

УДК 621.923

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-1-34-40

**С.Г. Бишутин**, д.т.н.  
(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,  
241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)  
E-mail: nad-bisch@yandex.ru

## **Совершенствование процессов финишной абразивной обработки заготовок деталей машин**

*Приведены результаты исследований качества и производительности новых процессов финишной абразивной обработки поверхностей заготовок. Описаны устройство и принцип работы созданного технологического оснащения исследованных процессов абразивной обработки. Представлены технологические режимы абразивной обработки заготовок деталей машин при рассмотренных процессах.*

**Ключевые слова:** абразивная обработка; качество; производительность; технологическое оснащение; режимы обработки заготовок.

**S.G. Bishutin**, Dr. Sc. Tech.  
(FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, Russia, 241035)

## **Improvement of machinery billet abrasion finishing**

*The investigation results of quality and performance of new finish abrasion processes of billet surfaces are shown. The device and operation principle of the created technological equipment of investigated abrasion processes are described. There are presented abrasion technological modes of machinery billets in the course of the processes analyzed.*

**Keywords:** abrasion; quality; productivity; technological equipment; modes of billet machining.

Повышение требований к качеству и надежности изделий современного машиностроения вызвало необходимость совершенствования процессов абразивной обработки, поскольку именно абразивная обработка в большинстве случаев является финишным этапом изготовления деталей машин, в ходе которых формируется их качество [5].

Совершенствование процессов абразивной обработки может проводиться по следующим направлениям:

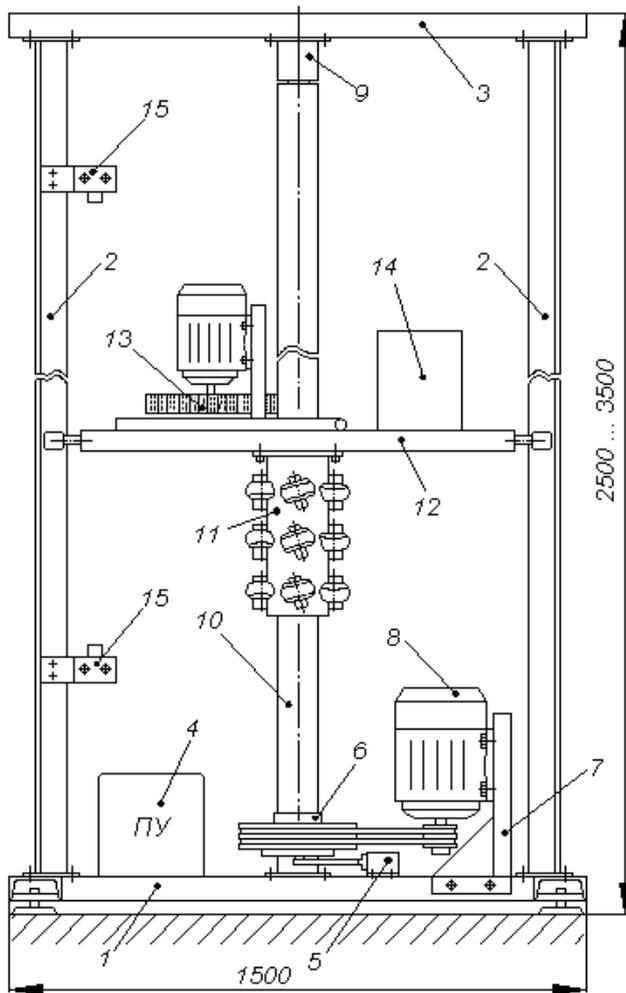
- создание нового технологического оснащения, позволяющего повысить качество и/или производительность финишной абразивной обработки;
- применение новых способов и схем финишной абразивной обработки рабочих поверхностей ответственных деталей машин;
- разработка комбинированных функционально-ориентированных технологий финишной абразивной обработки.

Рассмотрим результаты исследований в области совершенствования процессов финишной абразивной обработки по вышеуказанным направлениям.

В алмазно-абразивной обработке поверхностей деталей достаточно значительное место занимает шлифование лепестковыми кругами. Эти абразивные инструменты удачно сочетают жесткое крепление абразива и высокую эластичность, что позволяет производить обработку с низким уровнем тепловыделения, позволяющим исключить прижоги и сформировать в поверхностном слое заготовки остаточные напряжения сжатия. Широкое применение шлифования лепестковыми кругами наружных протяженных поверхностей валов (грузонесущих штанг фрикционных подъемников, торсионных валов автомобилей, штоков шахтных стоек, деталей штанговых насосов и др.) сдерживается отсутствием научно обоснованных рекомендаций по выбору ха-

характеристик инструмента, технологических режимов обработки и невысокой производительностью данного процесса из-за изнашивания абразивного инструмента.

В этой связи было создано специальное оборудование для лепесткового шлифования протяженных цилиндрических поверхностей заготовок (рис. 1), на котором были проведены экспериментальные исследования данного процесса.



**Рис. 1. Оборудование для лепесткового шлифования вертикально расположенных заготовок:**

1 – основание; 2 – вертикальная стойка; 3 – горизонтальная поперечина; 4 – пульт управления; 5 – электротормоз; 6 – нижняя цапфа; 7 – крепление; 8 – приводной электродвигатель; 9 – верхняя цапфа; 10 – обрабатываемая заготовка; 11 – каретка; 12 – платформа; 13 – шлифовальный узел; 14 – противовес; 15 – концевой выключатель

Данное оборудование позволяет шлифовать протяженные цилиндрические наружные поверхности с продольной подачей. Поскольку заготовка 10 устанавливается в цапфах 6 и 9, то она начинает вращаться вокруг своей оси, а ролики каретки 11 начинают обкатываться по её поверхности по винтовой линии. Установ-

ленная на обрабатываемой заготовке каретка и жестко связанная с ней платформа 12 начинают перемещаться вдоль оси заготовки. В это же время вращается и шлифовальный круг 13, который обрабатывает заготовку. Отличительной особенностью данного оборудования является то, что обрабатываемая заготовка располагается вертикально в двух опорах. Такое расположение заготовки исключает ее изгиб под действием сил тяжести, что обеспечивает постоянство толщины снимаемого слоя материала при обработке протяженных заготовок.

Новым является и механизм перемещения станины со шлифовальной бабкой. Преимуществом привода перемещения шлифовальной бабки является то, что центры площадок контакта полиуретановых роликов каретки с заготовкой расположены равномерно по окружности, лежащей в горизонтальной плоскости. Это обеспечивает равенство нулю результирующих усилий, возникающих в контакте заготовки со шлифовальным кругом и роликами. В результате не происходит отклонения абразивного инструмента (лепесткового круга) от обрабатываемой поверхности вертикально расположенной заготовки. При этом толщина снимаемого слоя материала также остается постоянной при шлифовании протяженной заготовки по всей длине. Описанная конструкция оборудования защищена патентом РФ № 84 765 на полезную модель.

При проведении экспериментальных исследований варьировалась зернистость  $Z$  лепестковых кругов (от 12 до 50 по ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.)), деформация (натяг)  $\delta$  (от 0,6 до 1,7 мм) и скорость  $v_k$  вращения лепесткового круга (от 10 до 30 м/с). Результаты исследований представлены в табл. 1.

В результате проведенных исследований было оценено влияние технологических режимов и характеристик инструмента на показатели шлифования лепестковыми кругами стальных заготовок, а также получены теоретико-экспериментальные зависимости, позволяющие достоверно прогнозировать параметры шероховатости шлифованной поверхности и производительность процесса обработки в течение всего периода стойкости инструмента [1, 2].

Традиционные методы финишной обработки поверхностей деталей, как правило, приводят к образованию на них волнистости и, в отдельных случаях, прижогов, что негативно отражается на эксплуатационных показателях деталей машин. Избежать подобной ситуации можно, если подвергнуть поверхность обработке крупнозернистыми абразивными брусками (зернистость 20...63 по ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.)), которая из-за невысоких ско-

ростей резания (до 5 м/с) не вызывает прижогов и способствует формированию в поверх-

ностном слое сжимающих остаточных напряжений [3, 4].

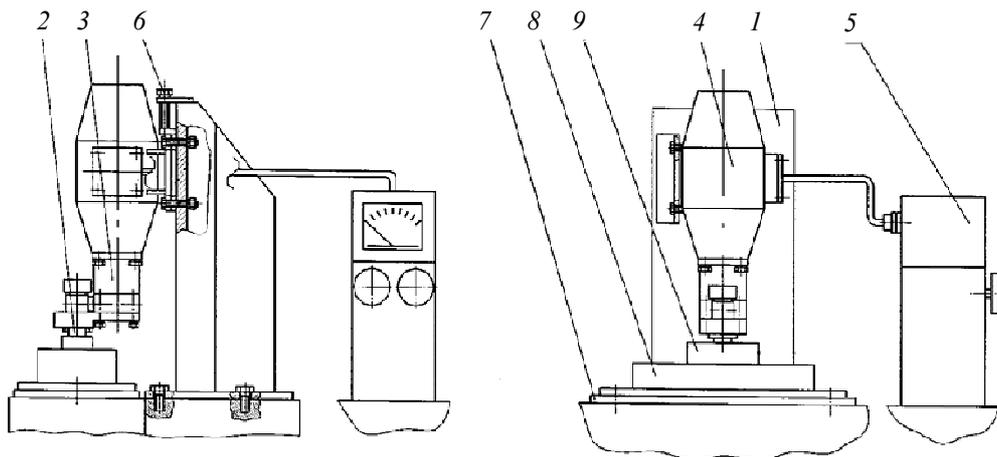
**1. Влияние технологических режимов на параметры шероховатости  $Ra$  и  $Sm$ , скорость съема металла  $Q$  и стойкость  $T$  лепестковых кругов при обработке стальных заготовок**

Зернистость круга по ГОСТ 3647-80	$v_k$ , м/с	$\delta$ , мм	$Ra$ , мкм	$Sm$ , мм	$Q$ , мм <sup>3</sup> /мин	$T$ , мин
12	10 ...15	0,6	0,35...0,40	0,10...0,11	130...135	8,0...10,0
		1,7	0,45...0,50	0,11...0,12	140...150	7,5...9,0
	25 ...30	0,6	0,25...0,30	0,08...0,09	150...160	7,0...8,5
		1,7	0,30...0,35	0,10...0,11	160...170	6,5...8,0
20	10 ...15	0,6	0,80...1,10	0,10...0,11	175...180	5,5...6,5
		1,7	1,20...1,50	0,11...0,12	180...185	5,0...6,0
	25 ...30	0,6	0,60...0,80	0,09...0,10	190...200	5,0...5,5
		1,7	0,75...0,90	0,10...0,11	195...205	4,5...5,5
32	10 ...15	0,6	1,60...1,75	0,12...0,13	205...210	4,0...5,0
		1,7	2,0...2,20	0,13...0,14	210...220	3,5...4,5
	25 ...30	0,6	1,20...1,40	0,10...0,11	215...230	3,5...4,0
		1,7	1,70...1,90	0,12...0,13	225...235	3,0...4,0
50	10 ...15	0,6	2,20...2,45	0,13...0,14	230...240	3,0...3,5
		1,7	2,60...3,0	0,14...0,16	240...250	3,0...3,5
	25 ...30	0,6	1,95...2,10	0,12...0,13	250...260	2,5...3,0
		1,7	2,15...2,30	0,14...0,15	260...270	2,0...2,5

Рабочая поверхность абразивного бруска контактирует с несколькими вершинами волн обрабатываемой поверхности. В связи с этим съем металла происходит только по вершинам волн, что в конечном итоге может привести к практически полному отсутствию волнистости на обрабатываемой детали, в поверхност-

ном слое которой будут сформированы остаточные напряжения сжатия.

Для экспериментальных исследований указанного процесса финишной абразивной обработки плоских поверхностей было разработано и изготовлено новое технологическое оборудование (рис. 2).



**Рис. 2. Установка для обработки плоских поверхностей абразивными брусками:**

1 – стойка; 2 – абразивный брусок; 3 – головка осцилляции; 4 – электродвигатель постоянного тока; 5 – регулятор напряжения электродвигателя; 6 – салазки с тяговым винтом; 7 – стол станка; 8 – магнитная плита; 9 – заготовка

Установка монтируется на плоскошлифовальном станке и работает следующим образом. Заготовка 9 призматической формы устанавливается на магнитную плиту 8 стола 7 станка и с помощью упоров продольного ре-

верса станка выставляется длина обработки. Абразивный брусок 2 устанавливается в державку головки осцилляции 3, находящуюся над заготовкой, и прижимается с требуемым регулируемым усилием к обрабатываемой по-

верхности. Подачей требуемого напряжения на электродвигатель 4 обеспечивается необходимая частота колебаний абразивного бруска. При этом заготовка вместе со столом станка совершает возвратно-поступательное движение. Устройство осцилляции бруска создано на основе эксцентрикового механизма и выполнено в виде головки осцилляции.

Заготовки призматической формы из закаленной стали обрабатывались абразивным инструментом разной зернистости (материал бруска – электрокорунд белый). В экспериментах варьировалось число рабочих ходов инструмента  $n_x$ , частота осцилляции бруска  $\theta$  и сила  $P$  прижатия бруска к обрабатываемой поверхности (табл. 2).

**2. План проведения экспериментов и показатели процесса обработки стальных закаленных поверхностей крупнозернистыми абразивными брусками**

Номер опыта	Зернистость бруска по ГОСТ 3647- 80	$n_x$	$\theta$ , Гц	$P$ , Н	$W$ , мм <sup>3</sup>	$Rz$ , мкм
1	25	120	10,0	30	55	6,0
2		120	18,3	30	75	5,2
3		120	26,7	30	150	4,8
4		240	18,3	30	190	4,4
5		360	26,7	30	375	3,5
6		480	26,7	30	450	3,4
7	40	120	15,0	90	150	6,5
8		120	26,7	90	320	5,3
9		240	21,7	90	590	5,0
10	63	120	10,0	30	150	9,0
11		120	18,3	30	225	8,5
12		120	26,7	30	300	7,5
13		240	18,3	30	415	7,0
14		360	18,3	30	560	6,5
15	360	26,7	30	750	6,0	

Примечания: 1)  $W$  – объем удаленного металла. 2) Параметр  $Ra = (0,23 \dots 0,2)Rz$ ,  $Sm = (50 \dots 70) Ra$ .

Результаты исследований показали, что процесс шлифования крупнозернистыми абразивными брусками будет наиболее эффективен при обработке узких плоских поверхностей, например таких, как направляющие машин и механизмов и рабочие поверхности железнодорожных рельсов.

Протяженные поверхности трения направляющих, применяемых в станках, лифтах, конвейерах и другом подъемно-транспортном оборудовании подвергаются интенсивному изнашиванию. Эффективным средством повышения долговечности таких поверхностей является формирование износостойких покрытий при антифрикционной обработке [5]. Однако существующие технологии антифрикционной обработки выполняются, как правило, поэтапно на различном оборудовании, что делает их трудоёмкими и дорогостоящими. В связи с этим была разработана новая технология комбинированной абразивно-антифрикционной обработки, включающая три основные стадии, выполняемые одновременно: предварительная абразивная обработка для подготовки поверхности к нанесению антифрикционного материала; натирание поверхности антифрикционным материалом; по-

верхностная пластическая деформация обработанного участка поверхности закаленными шариками.

Для реализации такой технологии разработан и изготовлен инструмент (рис. 3), который может обрабатывать наружную цилиндрическую (часть наружной цилиндрической поверхности) или плоскую протяженную поверхность. Он содержит корпус 1, который выполнен в форме диска с возможностью осевого вращения от внешнего привода и имеет коническую поверхность, обращенную вершиной к обрабатываемой заготовке.

На корпусе установлены следующие элементы: обрабатывающий элемент 2 в форме сменного лепесткового шлифовального торцевого диска, имеющий механизм осевого перемещения в виде поджатых винтами 3 пружин 4; натирающий элемент 5 из антифрикционного материала в форме кольца, который состоит из конечного количества секторов, имеющих возможность самоустанавливаться по обрабатываемой поверхности за счет деформации резины 6; выглаживающий элемент 10 в виде стальных закаленных шариков из стали ШХ15.

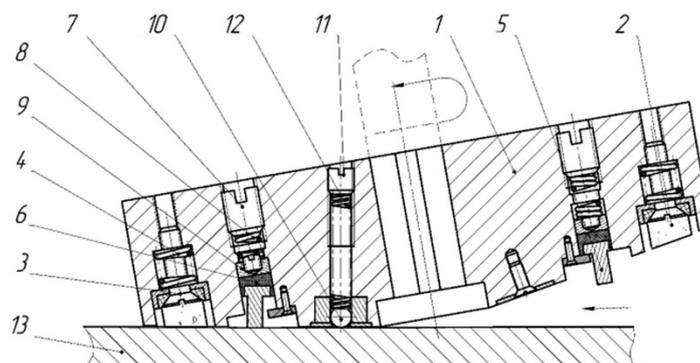


Рис. 3. Схема комбинированной абразивно-антифрикционной обработки

Натирающие элементы имеют механизм осевого перемещения в виде поджатых винтами 7 регулирующих пружин 8, поджимающих составной диск 9. Выглаживающие элементы также имеют механизм для перемещения в сторону обрабатываемой детали в виде поджатых винтами 11 регулирующих пружин 12, что позволяет менять силу прижатия выглаживающего элемента к обрабатываемой поверхности заготовки 13.

Рабочая поверхность направляющей формируется следующим образом. В шпиндель станка, например, вертикально-фрезерного, устанавливают данный инструмент и подводят к заготовке таким образом, чтобы обеспечить одновременное касание поверхности заготовки обрабатывающим, натирающим и выглаживающим элементами. Далее вращением винтов 7 и 11 обеспечивают необходимый натяг натирающих и выглаживающих элементов в сторону обрабатываемой поверхности. Инструменту придают осевое вращение от внешнего привода, после чего осуществляют его подачу по касательной к обрабатываемой поверхности заготовки.

Обрабатывающим элементом удаляется необходимый припуск и формируется требуемая шероховатость поверхности для обеспечения необходимой адгезии покрытия. Далее натирающий элемент, разогревая обрабатываемую

поверхность, наносит тонкий антифрикционный слой. В дальнейшем этот слой подвергается поверхностно-пластическому упрочнению выглаживающим элементом, что повышает его качество [6, 7]. Конструкция инструмента защищена патентом РФ №118907 на полезную модель.

Для определения технологических режимов комбинированной абразивно-антифрикционной обработки поверхностей направляющих был проведен ряд экспериментов с использованием данного инструмента на вертикально-фрезерном станке мод. 6Т13. В ходе экспериментов варьировались частота вращения шпинделя 50...200 мин<sup>-1</sup>, продольная подача инструмента 0,2...0,8 мм/об, сила прижатия натирающих 250...3000 Н и выглаживающих 100...500 Н элементов к обрабатываемой поверхности, зернистость обрабатывающих абразивных лепестков 12...25 по ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.).

Для обеспечения качественного антифрикционного покрытия при проведении экспериментов использовался глицерин. По результатам экспериментов были определены режимы обработки поверхностей направляющих, обеспечивающие стабильное формирование качественных антифрикционных покрытий на всём обрабатываемом участке заготовки (табл. 3).

### 3. Режимы комбинированной абразивно-антифрикционной обработки наружных цилиндрических и плоских поверхностей заготовок

Вид обрабатываемой поверхности	Скорость скольжения натирающих (выглаживающих) элементов, м/мин	Сила прижатия натирающих элементов, Н	Сила прижатия выглаживающих элементов, Н	Продольная подача устройства, мм/об	Зернистость абразивных элементов по ГОСТ 3647-80
Наружная цилиндрическая	60...90 (30...40)	350...400	140...170	0,2...0,3	12...16
Плоская	80...100 (40...50)	> 2500	150...200	0,3...0,5	16...20

Примечания: 1) Сила прижатия зависит от ширины плоской обрабатываемой поверхности. 2) Указанная зернистость абразивных лепестков обеспечивала шероховатость поверхности  $Ra = 0,8...2,0$  мкм. 3) Толщина антифрикционного покрытия находилась в пределах от 0,01 до 0,05 мм.

Шероховатость поверхности после комбинированной абразивно-антифрикционной обработки составила по параметру  $Ra = 0,5 \dots 1,0$  мкм и  $Sm = 0,1 \dots 0,2$  мм.

Стендовые испытания направляющих, обработанных по новой технологии, показали, что ресурс их рабочих поверхностей составляет 8 000...32 000 циклов (от 3 до 12 лет нормальной эксплуатации подъемников с цилиндрическими направляющими). Ресурс зависит от толщины антифрикционного покрытия, марки антифрикционного материала, технологических режимов обработки направляющей и нагрузки на ролик при испытаниях.

### Выводы:

1. Протяженные (свыше 1500 мм) наружные цилиндрические поверхности целесообразно обрабатывать при вертикальном расположении заготовки, что существенно снижает влияние её деформации под собственным весом на качество абразивной обработки. Для таких заготовок разработано и изготовлено оборудование, реализующее технологическую схему лепесткового шлифования с вертикальным расположением объекта обработки.

2. Установлены возможности шлифования лепестковыми кругами зернистостью от 12 до 50 (ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.)) протяженных стальных цилиндрических поверхностей по производительности и обеспечению параметров шероховатости поверхности. Так, скорость съема металла составляет 150...250 мм<sup>3</sup>/мин, параметр шероховатости  $Ra$  может меняться в пределах от 0,3 до 2,5 мкм,  $Sm$  – от 0,08 до 0,16 мм.

3. Обработка крупнозернистыми абразивными брусками (зернистость 25...63 по ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.)) наиболее рациональна, если требуемый съём металла одним бруском не превышает 600...800 мм<sup>3</sup>. При этом высотой шероховатости поверхности  $Rz$  можно управлять в пределах от 3,5 до 9,0 мкм.

4. Обработку крупнозернистыми абразивными брусками можно рекомендовать в качестве дополнительной обработки поверхностей направляющих для существенного снижения волнистости и формирования остаточных напряжений сжатия. Такая обработка по производительности уступает шлифованию, но существенно превосходит производительность суперфиниширования и хонингования.

5. Значение скорости скольжения натирающих элементов при комбинированной абразивно-антифрикционной обработке лежит в диапазоне от 70 до 100 м/мин, поскольку при увеличении скорости скольжения свыше 100 м/мин наблюдается неравномерность формирования антифрикционного покрытия, а

при скорости менее 70 м/мин существенно снижается производительность обработки. Сила прижатия к обрабатываемой цилиндрической поверхности выглаживающих элементов не должна превышать 350...400 Н, так как возможны местные разрушения антифрикционного покрытия поверхности.

6. Зернистость абразивных элементов 12–20 (по ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.)) обеспечивает шероховатость поверхности  $Ra = 0,8 \dots 2,0$  мкм, что способствует формированию качественного покрытия при комбинированной абразивно-антифрикционной обработке. При большей зернистости абразивных элементов наблюдается формирование фрагментарного покрытия на обрабатываемой поверхности. Фрагментарное покрытие также наблюдается при подаче устройства для абразивно-антифрикционной обработки более 0,5 мм/об.

Применение рассмотренных процессов финишной абразивной обработки позволяет существенно повысить эффективность современного машиностроительного производства.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бишутин, С.Г., Шупиков, И.Л. Оборудование для обработки и качество протяженных цилиндрических поверхностей после лепесткового шлифования // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – №5 (283). – С. 35–40.
2. Бишутин, С.Г., Шупиков, И.Л. Качество протяженных цилиндрических поверхностей деталей после лепесткового шлифования // *Справочник. Инженерный журнал*. – 2009. – № 10(151). – С. 54–56.
3. Бишутин, С.Г., Захаров, Л.А. Формирование поверхности при обработке крупнозернистыми абразивными брусками // *Машиностроитель*. – 2011. – № 16. – С. 23–26.
4. Бишутин, С.Г. Обеспечение требуемых параметров качества поверхностного слоя плоских поверхностей при обработке абразивными брусками // *Контактная жесткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.* – Брянск, 2003. – С. 239-242.
5. *Инженерия* поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320с.
6. Бишутин, С.Г., Пиляев, А.С. Особенности формирования рабочих поверхностей протяженных направляющих при финишной комбинированной антифрикционной обработке // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2013. – №3. – С. 5-9.
7. Бишутин, С.Г. Качество и износостойкость поверхностей трения протяженных цилиндрических направляющих после комбинированной антифрикционной обработки // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2018. – №11 (89). – С.19-24.

### REFERENCES

1. Bishutin, S.G., Shupikov, I.L. Equipment for processing and quality of extended cylindrical surfaces after petal grind-

ing // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2010. – No.5 (283). – pp. 35-40.

2. Bishutin, S.G., Shupikov, I.L. Quality of extended cylindrical surfaces of parts after petal grinding // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2009. – No.10 (151). – pp. 54-56.

3. Bishutin, S.G., Zakharov, L.A. Surface formation at processing with coarse-grain abrasive hones // *Mechanician*. – 2011. – No.16. – pp. 23-26.

4. Bishutin, S.G. Assurance of required quality parameters of surface layer in flat surfaces at abrasive stone working // *Contact Stiffness. Wear-resistance. Technological Support: Proceedings of the Inter. Scientif.-tech. Conf.* – Bryansk, 2003. – pp. 239-242.

5. *Engineering of Parts Surface* / A.G. Suslov, V.F. Bezilyazychny, Yu.V. Panfilov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.

6. Bishutin, S.G., Pilyaev, A.S. Peculiarities in formation of working surfaces of extended guides at combined finish anti-friction processing // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2013. – No.3. – pp. 5-9.

7. Bishutin, S.G. Quality and wear-resistance of friction surfaces of extended cylindrical guides after combined anti-friction processing // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.11 (89). – pp. 19-24.

Рецензент д.т.н. В.А. Носенко

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48

А.Н. Михайлов, д.т.н., Д.А. Михайлов, к.т.н., Е.А. Шейко, к.т.н., В.А. Михайлов, аспирант  
(Донецкий национальный технический университет,  
Академия гражданской защиты МЧС ДНР, г. Донецк)  
E-mail: mntk21@mail.ru

## Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями

*Показано, что компрессор газотурбинного двигателя состоит из групп лопаток, которые испытывают неравномерный абразивно-эрозионный износ, характеризуемый неравномерностями 3-х родов. Для повышения ресурса лопаток компрессора предложено использовать функционально-ориентированные покрытия и обеспечивать их свойства на основе принципа равного ресурса. В работе решены вопросы структурного синтеза комплексного многосвязного технологического процесса напыления функционально-ориентированных покрытий лопаток групп.*

**Ключевые слова:** лопатки компрессора; газотурбинный двигатель; технология; многосвязный процесс; функционально-ориентированные покрытия.

A.N. Mikhailov, Dr. Sc. Tech., D.A. Mikhailov, Can. Sc. Tech, E.A. Sheiko, Can. Sc. Tech.,  
V.A. Mikhailov, Post graduate student  
(Donetsk National Technical University, Academy of Civil Defense of MES DPR, Donetsk)

## Structural synthesis of complex multi-coherent engineering process of compressor blade processing of gas turbine engines with function-oriented coatings

*It is shown that the compressor of a gas turbine engine consists of a group of blades which experience uneven abrasive-erosion wear characterized with unevenness of three types. To increase compressor blade life it is offered to use function-oriented coatings and to ensure their properties on the basis of the principle of equal resource. In the work there are solved the problems of a structural synthesis of a complex multi-coherent technological process of function-oriented blade group sputtering.*

**Keywords:** compressor blades; gas turbine engine; technology; multi-coherent process; function-oriented coatings.

### Введение

Выполненные ранее исследования [1 – 3] позволили установить, что компрессор газотурбинного двигателя (ГТД) структурируется из групп лопаток, которые выполняют задан-

ные функции в проточной части компрессора. При этом в работах [4, 5] показано, что на лопатки компрессора действуют неравномерные абразивно-эрозионные воздействия, которые приводят к возникновению неравномерного износа лопаток в группах, характеризуемого