

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ БАББИТА В УСЛОВИЯХ РЕМОНТНОЙ ОБРАБОТКИ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ\*

Oleg-beshevli@yandex.ru

Представлена методика оптимизации режимов резания в процессе ремонтной обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников скольжения. В качестве метода обработки рассматривается фрезерование с использованием специализированного ремонтного оборудования. При оптимизации в качестве целевой функции принята максимальная производительность процесса, в качестве технических ограничений – требуемая стойкость инструмента, заданная мощность привода главного движения, обеспечиваемая шероховатость обрабатываемой поверхности, технологические возможности ремонтного оборудования. Оптимизация проводится методом линейного программирования. Предложенный оптимизационный алгоритм позволяет обоснованно назначать технологические режимы обработки, обеспечивающие максимальную производительность процесса при заданных технических ограничениях.

**Ключевые слова:** крупногабаритные подшипники скольжения, ремонтная обработка опорной поверхности, оптимизация режимов резания при фрезеровании баббита, максимизация производительности при заданных технических ограничениях.

**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 [1]. В качестве антифрикционного материала опор подшипников скольжения наибольшее распространение получили баббиты – легкоплавкие антифрикционные сплавы на основе олова или свинца. Под воздействием эксплуатационных нагрузок в процессе работы увеличивается зазор между цапфой и обоймой подшипника, что приводит к перекосу оси мельницы и как следствие нестабильной работе, вибрациям и повышенному расходу электроэнергии. Возникает необходимость ремонта нижнего сегмента, т.к. он принимает основную часть нагрузки. В процессе ремонтной обработки крупногабаритных подшипников в качестве окончательного метода обработки опорной поверхности используют

ручное шабрение, имеющее ряд недостатков, основными из которых являются высокая трудоемкость и нестабильное обеспечение качества поверхности. В качестве альтернативы ручному шабрению предлагается применять механическую обработку фрезерованием с использованием специального ремонтного оборудования [2–5]. Для повышения эффективности выполнения ремонтной обработки необходимо оптимизировать технологические параметры, максимизируя производительность при заданных технических ограничениях. Вопросы оптимизации являются одними из наиболее актуальных технологических задач [6–11].

**Методология.** При выполнении оптимизации использовался метод линейного программирования.

### Основная часть.

Для выполнения ремонтной обработки антифрикционного слоя крупногабаритных подшипников предлагается использовать специализированное оборудование (рис. 1).

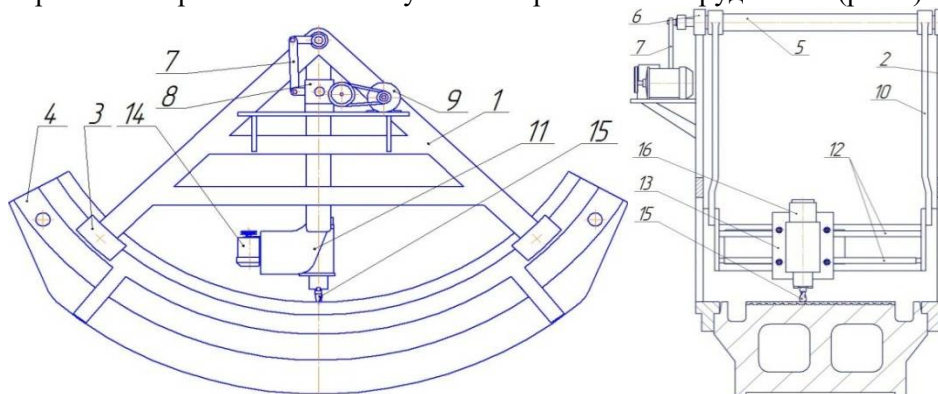


Рис. 1. Конструктивная схема станка

Переносной станок содержит корпус 1, выполненный в виде двух плоских рам 2. Каждая плоская рама 2 в нижней части имеет два опорных элемента 3, выполненных, например, в виде башмаков. Опорные элементы 3 предназначены для установки переносного станка на обрабатываемом изделии 4 (корпусе подшипника). В верхней части плоские рамы 2 соединены приводным валом 5, который опирается на подшипниковые узлы 6 плоских рам 2. Приводной вал 5 является конечным звеном кривошипно-коленного механизма 7 привода маятниковой круговой подачи. Кроме того, в привод входят редуктор 8 и электродвигатель 9. На приводном валу 5 жестко закреплена качающаяся рама 10. В нижней части рамы 10 размещен рабочий узел 11. Рабочий узел 11 имеет направляющие 12, на которых установлена подвижная каретка 13. Подвижность каретки 13 обеспечивается за счет кинематической связи ее с приводом продольного перемещения 14. Подвижная каретка 13 оснащена обрабатывающим лезвийным инструментом 15, фрезой. Обрабатывающий инструмент (фреза) 15 получает рабочее движение от привода главного движения 16.

Для обеспечения высокой производительности процесса фрезерования при ремонтной обработке поверхности скольжения крупногабаритных подшипников скольжения необходимо подобрать технологические режимы, таким образом, чтобы обеспечить оптимальные значения стойкости режущего инструмента, достаточной для выполнения обработки одного перехода без необходимости остановки оборудования и переточки инструмента и мощности привода главного движения, обеспечивающей стабильный процесс обработки во всем диапазоне выбранных технологических режимов. Кроме того, необходимо обеспечить требуемую шероховатость поверхности, а эффективная мощность резания должна удовлетворять мощности привода главного движения. Технологические режимы имеют сложные взаимодействия: увеличение скорости резания с целью повышения производительности снижает стойкость инструмента, умень-

шение подачи с целью обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности увеличивает путь резания при обработке, следовательно, повышает требования к периоду стойкости, увеличение глубины резания и подачи на зуб повышает мощность резания.

Для обеспечения высокой эффективности процесса обработки необходимо выполнить оптимизацию технологических параметров с целью достижения максимальной производительности процесса резания при обеспечении заданных технологических ограничений.

В качестве целевой функции примем максимальную производительность процесса обработки.

В качестве оптимизируемых параметров примем подачу инструмента на зуб и глубину резания.

В качестве технологических ограничений примем:

- мощность привода главного движения;
- режущие возможности инструмента;
- время обработки одного перехода, соответствующее стойкости инструмента;
- минимальные и максимальные значения технологических параметров, соответствующие техническим возможностям применяемого ремонтного оборудования;
- необходимая шероховатость поверхности.

Входными параметрами при проведении оптимизации процесса фрезерования являются: диаметр фрезы, количество зубьев, ширина фрезерования, частота вращения шпинделя. Внешние факторы, характеризующие условия выполнения процесса: допустимая мощность резания, заданная стойкость инструмента, требуемая шероховатость поверхности. Выходными параметрами являются: максимальные значения глубины резания и подачи на зуб, обеспечивающие эффективную мощность резания, стойкость инструмента, время обработки и шероховатость поверхности, соответствующие заданным условиям (рис. 2).

В качестве метода оптимизации примем метод линейного программирования.

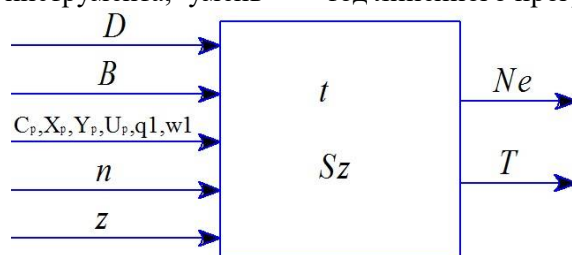


Рис. 2. Структурная модель оптимизации

Для выполнения оптимизации необходимо установить математические зависимости, связывающие оптимизируемые параметры с целевой

функцией и системой технологических ограничений.

Ограничение по мощности резания устанавливает связь между эффективной мощностью, затрачиваемой на процесс резания, и мощностью привода главного движения. Математическое выражение мощности привода главного движения при фрезеровании баббита имеет вид (8):

$$Ne = \frac{Pz \cdot V}{1020 \cdot 60} \quad (1)$$

$$\text{где } Pz = \frac{10 \cdot Cp \cdot t^x \cdot Sz^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3)$$

$Cp=22,6$ ;  $x=0,86$ ;  $y=0,72$ ;  $u=1$ ;  $q=0,86$ ;  $w=0,15$ .

Подставим выражения (2) и (3) вместе со значениями коэффициентов в (1):

$$(10 \cdot t)^{0,86} \cdot (100 \cdot Sz)^{0,72} = \frac{Ne \cdot 10^{0,86} \cdot 100^{0,72}}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85}} \quad (7)$$

Прологарифмируем полученное равенство с целью линеаризации:

$$0,86 \ln(10 \cdot t) + 0,72 \ln(100 \cdot Sz) = \ln\left(\frac{Ne \cdot 10^{0,86} \cdot 100^{0,72}}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85}}\right) \quad (8)$$

Обозначим:

$$\ln(10t) = x_1 \quad (9)$$

$$\ln(100Sz) = x_2 \quad (10)$$

$$\ln\left(\frac{Ne \cdot 10^{0,86} \cdot 100^{0,72}}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85}}\right) = b_1 \quad (11)$$

Получаем линейное неравенство, являющееся ограничением, устанавливающим связь между оптимизируемыми параметрами и эффективной мощностью резания:

$$0,86 \cdot x_1 + 0,72 \cdot x_2 \leq b_1 \quad (12)$$

Обозначив  $\ln(10t) = x_1$ ,  $\ln(100Sz) = x_2$ , логарифм правой части уравнения -  $b_1$ , запишем техническое ограничение, устанавливающее связь между заданной стойкостью инструмента и оптимизируемыми параметрами:

$$0,3 \cdot x_1 + 0,2 \cdot x_2 \leq b_2 \quad (15)$$

Так же необходимо ввести ограничение по времени обработки. Данное ограничение необходимо для того, чтобы время работы фрезы в

$$Ne = \frac{10 \cdot 22,6 \cdot t^{0,86} \cdot Sz^{0,72} \cdot B^1 \cdot z \cdot \pi \cdot D \cdot n}{1020 \cdot 60 \cdot D^{0,86} \cdot n^{0,15} \cdot 1000} \quad (4)$$

после упрощения получим:

$$Ne = 3,7 \cdot 10^{-6} \cdot t^{0,86} \cdot Sz^{0,72} \cdot B \cdot z \cdot \pi \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85} \quad (5)$$

Перенесем оптимизируемые параметры  $Sz$  и  $t$  в левую часть выражения:

$$t^{0,86} \cdot Sz^{0,72} = \frac{Ne}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85}} \quad (6)$$

Полученное уравнение необходимо привести к линейному виду логарифмированием. Так как глубина резания и подача являются дробными числами, умножим подачу на 100, а глубину резания на 10 для получения логарифмов величин одного порядка, в результате преобразований получим выражение:

Ограничение, связанное с режущими возможностями инструмента, регламентируется заданной стойкостью инструмента и выражается через допустимую скорость резания:

$$V = \frac{Cv \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot Sz^y \cdot B^u \cdot z^p} \quad (13)$$

Коэффициенты имеют значения:  $Cv=185,5$ ;  $x=0,3$ ;  $y=0,2$ ;  $u=0,1$ ;  $q=0,45$ ;  $m=0,33$ ;  $p=0,1$ .

Если приравнять выражения (13) и (3), вынести  $Sz$  и  $t$  в левую часть, умножить подачу на 100, глубину на 10 и прологарифмировать, в результате преобразований получим выражение:

$$0,3 \ln(10 \cdot t) + 0,2 \ln(100 \cdot Sz) = \ln\left(\frac{9,29673 \cdot 10^5}{\pi \cdot D^{0,55} \cdot n \cdot T^{0,33} \cdot B^{0,1} \cdot z^{0,1}}\right) \quad (14)$$

процессе одного технологического перехода не превышало периода стойкости.

Время обработки вкладыша выразим зависимостью:

$$T = \frac{H \cdot L}{S_{\min} \cdot B} \quad (16)$$

где  $H$  – ширина вкладыша, мм;  $L$  – длина сектора вкладыша по радиусной поверхности, мм;  $S_{\min}$  – минутная подача инструмента, мм/мин;  $B$  – ширина фрезерования, мм.

$$S_{\min} = Sz \cdot z \cdot n \quad (17)$$

где  $Sz$  – подача на зуб, мм/зуб;  $z$  – количество зубьев фрезы;  $n$  – частота вращения фрезы, мин<sup>-1</sup>.

$$T = \frac{H \cdot L}{Sz \cdot z \cdot n \cdot B} \quad (18)$$

отсюда следует:

$$Sz = \frac{H \cdot L}{T \cdot z \cdot n \cdot B} \quad (19)$$

Домножим  $Sz$  на 100 и прологарифмируем полученное выражение:

$$\ln(100 \cdot Sz) = \ln\left(\frac{H \cdot L \cdot 100}{T \cdot z \cdot n \cdot B}\right) \quad (20)$$

Обозначим

$$\ln(100Sz) = x_2, \quad \ln\left(\frac{H \cdot L \cdot 100}{T \cdot z \cdot n \cdot B}\right) = b_3$$

$$Ra(Sz, v, t) = 8,35 - 6,7 \cdot 10^{-3}v + 11,26Sz - 3,8t + 3,33 \cdot 10^{-2}vSz - 6,1 \cdot 10^{-1}Szt + 3 \cdot 10^{-4}v^2 + 8,2Sz^2 + 1,3t^2 \quad (24)$$

для баббита Б83

$$Ra(Sz, v, t) = 12,625 - 7,8 \cdot 10^{-1}v + 10,5Sz - 5,3t + 5,4 \cdot 10^{-2}vSz - 9,5 \cdot 10^{-3}vt + 3,8 \cdot 10^{-4}v^2 + 7,1Sz^2 + 1,4t^2 \quad (25)$$

где  $Sz$  – подача на зуб, мм/зуб;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $t$  – глубина резания, мм.

Запишем систему ограничений в виде неравенств (12), (15) и (21), добавив к ним ограничение по предельным значениям оптимизируемых параметров в логарифмической форме (22) и (23):

$$\begin{cases} 0,86 \cdot x_1 + 0,72 \cdot x_2 \leq b_1 \\ 0,3 \cdot x_1 + 0,2 \cdot x_2 \leq b_2 \\ x_2 \geq b_3 \\ \ln(Sz \min \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz \max \cdot 100) \\ \ln(t \min \cdot 10) \leq x_2 \leq \ln(t \max \cdot 10) \end{cases} \quad (26)$$

Целевая функция имеет вид:

$$y = x_1 + x_2 \rightarrow \max \quad (27)$$

Представленная система (26) не содержит ограничения по шероховатости поверхности, так как функция шероховатости от технологических параметров является функцией второго порядка, имеет квадратные и парные члены, поэтому не может быть приведена к линейному виду логарифмированием. В связи с этим оптимизационный алгоритм будем выполнять в два этапа: первый этап с учетом ограничения по шероховатости поверхности, второй этап с учетом остальных ограничений системы (26). Данная последовательность выбрана исходя из предварительных расчетов, показывающих, что ограничение

получим третье техническое ограничение при фрезеровании баббита.

$$x_2 \geq b_3 \quad (21)$$

Ограничения по предельным значениям оптимизируемых параметров в логарифмической форме имеют вид:

$$\ln(Sz \min \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz \max \cdot 100) \quad (22)$$

$$\ln(t \min \cdot 10) \leq x_2 \leq \ln(t \max \cdot 10) \quad (23)$$

Для учета ограничения по шероховатости поверхности используем разработанные эмпирические модели формирования шероховатости в зависимости от технологических режимов: для баббита Б16

по шероховатости поверхности для выбранных интервалов изменения оптимизируемых параметров, является лимитирующим.

Рассмотрим представленный алгоритм на следующем примере.

Исходные данные и условия обработки: обрабатываемый материал – баббит Б16; диаметр фрезы – 45 мм; количество зубьев фрезы – 6; ширина фрезерования – 36 мм; частота вращения привода главного движения – 750 об/мин; вид обработки – черновое фрезерование; стойкость инструмента – 120 мин; мощность привода главного движения – 1,2 кВт; шероховатость поверхности –  $Ra10$ .

Скорость резания, соответствующая диаметру фрезы 45 мм и частоте вращения привода главного движения 750 об/мин, составляет 106 об/мин.

Диапазоны изменения оптимизируемых параметров: глубина резания  $t_{\min}=3$  мм,  $t_{\max}=4$  мм, подача на зуб  $s_{\min}=0,1$  мм/зуб,  $s_{\max}=0,3$  мм/зуб.

Область допустимых значений оптимизируемых параметров для обеспечения заданной шероховатости  $Ra10$  представлена на рис. 3. По координатным осям представлены оптимизируемые параметры в заданных интервалах. Построенная кривая содержит значения оптимизируемых параметров, обеспечивающих заданную шероховатость  $Ra10$ . Горизонтальная линия отсекает величину подачи по критерию допусти-

мого времени обработки в соответствии с заданной стойкостью инструмента. Следовательно, все значения кривой, лежащие выше данной линии обеспечивают заданную шероховатость с учетом ограничения по времени обработки.

Корректируем диапазоны изменения оптимизируемых параметров, в данном случае минимальное значение подачи и максимальное значение глубины резания: глубина резания  $t_{min}=3$  мм,  $t_{max}=4$  мм, подача на зуб  $s_{min}=0,11$  мм/зуб,  $s_{max}=0,3$  мм/зуб.

С учетом скорректированного диапазона и системы неравенств (26) максимизируем целевую функцию. Графическое представление приведено на рис. 4.

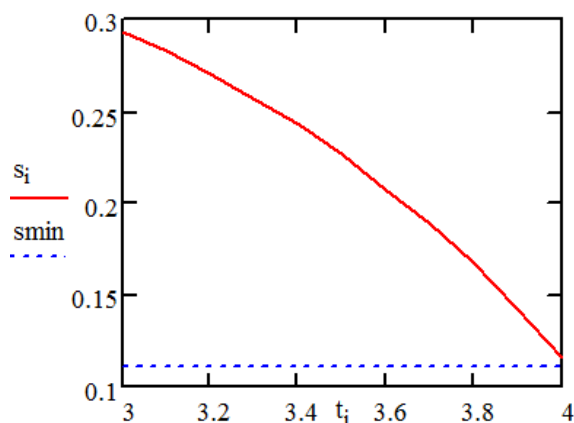


Рис. 3. Область допустимых значений оптимизируемых параметров для обеспечения заданной шероховатости  $Ra10$

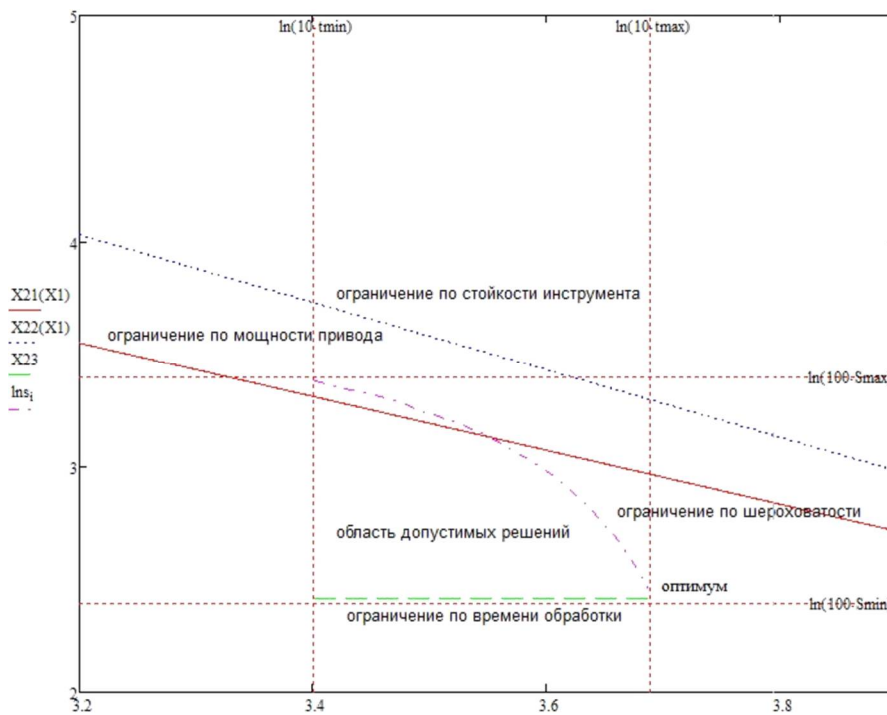


Рис. 4. Графическое представление максимизации целевой функции с учетом технических ограничений

Область допустимых решений лежит внутри замкнутого многогранника, образованного пересечением установленных ограничений. Ограничение по стойкости инструмента частично пересекает область допустимых диапазонов оптимизируемых параметров. Ограничение по мощности привода оказывает большее влияние и частично перекрывает ограничение по шероховатости. Лимитирующим ограничением является ограничение по шероховатости поверхности. Оптимум расположен на пересечении ограничения по шероховатости и максимальной глубины резания:  $t_{opt}=4$  мм,  $s_{opt}=0,12$  мм/зуб.

**Заключение.** Предложенный оптимизационный алгоритм фрезерования баббита позволяет повысить эффективность ремонтной обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников за счет определения сочетания технологических параметров, обеспечивающих максимальную производительность при заданных технических ограничениях.

*\*Статья подготовлена в рамках выполнения гранта РФФИ «Математическое моделирование и оптимизация процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на основе нечеткой логики» №1404-08044.*

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бауман В.А., Клушанцев Б.В., Мартынов В.Д., Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. - М.: Машиностроение, 1981. 328с.
2. Дуганов В.Я. Станок для обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения: пат. 132012 Рос. федерация: МПК7 В23D 1/20, В23D 9/00 / Дуганов В.Я., Бешевли О.Б. 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
3. Дуюн Т.А., Бешевли О.Б. Влияние технологических параметров на температурный режим и получаемое качество поверхности при фрезеровании баббита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С. 112–117.
4. 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. 2015. №9–2.
5. Лозовая С.Ю., Бешевли О.Б., Дуюн Т.А., Воробьев Н.Д. Повышение эффективности ремонтной обработки опорных узлов крупногабаритных вращающихся агрегатов // Вестник ИрГТУ. 2015. №7. С. 60–66.
6. Рыбалко В.Ю., Мурыгина Л.В., Шрубченко И.В. Оптимизация режимов ленточного шлифования поверхностей бандажей по гарантированному обеспечению заданного уровня шероховатости // Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. Губкин, 2012. С.47–51.
7. Мурыгина Л.В., Шрубченко И.В. Математическая модель оптимизации ленточно-абразивной обработки базовых поверхностей опор технологических барабанов // СТИН. 2012. №3. С.31–34.
8. Пастухов А.Г. Режимы механической обработки крестовин карданных шарниров, упрочненных ЭМО / А.Г. Пастухов, А.Г. Минасян, Н.М. Дегтярев // Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. Випуск 133. Ресурсозберегаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. – Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2013. С. 200–203.
9. Пастухов А.Г., Дегтярев Н.М. Механическая обработка крестовин карданных шарниров, упрочненных электромеханической обработкой // Агротехника и энергообеспечение. № 1 (1). Орел: ФГБОУ ВПО ОрелГАУ, 2014. С. 338–342.
10. Рубанов В.Г. Системный подход к проектированию управляемых мобильных логистических средств, обладающих свойством живучести // Научные ведомости БелГУ. Серия: История, Политология, Экономика, Информатика. 2011. №1 (96). Вып. 17/1. С. 176–187.
11. Rubanov V.G. Disaggregation of control system synthesis for mobile vehicle with survivability property Middle-East Journal of Scientific Research. 2013. 15 (12). С. 1666–1674.

---

**Beshevli O.B., Duyun T.A.****OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS IN MILLING BABBITT UNDER REPAIR TREATMENT SUPPORT SLIDING SURFACE OF LARGE BEARING**

*The technique of optimization of cutting conditions during the maintenance treatment of large bearing surface friction bearings. As the processing method is considered milling using specialized maintenance equipment. When optimizing the objective function as adopted by the maximum productivity of the process, as technical limitations - the required tool life defined Main drive power provided by the roughness of the treated surface, the technological capabilities of the repair equipment. Optimization is performed by linear programming. The proposed optimization algorithm can reasonably assign technological modes of processing to ensure maximum productivity of the process for the given technical limitations.*

**Key words:** large bearings, bearing surface repair process, optimization of cutting conditions when milling babbitt, maximizing performance for the given technical limitations.

---

**Дуюн Татьяна Александровна**, доктор технических наук, доцент, зав. каф. технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: tanduun@mail.ru

**Бешевли Олег Борисович**, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: oleg-beshevli@yandex.ru