10^{-1} v + 10,5s - 5,3t + 5,4 \cdot 10^{-2} vs - 9,5 \cdot 10^{-3} vt + 3,8 \cdot 10^{-4} v^2 + 7,1s^2 + 1,4t^2. \quad (21)$$

**Выводы.** Предложенный оптимизационный алгоритм и оптимизационная модель позволяют определить технологические режимы фрезерования баббита при восстановительной обработке опорной поверхности крупногабаритных подшипников скольжения с использованием специального станочного модуля, обеспечивающие достижение эффективных технико-экономических параметров: максимальной производительности при заданных параметрах качества обрабатываемой поверхности. Предложенный алгоритм может быть использован для различных типоразмеров подшипников, а оптимизационная модель учитывает возможность расчета при изменении исходных данных, характеризующих условия обработки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Станок для обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения: пат. 132012 Рос. федерация: МПК7 В23D 1/20, В23D 9/00 / В.Я. Дуганов, О.Б. Бешевли и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Белгородский гос-й технологический ун-т им. В.Г. Шухова. № 2013100863/02; заяв. 09.01.13; опубл. 10.09.2013 Бюл. №25.
2. Станок для фрезерования баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения: пат. 169070 Рос. федерация: МПК, В23С 1/20/ В.Я. Дуганов, О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Белгородский гос-й технологический ун-т

им. В.Г. Шухова. - № 2016136002; заяв. 06.09.16; опубл. 02.03.2017 Бюл. №7.

3. Бешевли О.Б., Бушуев Д.А., Дуюн Т.А., Рубанов В.Г. Имитационное моделирование динамических характеристик модуля для обработки крупногабаритных подшипников скольжения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №8. С.149–156.

4. Бешевли О.Б., Дуюн Т.А., Воробьев Н.Д. Повышение эффективности ремонтной обработки опорных узлов крупногабаритных вращаю-

щихся агрегатов // Вестник ИрГТУ. 2015. №7. С. 60–66.

5. Лозовая С.Ю., Бешевли О.Б., Дуюн Т.А. Воробьев Н.Д. Обеспечение технологических параметров фрезерования баббита при ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения // Фундаментальные исследования. 2016. №9. С. 273–278.

6. Бешевли О.Б., Дуюн Т.А. Эмпирические модели шероховатости поверхности при фрезеровании баббита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №7. С.122–128.

#### Информация об авторах

**Бешевли Олег Борисович**, аспирант кафедры технологии машиностроения.

E-mail: pvm0106@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Дуюн Татьяна Александровна**, доктор технических наук, доцент, зав. каф. технологии машиностроения.

E-mail: tanduun@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в январе 2018 г.

© Бешевли О.Б., Дуюн Т.А., 2018

**O.B. Beshevli, T.A. Duyun,**

### **OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL MODES OF MILLING BABBITT WITH THE USE OF A MACHINING MODULE FOR LARGE BEARINGS PROCESSING**

*The optimization technique of technological modes of babbitt milling under conditions of restorative treatment of the bearing surface of large bearings with the use of a special machine module is presented. The purpose of optimization is to increase the productivity while ensuring the desired quality of the treated surface. The optimized parameters are the feed to the cutter tooth and the cutting speed, expressed by the cutter rotation velocity, which have the greatest impact on the processing time and surface quality parameters. The method of linear programming is used, as the following technical limitations are taken: the provided surface roughness, the specified tool life, the power of the main motion drive, the processing time corresponding to the durability period, and the permissible cutting temperature. The optimization algorithm is performed in two stages: at the first stage the system of inequalities is solved, and at the second stage – the resulting values are corrected to ensure the desired surface roughness. The optimization model includes the original empirical dependences of cutting force and cutting temperature, obtained for tin-base and lead-base babbitts.*

**Keywords:** optimization, babbitt milling, special machining module, large-size bearings, linear programming method.

#### **REFERENCE**

1. The machine for processing of inserts of large-size bearings of sliding: stalemate. 132012 Dews. federation: МРК7 В23D 1/20, В23D 9/00 / V.Ya. Duganov, O.B. Beshevli, etc.; the applicant and patent holder FGBOU VPO Belgorodsky statey technological un-t of V.G. Shukhov. no. 2013100863/02; denunciations. 09.01.13; опубл. 9/10/2013 Bulletin, no. 25.

2. The machine for milling the babbittovykh of inserts of large-size bearings of sliding: stalemate. 169070 Dews. federation: МРК, В23С 1/20/V.Ya. Duganov, O.B. Beshevli, T.A. Duyun; the applicant and patent holder FGBOU VPO Belgorodsky state-

y technological un-t of V.G. Shukhov. no. 2016136002; denunciations. 06.09.16; опубл. 3/2/2017 Bulletin, no. 7.

3. Beshevli O.B., Bushuyev D.A., Duyun T.A., Rubanov V.G. Imitating modeling of dynamic characteristics of the module for processing of large-size bearings of sliding // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017, no. 8, pp. 149–156.

4. Beshevli O.B., Duyun T.A., Vorobyov N.D. Increase in efficiency of repair processing of basic knots of the large-size rotating units // Messenger of IRGTU, 2015, no. 7, pp. 60-66.

5. Lozovaya S.Yu., Beshevli O.B., Duyun T.A. Vorobyov N.D. Ensuring technological parameters

of milling of babbitt at repair processing of large-size bearings of sliding // Basic researches, 2016, no. 9, pp. 273–278.

6. Beshevli O.B, Duyun T.A. Empirical models of roughness of a surface when milling babbitt // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016. no. 7, pp. 122–128.

*Information about the author*

**Oleg B. Beshevli**, Postgraduate student.

E-mail: pvm0106@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Tatiana A. Duyun**, PhD, Professor.

E-mail: tanduun@mail.ru.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in January 2017*