

## МАШИНОСТРОЕНИЕ . МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.787

Н. С. Гарлачов, канд. техн. наук, доц., Е. Н. Антонова, канд. техн. наук

### ТЕХНОЛОГИЯ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

В статье рассмотрены вопросы обеспечения шероховатости по параметру  $R_a$  и формы микрорельефа поверхности при пневмоцентробежной обработке (ПЦО) отверстий пневмоцентробежными раскатниками. Предложена технология пневмоцентробежной обработки отверстий, включающая выбор оборудования, режимов обработки, конструктивных параметров раскатника, технологической оснастки. Приведены обоснования экономической эффективности предложенной технологии.

На основании анализа теоретических основ ПЦО и экспериментальных данных, полученных в результате пневмоцентробежной обработки отверстий деталей из различных материалов, можно выявить закономерности изменения шероховатости и формы микрорельефа поверхности от конструктивных параметров инструмента и режимов обработки. Это позволит систематизировать параметры процесса, что, в свою очередь, даст возможность выбирать оптимальные режимы обработки и конструктивные параметры инструмента, повысит качество обработки и сократит время на проведение опытно-экспериментальных работ.

К основным конструктивным параметрам пневмоцентробежного раскатника, оказывающим влияние на качество обработанной поверхности, относятся количество, форма и диаметры сопел, количество и диаметр деформирующих шаров, радиальный зазор между обрабатываемой поверхностью детали и кольцами пневмораскатника. Технологическими параметрами являются давление в осевой полости пневмоцентробежного раскатника и его осевая подача.

Изменение расположения сопел относительно оси инструмента оказывает большое влияние на угол атаки шара, а следовательно, на изменение радиальной и тангенциальной составляющих результирующей скорости шара [1–3]. Естественно,

но, что с уменьшением расстояния  $b$  (рис. 1) частота вращения шаров уменьшается и увеличивается радиальная составляющая силы, действующей на обрабатываемую поверхность, а тангенциальная составляющая этой силы, соответственно, уменьшается. Наибольшую частоту вращения шары имеют при максимальном значении  $b$ .

Анализ результатов измерений показал, что с увеличением количества сопел и давления в осевой полости инструмента частота вращения деформирующих шаров увеличивается, т. к. увеличивается массовый расход воздуха, совершающего работу, необходимую для смятия неровностей. Исследования показали, что большее количество сопел меньшего диаметра, но с одинаковой суммарной площадью их проходных сечений, обеспечивающих постоянный массовый расход воздуха, способствует увеличению частоты вращения шаров. Это объясняется тем, что при меньшем количестве сопел, имеющих больший диаметр, деформирующий шар получает импульс с большей силой, чем при соплах меньшего диаметра.

Отскочив от обрабатываемой поверхности, шар, проходя путь до следующего сопла, расходует часть кинетической энергии, причем сила его воздействия на обрабатываемую поверхность на этом участке меньше, чем в

момент удара.

При увеличении числа сопел, но меньшего диаметра, путь, проходящий шаром до следующего сопла, уменьшается, соответственно, уменьшаются потери кинетической энергии. Увеличение числа импульсов, воздействующих на шар, способ-

ствует увеличению его частоты вращения, несмотря на уменьшение силы, действующей на него, в связи с уменьшением массового расхода воздуха через одно сопло. Снятие неровностей в этом случае происходит более равномерно по всей обрабатываемой поверхности.

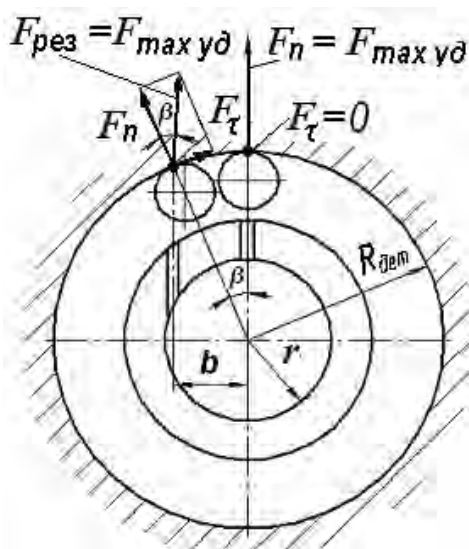


Рис. 1. Схема к расчету составляющих ударной силы шаров

Исследования влияния формы сопел на частоту вращения деформирующихся шаров показали (рис. 2), что расположенные по торцу распорных колец сопла с прямоугольным сечением, постоянным по длине, обеспечивают несколько меньшую частоту вращения шаров по сравнению с цилиндрическими соплами, расположенными по центру от торцов распорных колец.

Так, например, при давлении 0,2 МПа частота вращения шаров при использовании сопел прямоугольного сечения составила  $100 \text{ с}^{-1}$ , а цилиндрических –  $105 \text{ с}^{-1}$ . Это объясняется тем, что шары совершают больше осциллирующих движений вдоль оси обрабатываемой поверхности, при этом исключается их одноосное вращение.

Наибольшее влияние на частоту вращения оказывают конические сопла с углом конуса  $13^{\circ}$ , с прямоугольным поперечным сечением (рис. 3). Они

обеспечивают частоту вращения шаров при избыточном давлении 0,2 МПа такую же, как цилиндрические сопла при избыточном давлении в осевой полости инструмента 0,3 МПа [2].

С увеличением радиального зазора между деталью и инструментом давление в камере расширения уменьшается, соответственно, уменьшается и частота вращения шаров. Экспериментальные исследования показали, что при зазоре от 0,6 мм и больше частота вращения шаров практически не изменяется. Изменением зазора можно регулировать частоту вращения шаров в камере расширения, не увеличивая давление в осевой полости инструмента.

Уменьшение частоты вращения шаров сказывается и на качестве обрабатываемой поверхности. Так, например, при обработке чугуновых гильз цилиндров двухрядным пневмоцентробежным раскатником с радиальным зазором между

гильзой и инструментом, равным 0,6 мм, частота вращения шаров составила  $28 \text{ с}^{-1}$ , а шероховатость поверхности после об-

работки –  $Ra 0,8...1 \text{ мкм}$  при исходной  $Ra 2,2...2,5 \text{ мкм}$ .

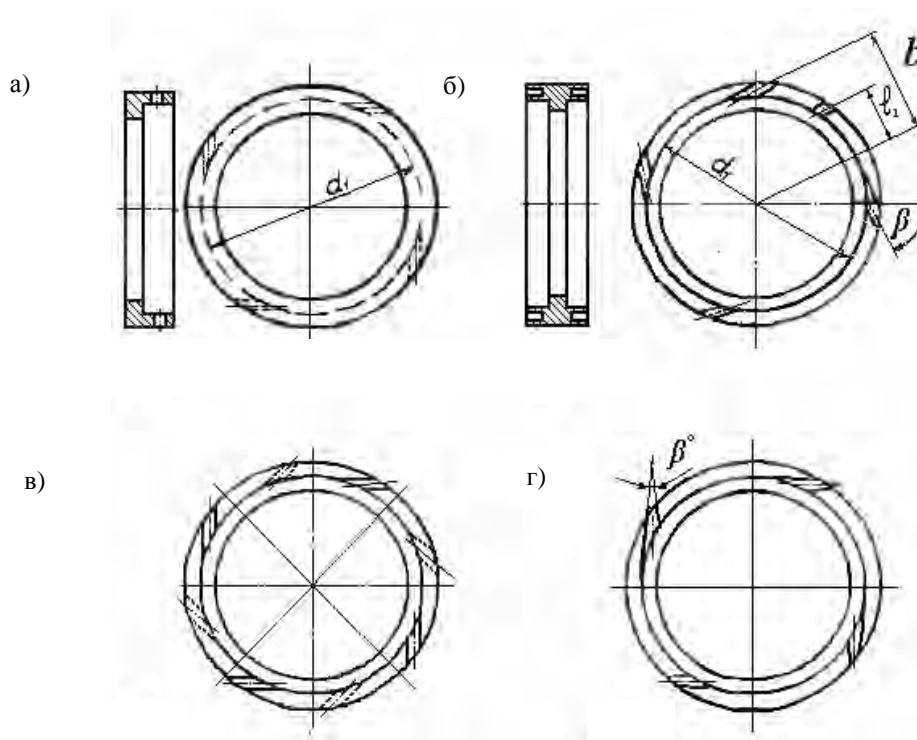


Рис. 2. Форма и расположение сопел в распорных втулках: а – сопла цилиндрические на периферии распорной втулки; б – сопла призматические без смещения на противоположных торцах втулки; в – сопла призматические со смещением на противоположных торцах втулки; г – сопла конические без смещения на противоположных торцах втулки

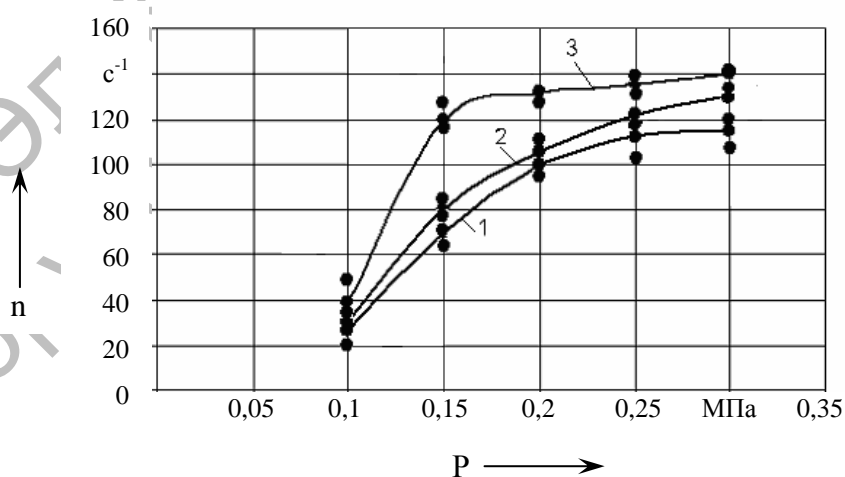


Рис. 3. Влияние давления и формы сопел на частоту вращения шаров: 1 – сопла призматические; 2 – сопла цилиндрические; 3 – сопла с прямоугольным сечением конические (зазор между заготовкой и инструментом  $\gamma = 0,3 \text{ мм}$ )

Давление в осевой полости инструмента не превышало 0,18 МПа.

При уменьшении радиального зазора до 0,3 мм увеличилось давление в камере расширения и, соответственно, давление в осевой полости инструмента до 0,25 МПа, и частота вращения деформирующих шаров составила  $36 \text{ с}^{-1}$ . Шероховатость поверхности после обработки составила  $Ra 0,5 \dots 0,7 \text{ мкм}$ .

Экспериментально установлено, что численные значения частоты вращения шаров находятся в диапазоне от 25 до  $140 \text{ с}^{-1}$  в рассматриваемом интервале диаметров заготовок 20...120 мм и диаметров шаров 5...13 мм.

Результаты экспериментальных исследований процесса пневмоцентробежной обработки отверстий показывают, что на шероховатость поверхности наибольшее влияние оказывают давление сжатого воздуха в осевой полости и подача инструмента. Так, при давлении сжатого воздуха 0,15...0,3 МПа и подаче 90...150 мм/мин обеспечивается шероховатость поверхности  $Ra 0,3 \dots 0,5 \text{ мкм}$  с исходной  $Ra 5 \dots 4 \text{ мкм}$ . Установлено, что на форму микрорельефа наибольшее влияние оказывает количество сопел и их расположение. Так, при минимальном расстоянии от оси сопел до оси инструмента, при котором происходит вращение шаров вокруг оси инструмента, и количестве сопел от 4 до 6 обеспечивается получение луночного микрорельефа. При максимальном расстоянии от оси сопел до оси инструмента и количестве сопел 8...12 при применении двухрядного раскатника обеспечивается получение регулярного микрорельефа в виде ромбической сетки. При смещении сопел в кольцах, образующих камеру расширения инструмента, возникают осциллирующие движения вдоль оси обрабатываемой заготовки, что способствует уменьшению шероховатости поверхности до  $Ra 0,3 \dots 0,24 \text{ мкм}$  и увеличению относительной опорной длины профиля до  $t_{40} 93 \%$ .

### **Выбор оборудования и оснастки для пневмоцентробежной обработки отверстий**

Упрочняющая пневмоцентробежная обработка отверстий выполняется после чистовой расточки или после черного хонингования с шероховатостью поверхности  $Ra 3,2 \dots 2,5 \text{ мкм}$ . ПЦО может выполняться как на универсальном оборудовании (токарные, фрезерные, расточные, радиально-сверлильные станки) без применения смазочно-охлаждающих жидкостей, так и на специальном оборудовании. Предпочтительнее использовать станки с вертикальной компоновкой. Для осуществления процесса ПЦО достаточно мощности привода станка 0,5 кВт.

Устанавливаться и закрепляться заготовка может в патронах и других универсальных приспособлениях, а также в специально изготовленном приспособлении (рис. 4), исключающем силовое воздействие зажимных элементов на обрабатываемую заготовку (гильзу).

### **Выбор режимов обработки**

При назначении элементов режимов ПЦО необходимо учитывать твердость обрабатываемого конструкционного материала, исходную и требуемую шероховатости поверхности, требуемую форму микрорельефа, тип оборудования.

Элементы режимов обработки устанавливаются в порядке, указанном ниже.

Подачу  $S_{\text{мин}}$  выбирают следующим образом. В зависимости от твердости обрабатываемого материала определяется работа, необходимая для смятия микронеровностей (рис. 5), согласно которой выбирается подача  $S_{\text{мин}}$ , мм/мин (рис. 6).

Так, например, для обработки изделий с твердостью 65...75 НВ по графику (см. рис. 5) определяем необходимую работу для смятия  $A_{\text{см}} = 40 \text{ Дж}$ , и по этому значению (см. рис. 6) оптимальное значение подачи для рассматриваемого материала составит 38...40 мм/мин.

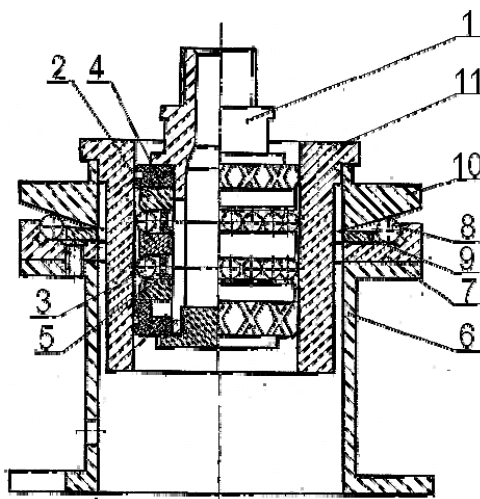


Рис. 4. Пневмоцентробежный раскатник и устройство для обработки гильз цилиндров: 1 – корпус двухрядного шарикового раскатника; 2 – диски; 3 – деформирующие шары; 4 – центрирующие кольца; 5 – распорные втулки; 6 – сварной корпус приспособления; 7 – кольцо; 8 – шарики; 9 – сепаратор; 10 – диск; 11 – обрабатываемая гильза

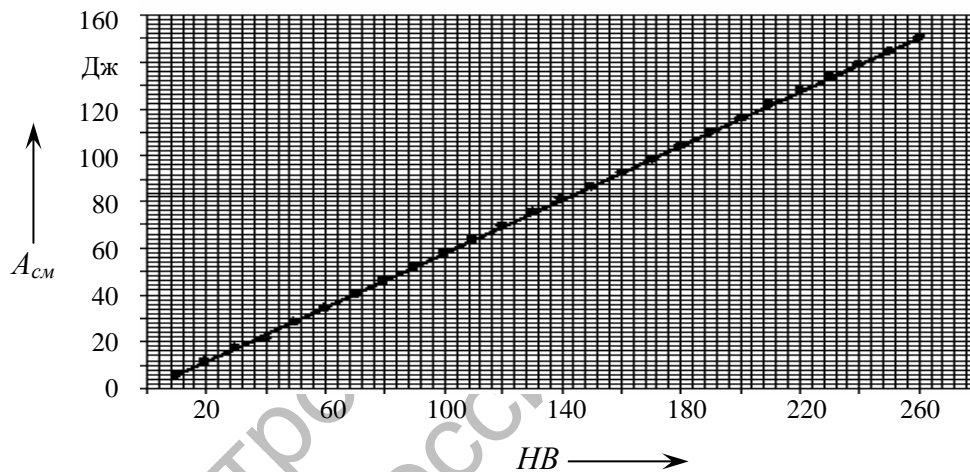


Рис. 5. Зависимость работы, необходимой для смятия микронеровностей, от твердости обрабатываемого материала

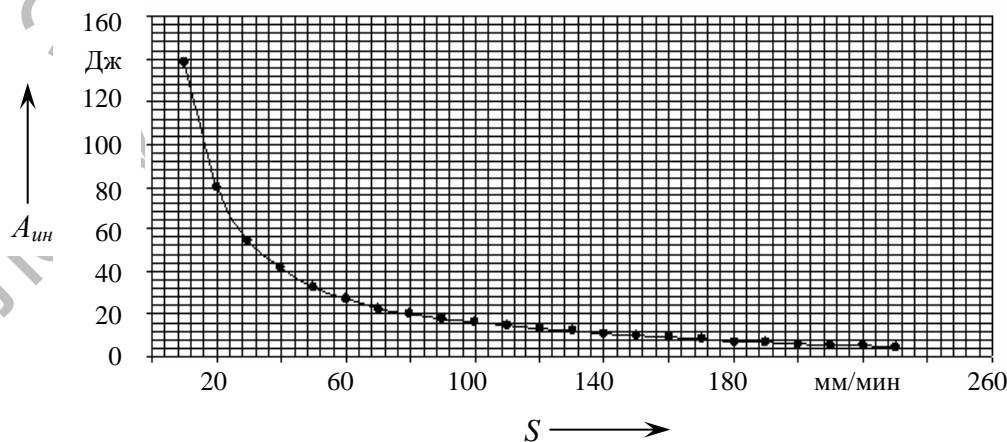


Рис. 6. Зависимость работы, совершаемой инструментом, от подачи

Давление в осевой полости корпуса инструмента  $P_0$  выбирают в диапазоне 0,1...0,3 МПа, исходя из требуемой формы микрорельефа и твердости обрабатываемого материала. При обработке цветных металлов принимается меньшее значение давления, а при обработке стали – большее.

### Выбор конструктивных параметров раскатника

При выборе конструктивных параметров пневмоцентробежных раскатников необходимо учитывать требуемую форму микрорельефа и диаметр обрабатываемой заготовки.

Конструктивные параметры раскатника устанавливают в порядке, указанном ниже.

Диаметры шаров  $d_{ш}$  выбирают в

интервале 5...13 мм в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия, конструкции раскатника и требуемой формы микрорельефа. Обработку отверстий диаметром менее 30 мм рекомендуется проводить однорядным шариковым раскатником [5]. Для обработки отверстий более 30 мм – использовать конструкцию унифицированного двухрядного шарикового раскатника [4]. Диаметры шаров для этих инструментов рекомендуется выбирать по табл. 1.

Форма, расположение, количество  $z_c$  и диаметры сопел  $d_c$  зависят от формы требуемого микрорельефа и выбираются по табл. 2.

Расположение сопел в распорных втулках раскатника представлено на рис. 2.

Табл. 1. Диаметры шаров

Форма микрорельефа	Диаметр шаров, мм, при диаметре заготовки, мм				
	20...30	30...60		60 и более	
	Однорядный раскатник	1-й ряд шаров	2-й ряд шаров	1-й ряд шаров	2-й ряд шаров
Луночный	5...6	5...6	5...6	5...6	5...6
Регулярный в виде ромбической сетки	–	5...6	7...8	8	10...13
Выглаживающий эффект	–	5...6	7...10	10	12...13

Табл. 2. Форма, расположение, количество  $z_c$  и размеры поперечного сечения сопел ( $b \times h$  или  $d_c$ )

Форма микрорельефа	Количество сопел $z_c$	Размеры поперечного сечения сопел ( $b \times h$ или $d_c$ ), мм	Форма сопел	Расположение сопел в распорных втулках раскатника и направление вращения шаров в двухрядном раскатнике
Луночный стохастический	4...6	1×3	Коническая, с углом конуса 13°	На противоположных торцах втулок друг напротив друга и на расстоянии относительно оси инструмента, равном половине наружного диаметра распорного кольца. Вращение шаров – встречное
Регулярный в виде ромбической сетки	8...12	1×3	Коническая, с углом конуса 13°	На противоположных торцах втулок со смещением относительно друг друга и без смещения или на наружной цилиндрической поверхности. Вращение шаров – в противоположных направлениях
		2...3	Цилиндрическая	
Выглаживающий эффект	8...12	1×3	Коническая, с углом конуса 13°	На противоположных торцах втулок со смещением относительно друг друга и на максимально возможном расстоянии от оси инструмента (определяемого конструкцией распорных втулок). Вращение шаров – противоположное

Оптимальный зазор между инструментом и заготовкой  $\gamma$ , от которого зависит наружный диаметр колец раскатника, рассчитывается по зависимости

$$\gamma = \sqrt{\frac{Q_{\text{сопт}}^2}{\mu_3^2 P_0 \rho_3 \pi^2 D_{\text{дет}}^2}},$$

где  $Q_{\text{сопт}}^2$  – массовый расход воздуха через сопла при условии критического истечения, кг/с;  $\mu_3$  – коэффициент расхода воздуха через зазор между деталью и инструментом;  $P_0$  – давление в осевой полости инструмента,  $P_0 = 0,05 \dots 4$  МПа;  $\rho_3$  – плотность воздуха в зазоре между деталью и инструментом, кг/м<sup>3</sup>;  $D_{\text{дет}}$  – диаметр заготовки, мм.

Расчет ведется на ЭВМ согласно составленному алгоритму в программе EXCEL [2]. Для осуществления расче-

тов в программу необходимо ввести некоторые справочные данные, а также твердость обрабатываемого конструкционного материала, исходную и требуемую шероховатость. К справочным данным относятся представленные ниже параметры.

Коэффициент расхода воздуха:  $\mu_c = 0,82$  – для цилиндрических сопел,  $\mu_c = 0,92$  – для конических,  $\mu_c = 0,87$  – для сопел прямоугольного сечения, для кольцевого зазора между заготовкой и инструментом  $\mu_3 = 0,75$ .

Коэффициент Пуассона  $\mu = 0,32$ .

Показатель адиабаты  $k = 1,4$ .

Давление атмосферное  $P_a = 100\,000$  Па.

Коэффициент  $k'$ , зависящий от свойств обрабатываемого материала, выбирается по табл. 3.

Табл. 3. Коэффициент  $k'$  для различных материалов

Материал	$k'$
Сталь	0,36
Серый чугун	0,15
Медь	0,48
Бронза	0,46
Алюминий	0,38
Баббит	0,3...0,41

Осуществив выбор режимов обработки и конструктивных параметров инструмента по выше представленным рекомендациям, производят расчет шероховатости  $R_a$  и зазора между заготовкой и инструментом  $\gamma$  согласно алгоритму. Для расчета зависимости, определяющей скорость шара до удара (входящей в алгоритм расчета), поправочный коэффициент  $K_v$  выбирается по табл. 4 в зависимости от диаметров шаров и заготовки.

Полученная при расчетах шероховатость сравнивается с требуемой. Если эти значения различаются, то входным параметрам (давлению, подаче, диаметрам шаров) придаются некоторые изменения. Вычисления повторяются до тех пор, пока различие между расчетной и требуемой шероховатостью станет несущественным. Окончательно значения конструктивных и технологических параметров принимаются те, которые обеспечивают требуемую шероховатость.

Табл. 4. Значения поправочного коэффициента  $K_v$ 

Диаметр шаров, мм	Диаметр заготовки, мм												
	22	30	40	45	50	60	65	70	80	90	100	110	120
5	0,241	0,193	0,116	0,149	0,14	0,126	0,12	0,115	0,107	0,10	0,094	0,09	0,085
6	0,209	0,164	0,136	0,125	0,118	0,105	0,10	0,096	0,09	0,084	0,079	0,075	0,071
7	0,185	0,144	0,117	0,108	0,101	0,091	0,086	0,082	0,077	0,072	0,067	0,064	0,061
8	0,169	0,129	0,104	0,096	0,089	0,08	0,076	0,073	0,067	0,062	0,059	0,056	0,053
9	0,159	0,117	0,094	0,086	0,08	0,071	0,068	0,065	0,06	0,056	0,052	0,05	0,047
10	–	0,108	0,086	0,079	0,073	0,065	0,062	0,059	0,054	0,05	0,047	0,045	0,042
11	–	0,102	0,08	0,073	0,067	0,059	0,056	0,052	0,05	0,046	0,043	0,041	0,038
12	–	0,097	0,075	0,068	0,063	0,055	0,052	0,05	0,046	0,042	0,04	0,037	0,035
13	–	–	0,07	0,064	0,059	0,051	0,049	0,046	0,042	0,039	0,037	0,035	0,032

**Технико-экономическая  
эффективность применения  
разработанной технологии  
пневмоцентробежной упрочняющей  
обработки для подшипников  
скольжения**

На ЗАО «Компрессороремонтный завод» (г. Могилев) была проведена промышленная обработка подшипников скольжения винтовых компрессоров. Материал подшипников – баббит.

Для оценки технико-экономической эффективности применения разработанной технологии пневмоцентробежной упрочняющей обработки для подшипников скольжения винтовых компрессоров был проведен сравнительный анализ затрат на новую технологию ремонта с применением пневмоцентробежной упрочняющей обработки (третья чистовая расточка, используемая для достижения шероховатости поверхности Ra 0,5...0,6 мкм, была заменена на ПЦО) и базовую. Проведен анализ затрат и экономии по следующим направлениям: экономия расходов на обработку подшипников скольжения и капитальные затраты на внедрение новых технологий и срок их окупаемости.

Трудоемкость новой технологии ремонта была рассчитана для двух вариантов: с использованием математической модели с применением программы расчета на ЭВМ и без применения программы. Всего за год при серийности 50 подшипников в день по первому варианту затраты на финишную операцию составили 1 532 590 р., по второму – 1 344 300 р. Затраты по базовому варианту составляют 6 939 200 р.

Применение разработанной математической модели и унифицированного раскатника для обработки внутренних поверхностей отверстий на ЗАО «Компрессороремонтный завод» позволило снизить трудоемкость финишной операции при обработке подшипников скольжения в 5 раз, сократить затраты на электроэнергию в 35 раз, исключить затраты на эмульсию и получить экономический эффект 5,6 млн р. в год при серийности 50 подшипников в день. Кроме экономического эффекта, полученного за счет сокращения затрат на ремонт, следует ожидать получения косвенного эффекта от повышения надежности и долговечности работы винтовых компрессоров, что позволяет предпринять увеличить срок эксплуатации компрессоров.



### Выводы

1. Впервые разработана технология пневмоцентробежной обработки отверстий, позволяющая обоснованно выбирать режимы обработки и конструктивные параметры раскатников с использованием математического моделирования для обеспечения требуемой шероховатости и формы микрорельефа поверхности.

2. Доказана возможность применения разработанной технологии на основании опытно-промышленной проверки и ее внедрения.

3. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии, позволяющей прогнозировать и обеспечивать требуемую шероховатость и форму микрорельефа поверхности при упрочняющей пневмоцентробежной обработке отверстий, а также унифицированного пневмоцентробежного раскатника на ЗАО «Компрессороремонтный завод» составил 5,6 млн р. при серийности 50 подшипников в день.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гарлачов, Н. С.** Влияние конструктивных и технологических факторов на частоту вращения шаров пневмоцентробежного раскатника / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 41–44.

2. **Гарлачов, Н. С.** Управление шероховатостью и формой микрорельефа при упрочняющей пневмоцентробежной обработке отверстий / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 1. – С. 76–81.

3. **Антонова, Е. Н.** Обработка внутренних поверхностей тел вращения двухрядным пневмоцентробежным раскатником / Е. Н. Антонова // Сб. науч. тр. членов междунар. Балтийской ассоциации машиностроителей. – Калининград, 2005. – № 5. – С. 59–61.

4. **Пат. 421 РБ, В 24 В 39/02.** Инструмент для обработки цилиндрических отверстий методом пластической деформации / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова ; заявитель и патентообладатель Гарлачов Николай Семенович, Антонова Елена Николаевна. – № 20010148 ; заявл. 14.06.01 ; опубл. 30.12.01. – 4 с.

5. **А. с. 1761452 СССР, А2 В 24 В 39/02.** Инструмент для упрочняющей обработки внутренних цилиндрических поверхностей / А. П. Минаков [и др.] (СССР). – № 4754020/27–27 ; заявл. 30.10.89 ; опубл. 15.09.92, Бюл. № 34. – 5 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 22.06.2009

**N. S. Garlachov, E. N. Antonova**  
**Management of the roughness and the form of the microrelief at strengthening pneumocentrifugal processing apertures**

In the article questions of maintenance of roughness on Ra parameter and forms of a microrelief of the surface are examined at pneumocentrifugal processing of apertures with pneumocentrifugal burnishers. The technology of pneumocentrifugal processing of the apertures, including a choice of the equipment, modes of processing, design factors of the burnisher, industrial equipment is offered. Substantiations of economic efficiency of the offered technology are presented in the article.