

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

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

## ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ БАББИТА\*

Oleg-beshevli@yandex.ru

*Представлена методика разработки эмпирических моделей шероховатости поверхности при фрезеровании баббитов марок Б16 и Б83, применяемых в качестве материала антифрикционного слоя крупногабаритных подшипников скольжения. Для разработки моделей использовалось планирование экстремальных экспериментов второго порядка методом ротатбельного планирования. В качестве исследуемых технологических параметров приняты: подача режущего инструмента, глубина резания и скорость резания. Установлено влияние исследуемых технологических режимов фрезерования на формирование шероховатости поверхности баббита. Разработанные эмпирические модели позволяют обоснованно назначать технологические параметры, прогнозировать значение получаемой шероховатости, проводить оптимизацию технологических параметров.*

**Ключевые слова:** *крупногабаритные подшипники скольжения, ремонтная обработка опорной поверхности, фрезерование баббита, зависимость шероховатости поверхности от технологических режимов.*

**Введение.** Баббиты – легкоплавкие антифрикционные сплавы на основе олова или свинца применяют в качестве антифрикционного материала опор подшипников скольжения. Наиболее широкое применение данные материалы получили для крупногабаритных подшипников скольжения, используемых в горнорудной промышленности. К качеству опорной поверхности скольжения подшипника предъявляют весьма жесткие требования, так как качество данной поверхности во многом определяет надежность работы подшипника и эксплуатируемого агрегата в целом. Качество поверхности скольжения обуславливает коэффициент и условия трения-скольжения, удержание смази, износостойкость. Технологическое обеспечение качества поверхности является одной из наиболее важных задач процесса изготовления изделия [1–5]. 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 [6–9]. Для обеспечения качества обрабатываемой поверхности необходимо установить влияние технологических параметров на шероховатость поверхности.

**Методология.** Для разработки эмпирических моделей использовалась методика планирования эксперимента – планирование экстре-

мальных экспериментов второго порядка методом ротатбельного планирования [10].

### **Основная часть.**

Целью работы является разработка эмпирических моделей, определяющих шероховатость обрабатываемой поверхности при фрезеровании баббитов различных марок в зависимости от технологических параметров.

В качестве исследуемых марок баббитов приняты наиболее широко используемые баббиты из свинцовой и оловянной групп – Б16 и Б83. В качестве исследуемых технологических параметров использовались: подача режущего инструмента, глубина резания и скорость резания. Выбор обоснован следующими соображениями: подача оказывает наибольшее влияние на формирование шероховатости независимо от режима обработки, глубина резания влияет на силовые характеристики, обуславливая вибрации технологической системы и тем самым влияя на шероховатость, скорость резания обуславливает температурные, силовые и деформационные характеристики процесса, существенно влияя на формирование шероховатости [3].

Для проведения эксперимента применялось следующее оборудование и инструмент: консольно-фрезерный станок 6Т82Ш, портативный прибор для измерения шероховатости поверхности профилометр TIME TR100, торцовая фреза диаметром 32 мм с четырьмя зубьями.

Для решения поставленной задачи проводилось математическое планирование эксперимента методом ротатбельного планирования.

Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны в соответствии со значениями чи-

стовых, получистовых и черновых режимов (табл. 1).

Центральный композиционный план второго порядка для трех факторов состоит из плана

полного факторного эксперимента типа 2<sup>3</sup> (опыты 1–8), шести опытов в центре плана (опыты 9–14) и шести опытов в «звездных точках» (опыты 15–20).

Таблица 1

**Уровни и интервалы планирования факторов**

№	Факторы	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Натуральные уровни факторов, соответствующие кодированным				
				+1,682	+1	0	-1	-1,682
1	V, м/мин	x <sub>1</sub>	35	160	140	105	70	50
2	S, мм/об	x <sub>2</sub>	0.1	0,37	0,3	0,2	0,1	0,03
3	t, мм	x <sub>3</sub>	0.75	2,75	2,25	1.5	0,75	0,3

Эмпирическую модель шероховатости представим в виде уравнения регрессии:

По результатам опытов, выполненных в соответствии с принятым планом эксперимента

(табл. 2) вычислены коэффициенты уравнения регрессии (табл. 3).

Таблица 2

**План эксперимента и результаты опытов**

Содержание плана	№ оп.	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	v, м/мин	s, мм/об	мм	Ra Б16, мкм	Ra Б83, мкм
Полный факторный эксперимент типа 2 <sup>3</sup>	1	+	+	+	140	0,3		10	11,7
	2	+	+	-	140	0,3		9,5	11,3
	3	+	-	+	140	0,1		1,9	2,3
	4	+	-	-	140	0,1		2,1	2,4
	5	-	+	+	70	0,3		8,3	9,3
	6	-	+	-	70	0,3		9,04	10,4
	7	-	-	+	70	0,1		1,7	1,9
	8	-	-	-	70	0,1		2,0	2,5
Опыты в центре плана	9	0	0	0	105	0,2	1,5	4,0	4,8
	10	0	0	0	105	0,2	1,5	4,1	4,9
	11	0	0	0	105	0,2	1,5	4,0	4,8
	12	0	0	0	105	0,2	1,5	4,1	4,9
	13	0	0	0	105	0,2	1,5	4,0	4,8
	14	$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$				105	0,2	1,5	4,9
Опыты в «звездных» точках	15	1,682	0	0	160	0,2	1,5	4,9	5,9
	16	-1,682	0	0	50	0,2	1,5	5,8	6,9
	17	0	1,682	0	105	0,37	1,5	9,1	10,2
	18	0	-1,682	0	105	0,03	1,5	1,3	1,7
	19	0	0	1,682	105	0,2	2,75	7,1	8,3
	20	0	0	-1,682	105	0,2	0,3	6,4	7,6

Таблица 3

**Значения коэффициентов уравнения регрессии**

Коэффициент / Материал	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>12</sub>	b <sub>13</sub>	b <sub>23</sub>	b <sub>11</sub>	b <sub>22</sub>	b <sub>33</sub>
Б16										
Б83										

После подстановки значений коэффициентов уравнение (1) для баббита Б16 принимает вид:

для баббита Б83:

При проверке полученных уравнений необходимо знать дисперсию  $s_y^2$  воспроизводимости эксперимента. Находим ее по результатам шести опытов, поставленных в центре плана. для Б16:

$$\bar{y} = \frac{1}{n_0} \sum_{n=1}^{n_0=6} y_u = 4,05; \text{ для Б83 } \bar{y} = \frac{1}{n_0} \sum_{n=1}^{n_0=6} y_u = 4,85 \quad (4)$$

Дисперсия  $s_y^2$  воспроизводимости эксперимента:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{u=1}^{n_0=6} (y_u - \bar{y})^2 = 0,03 \quad (5)$$

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, при  $k = 3$  примут вид:

$$s^2 \{b_0\} = 0,16666 s_y^2 = 5 \times 10^{-4} \quad (6)$$

$$s^2 \{b_i\} = 0,07322 s_y^2 = 2,197 \times 10^{-4} \quad (7)$$

$$s^2 \{b_{ii}\} = 0,125 s_y^2 = 3,75 \cdot 10^{-4} \quad (8)$$

$$s^2 \{b_{ij}\} = 0,0695 s_y^2 = 2,085 \cdot 10^{-4} \quad (9)$$

Определяем доверительные интервалы для коэффициентов:

$$y = 4,195 + 0,069x_1 + 3,094x_2 - 0,044x_3 + 0,233x_1x_2 - 0,092x_2x_3 + 0,381x_1^2 + 0,328x_2^2 + 0,726x_3^2 \quad (11)$$

для баббита Б83

$$y = 5,022 + 0,14x_1 + 3,507x_2 + 0,375x_1x_2 + 0,25x_1x_3 + 0,445x_1^2 + 0,285x_2^2 + 0,815x_3^2 \quad (12)$$

Проверка гипотезы адекватности моделей показала, что модели адекватны при 5%-ном уровне значимости, так как расчетное значение F-критерия меньше табличного. Вычисленные по уравнению регрессии значения  $y$  отличаются от экспериментальных на величины, не превышающие ошибку опыта.

$$F_p = \frac{s_{ao}^2}{s_y^2} = 4,204 \quad (13)$$

При 5 %-ном уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 10 и знаменателя 5 табличное значение критерия равно 4,74.

$$Ra(s, v, t) = 8,35 - 6,7 \cdot 10^{-3}v + 11,26s - 3,8t + 3,33 \cdot 10^{-2}vs - 6,1 \cdot 10^{-1}st + 3 \cdot 10^{-4}v^2 + 8,2s^2 + 1,3t^2 \quad (15)$$

для баббита Б83

$$Ra(s, v, t) = 12,625 - 7,8 \cdot 10^{-1}v + 10,5s - 5,3t + 5,4 \cdot 10^{-2}vs - 9,5 \cdot 10^{-3}vt + 3,8 \cdot 10^{-4}v^2 + 7,1s^2 + 1,4t^2 \quad (16)$$

Среднее арифметическое значение параметра оптимизации  $\bar{y}$  в центре плана:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm ts \{b_0\} = 0,057 \\ \Delta b_i &= \pm ts \{b_i\} = 0,038 \\ \Delta b_{ii} &= \pm ts \{b_{ii}\} = 0,05 \\ \Delta b_{ij} &= \pm ts \{b_{ij}\} = 0,037 \end{aligned} \quad (10)$$

где  $t=2,57$  – табличное значение критерия Стьюдента при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы  $f=5$ .

Для баббита Б16 коэффициент  $b_{13}$  меньше доверительного интервала, а для баббита Б83 коэффициенты  $b_3$  и  $b_{23}$  меньше доверительных интервалов, поэтому их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнений регрессии (2), (3). После исключения незначимых коэффициентов уравнения принимают вид:

для баббита Б16

Значение  $F_p < F_T$ , поэтому модели следует признать адекватными.

Уравнения (11) и (12) неудобны для интерпретации полученных результатов и практических расчетов, поэтому преобразуем их по формулам перехода от кодированных значений  $(x_1, x_2, x_3)$  к натуральным значениям факторов  $(s, v, t)$ :

$$x_1 = \frac{v-105}{35}; \quad x_2 = \frac{s-0,1}{0,2}; \quad x_3 = \frac{t-1,5}{0,75} \quad (14)$$

Таким образом, уравнения (11) и (12) принимают вид:  
для баббита Б16

Полученные уравнения (15), (16) адекватны и могут быть использованы в качестве эмпирических моделей получаемой шероховатости поверхности при чистовом, получистовом и черновом фрезеровании.

На рис. 1–3 представлены зависимости шероховатости поверхности от скорости, подачи и

глубины резания при фрезеровании баббита Б16, на рис. 4–6 – аналогичные зависимости при фрезеровании баббита Б83. Горизонтальными линиями обозначены обеспечиваемые шероховатости получистового (Ra 6,3) и чистового (Ra 3,2) фрезерования.

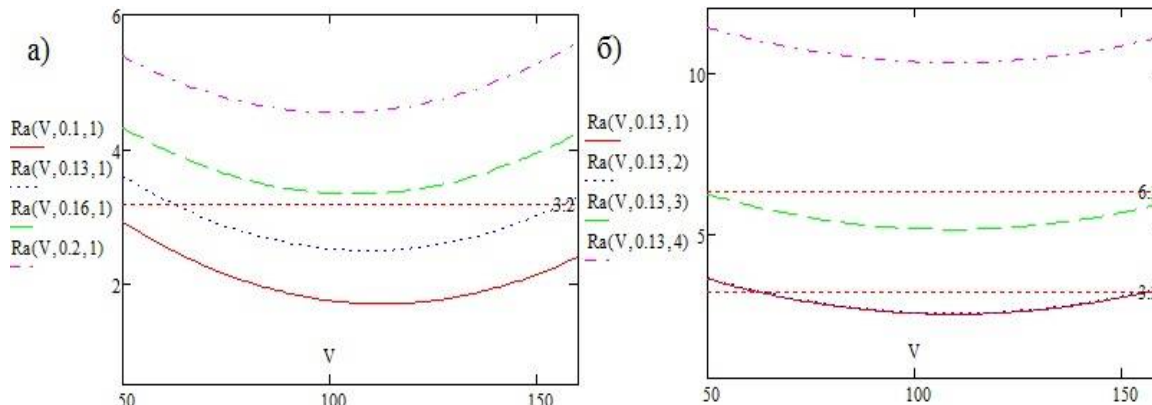


Рис. 1. Влияние скорости резания на получаемую шероховатость при фрезеровании баббита Б16: а – подача 0,1–0,2 мм/зуб, глубина резания 1 мм; б – подача 0,13 мм/зуб, глубина резания 1–4 мм

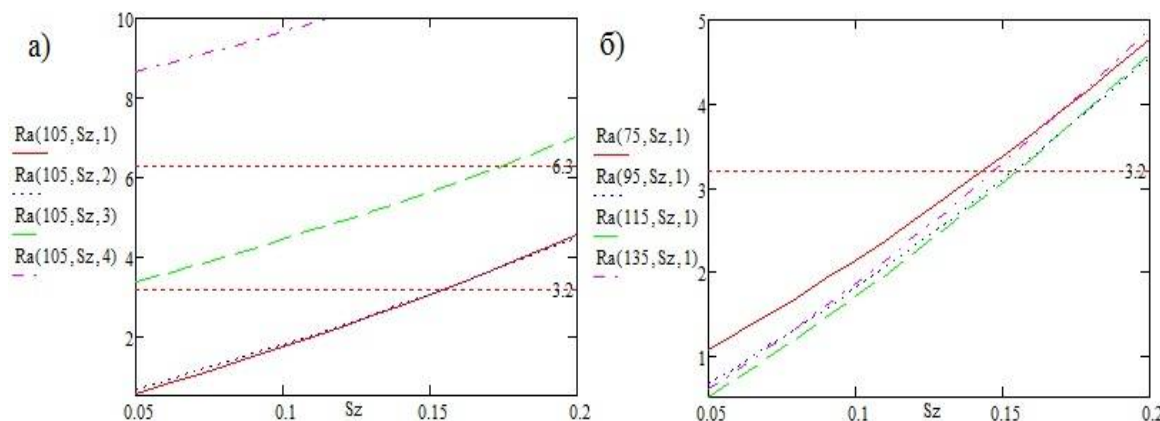


Рис. 2. Влияние подачи на получаемую шероховатость при фрезеровании баббита Б16: а – скорость резания 105 м/мин, глубина резания 1–4 мм; б – скорость резания 75–135 м/мин, глубина резания 1 мм

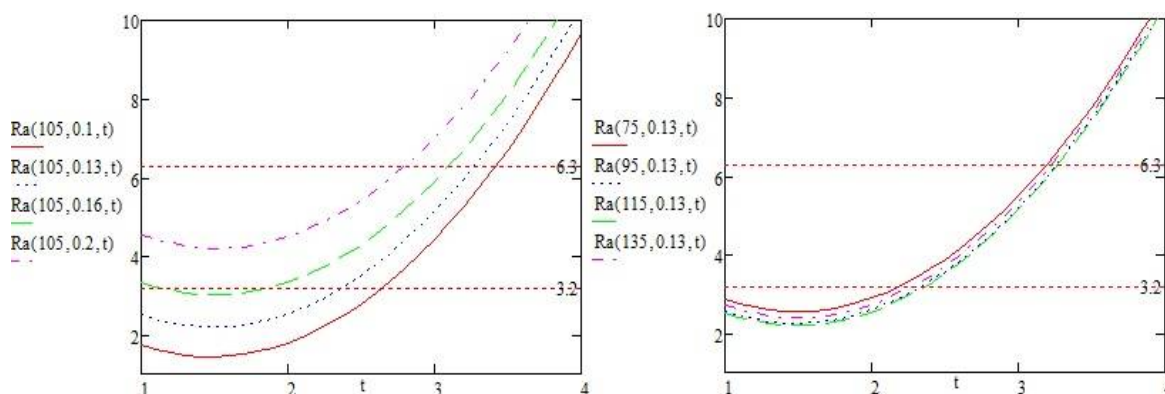


Рис. 3. Влияние глубины резания на получаемую шероховатость при фрезеровании баббита Б16: а – скорость резания 105 м/мин, подача 0,1–0,2 мм/зуб; б – скорость резания 75–135 м/мин, подача 0,13 мм/зуб

Анализируя графики рис. 1–3 можно сделать следующие выводы. Увеличение подачи увеличивает шероховатость поверхности, зави-

симость близка к линейному виду, что соответствует известным теоретическим положениям. Скорость резания не оказывает существенного

влияния в исследуемом диапазоне, однако ее влияние возрастает при малых глубинах резания. Влияние глубины резания имеет явный экстремальный характер. Минимальная шероховатость

обеспечивается при глубине около 1,5 мм, с увеличением глубины резания значения шероховатости увеличиваются.

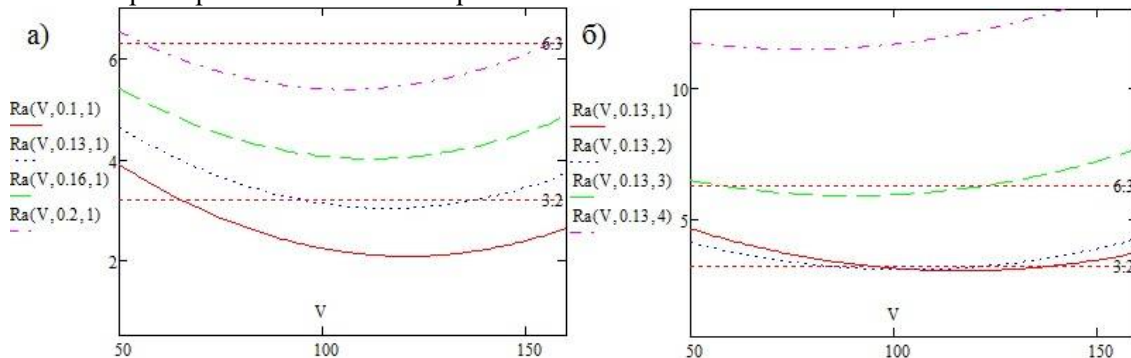


Рис. 4. Влияние скорости резания на получаемую шероховатость при фрезеровании баббита Б83: а – подача 0,1 – 0,2 мм/зуб, глубина резания 1 мм; б – подача 0,13 мм/зуб, глубина резания 1 – 4 мм.

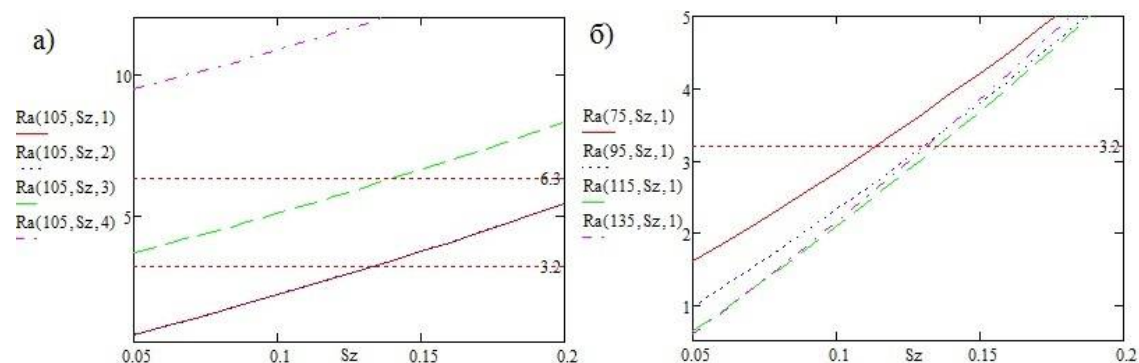


Рис. 5. Влияние подачи на получаемую шероховатость при фрезеровании баббита Б83: а – скорость резания 105 м/мин, глубина резания 1 – 4 мм; б – скорость резания 75 – 135 м/мин, глубина резания 1 мм.

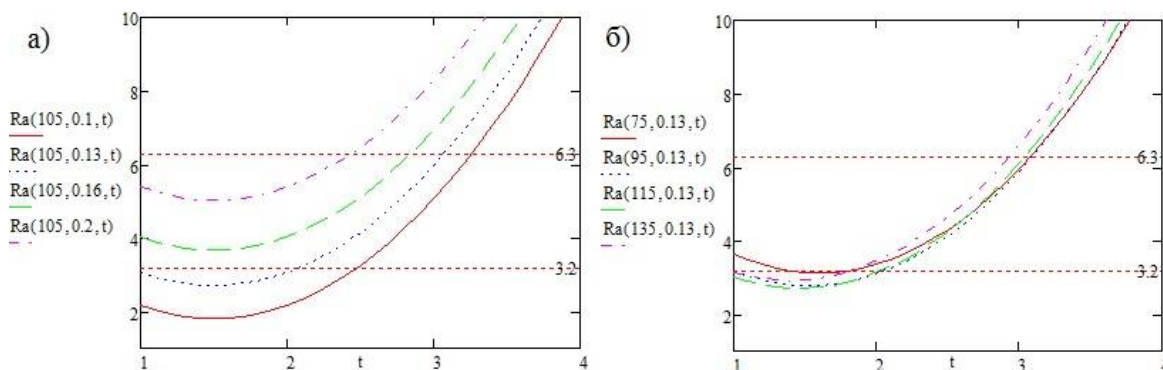


Рис. 6. Влияние глубины резания на получаемую шероховатость при фрезеровании баббита Б83: а – скорость резания 105 м/мин, подача 0,1 – 0,2 мм/зуб; б – скорость резания 75 – 135 м/мин, подача 0,13 мм/зуб

Закономерности формирования шероховатости поверхности при фрезеровании баббита Б83 (рис.4 – рис.6), в общем, аналогичны фрезерованию баббита Б16. Отличия состоят в числовых значениях шероховатости при определенных сочетаниях технологических режимов. Шероховатость поверхности при фрезеровании баббита Б83 несколько больше, чем при аналогичных сочетаниях технологических режимов фрезерования баббита Б16. Несколько смещен в сторону больших скоростей экстремум влияния

скорости резания при фрезеровании баббита Б83.

**Заключение.** Разработанные эмпирические модели шероховатости поверхности при фрезеровании баббитов Б16 и Б83 позволяют обоснованно назначать технологические параметры, обеспечивающие заданное качество, прогнозировать значение получаемой шероховатости, проводить оптимизацию технологических параметров с целью повышения производительности, снижения себестоимости.

\* 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. Пастухов А.Г., Дегтярев Н.М., Минасян А.Г. Теоретическое обоснование режимов механической обработки шипов упрочненных крестовин // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 215–222.
2. Пастухов А.Г. Методика оценки качества сборочных единиц по функциональным параметрам // Все материалы. Энциклопедический справочник. Приложение «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». 2014. № 3. С. 9-16.
3. Пастухов А.Г., Федоров С.К., Дегтярев Н.М., Жуков Е.М. Экспериментальные исследования влияния режимов ЭМО на эксплуатационные свойства рабочих поверхностей шипов крестовин // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т.117. С. 100–104.
4. Щетинин Н.А., Рыбалко В.Ю., Мурыгина Л.В., Черняев А.С., Шрубченко И.В. Параметры шероховатости поверхности при ленточном шлифовании // Электронный ресурс. Материалы Международной науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2012.
5. Мурыгина Л.В., Шрубченко И.В. Моделирование чистой обработки базовых поверхностей опор технологических барабанов // Технология машиностроения. 2011. №9. С. 57–60.
6. 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
7. 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.
8. 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. С. 273–277.
9. 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.
10. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

---

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

#### **EMPIRICAL MODELS SURFACE ROUGHNESS AT MILLING BABBITT**

*A procedure for development of empirical models of surface roughness when machining babbitt marks B16 and B83 used as a material for the sliding layer oversized sliding bearings. For the development of models used by the planning of extreme experiments of the second order by rotatable planning. As the study of technological parameters adopted: the supply of cutting tools, cutting depth and cutting speed. The effect of the studied process of milling conditions on the formation of the roughness of the surface of the babbitt. The developed empirical models enable reasonably assign process parameters to predict the value of the resulting roughness, optimize technological parameters.*

**Key words:** large-size bearings, repair processing support surface milling babbitt, the dependence of surface roughness on the technological modes.

---

**Дуюн Татьяна Александровна**, доктор технических наук, зав. каф. технология машиностроения профессор. 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 Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46  
E-mail: Oleg-beshevli@yandex.ru