

УДК 621.924.93

doi:10.21685/2072-3059-2022-2-10

Технологическое обеспечение центробежной отделочно-упрочняющей и зачистной обработки поверхностей деталей

В. З. Зверовщиков¹, С. А. Нестеров²,
А. В. Зверовщиков³, А. Е. Зверовщиков⁴, А. В. Стешкин⁵

^{1,2,3,4,5}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹wzzwer@mail.ru, ²nesterovs@list.ru,

³avz.docent@gmail.com, ⁴azwer@mail.ru, ⁵tmspgu@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Внедрение на отечественных промышленных предприятиях высокопроизводительных технологий центробежной объемной обработки деталей сдерживается ограниченными возможностями приобретения технологического оборудования и недостаточной изученностью центробежных способов обработки. Целью работы является повышение эффективности центробежной отделочно-упрочняющей и зачистной обработки деталей на основе создания новых схем и технологического обеспечения для их реализации в производственных условиях. *Материалы и методы.* Предложено повысить эффективность процесса объемной обработки поверхностей деталей за счет научно обоснованного регламентирования скоростей планетарного вращения контейнеров для управления движением рабочей загрузки в объеме контейнера и уменьшения или периодического устранения застойной зоны на основе изучения динамики процесса. Предложены расчетные зависимости для определения границы перехода от объемной обработки деталей в скользящем слое до трансформации рабочих тел в плотный инструмент для полирования стенки, т.е. обработки внутренних кольцевых поверхностей деталей. *Результаты.* Предложены новые технические решения для стабилизации показателей качества поверхностей деталей и предотвращения брака при объемной центробежной обработке, эффективность которых подтверждена экспериментальной проверкой. Для оценки производительности центробежной обработки получена эмпирическая математическая модель процесса съема металла, которая позволяет определить величину технологического припуска, удаляемого при заданных условиях обработки. *Выводы.* Внедрение новых способов отделочно-упрочняющей и зачистной обработки позволит повысить эффективность технологических операций и отказаться от приобретения оборудования для механизации этих операций за рубежом.

Ключевые слова: центробежная обработка, отделочная обработка, гранулированные рабочие среды, качество поверхности, планетарное движение

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта № 0748-2020-0013 «Научные принципы формирования гетерогенных структур методами физико-химического диспергирования» (государственное задание вузу в сфере научной деятельности. Заказчик Министерство науки и высшего образования РФ).

Для цитирования: Зверовщиков В. З., Нестеров С. А., Зверовщиков А. В., Зверовщиков А. Е., Стешкин А. В. Технологическое обеспечение центробежной отделочно-упрочняющей и зачистной обработки поверхностей деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 117–133. doi:10.21685/2072-3059-2022-2-10

Technological support of centrifugal finishing-hardening and stripping surface treatment of parts

V.Z. Zverovshchikov¹, S.A. Nesterov²,
A.V. Zverovshchikov³, A.E. Zverovshchikov⁴, A.V. Steshkin⁵

^{1,2,3,4,5}Penza State University, Penza, Russia

¹wzzwer@mail.ru, ²nesterovs@list.ru,

³avz.docent@gmail.com, ⁴azwer@mail.ru, ⁵tmspgu@mail.ru

Abstract. *Background.* The introduction of high-performance technologies of centrifugal volumetric processing of parts at domestic industrial enterprises is constrained by limited opportunities for the acquisition of technological equipment and insufficient knowledge of centrifugal processing methods. The purpose of the work is to increase the efficiency of centrifugal finishing, strengthening and stripping processing of parts based on the creation of new schemes and technological support for their implementation in production conditions. *Materials and methods.* It is proposed to increase the efficiency of the process of volumetric surface treatment of parts by scientifically-based regulation of the speeds of planetary rotation of containers to control the movement of the working load in the volume of the container and reduce or periodically eliminate the stagnant zone based on the study of the dynamics of the process. Calculated dependences are proposed for determining the boundary of the transition from volumetric processing of parts in a sliding layer to the transformation of working bodies into a dense tool for polishing the wall, i.e. processing the inner annular surfaces of parts. *Results.* New technical solutions have been proposed to stabilize the quality indicators of the surfaces of parts and prevent defects during volumetric centrifugal processing, the effectiveness of which has been confirmed by experimental verification. To evaluate the performance of centrifugal processing, an empirical mathematical model of the metal removal process was obtained, which allows determining the amount of technological allowance removed under specified processing conditions. *Conclusions.* The introduction of new methods of finishing, strengthening and stripping processing will increase the efficiency of technological operations and refuse to purchase equipment for the mechanization of these operations abroad.

Keywords: centrifugal treatment, finishing treatment, granular working media, surface quality, planetary motion

Acknowledgments: the work was performed within a research project No. 0748-2020-0013 “Scientific principles of the formation of heterogeneous structures by methods of physico-chemical dispersion” (university research assignment for the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation).

For citation: Zverovshchikov V.Z., Nesterov S.A., Zverovshchikov A.V., Zverovshchikov A.E., Steshkin A.V. Technological support of centrifugal finishing-hardening and stripping surface treatment of parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(2):117–133. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-2-10

Введение

Отделочно-упрочняющую и зачистную обработку поверхностей деталей применяют во всех отраслях промышленности, а особенно в машиностроении и приборостроении для повышения качества поверхностей деталей путем шлифования, полирования и упрочнения или подготовки их под гальванические покрытия.

Для деталей со сложным профилем рабочей поверхности применяют методы объемной обработки, при которых детали перемещаются в потоке

гранулированного шлифовального материала. Контактное взаимодействие рабочих тел потока с обрабатываемыми поверхностями позволяет осуществлять размерную или декоративную отделку, повышать механические свойства поверхностных слоев металла. Шероховатость поверхности после объемного полирования снижается до двух раз, шлифования – до 1,5 раза, а упрочнения – до 2,5 раза. Несмотря на то, что в общей трудоемкости изготовления большинства деталей в машиностроении отделочно-упрочняющая и зачистная обработка достигает 10–20 %, механизация этих технологических операций существенно ниже по сравнению с основными операциями механической обработки. Это объясняется тем, что для многих методов созданы только опытные образцы оборудования, а большинство промышленных предприятий вынуждены самостоятельно изготавливать технологическое оборудование для собственных нужд или покупать за рубежом.

В последние годы как в нашей стране, так и за рубежом широко применяют высокопроизводительные методы обработки рабочих поверхностей деталей. Однако отечественного оборудования для обработки деталей этими методами очень мало. Широкое использование перспективной технологии сдерживает недостаточная изученность центробежных способов обработки.

Поэтому актуальными являются исследования по моделированию процессов центробежной обработки, созданию новых схем и конструктивных решений для реализации новых способов отделочно-упрочняющей и зачистной обработки в производственных условиях.

Методы объемной обработки

В машиностроительном производстве неуклонно снижается удельный вес обработки резанием со снятием большого объема металла в виде стружки, а широкое применение получают технологии отделочно-упрочняющей и зачистной обработки [1].

Наиболее простой является технология галтовочной обработки, при которой гидроабразивную среду и обрабатываемые детали загружают в цилиндрические или граненые барабаны и сообщают им вращение вокруг горизонтальной, вертикальной или наклонной оси, что приводит к относительному перемещению абразивного наполнителя и обрабатываемых поверхностей, происходит соударение и скольжение гранул шлифовального материала с деталями, а это приводит к их контактному взаимодействию и диспергированию металла. Контактное давление гранул наполнителя на поверхности деталей невелико, поэтому съем металла незначителен, а длительность галтовочных технологических операций составляет от нескольких часов до двух суток. Для повышения интенсивности обработки и качества поверхностей деталей в качестве технологической жидкости обычно используют мыльно-содовые водные растворы с антикоррозионными присадками и образователями пены ОП-7, ОП-10 и другими поверхностно-активными веществами.

Эту технологию применяют для деталей, изготовленных из стали, латуни, алюминия и его сплавов. Зона интенсивной обработки составляет незначительную часть объема загрузки в галтовочном барабане, что не позволяет обеспечить равномерный съем металла и стабильные характеристики качества обработанных поверхностей.

Более эффективной для обработки деталей сложной формы является вибрационная обработка, при которой детали и обрабатывающую среду за-

гружают в контейнер, упруго подвешенный на пружинах с возможностью колебаний в различных направлениях. Стенки контейнера передают энергию, полученную от вибратора и пружин, что приводит к последовательным нанесениям по поверхностям обрабатываемых деталей большого числа микроударов частицами рабочей среды при их взаимном соударении и скольжении. Широкие технологические возможности вибрационных установок и станков, возможность механизации и автоматизации цикла обработки способствовали широкому внедрению вибрационной технологии на многих промышленных предприятиях.

Основным недостатком, ограничивающим применение как галтовочной, так и вибрационной технологии, является недостаточная интенсивность воздействия рабочих тел на поверхности деталей, а следовательно и высокая длительность цикла обработки.

Сравнительно новым более производительным методом отделочно-зачистной обработки является центробежно-ротационная обработка [2], при которой рабочей загрузке, состоящей из шлифовального материала и деталей, сообщают вращение вокруг вертикальной оси таким образом, что уплотненная центробежными силами масса загрузки приобретает форму тора, причем рабочие тела и детали с высокой скоростью перемещаются по спиральным траекториям.

Перемещение деталей и шлифовального материала достигается вращением тарели ротора, размещенного в цилиндрическом или граненом неподвижном контейнере, которое приводит к перемещению деталей и шлифовального материала по касательной к стенкам контейнера. При этом скорость перемещения рабочих тел и обрабатываемых деталей вдоль стенки уменьшается до нуля, когда происходит уравнивание центробежных сил гравитационными силами, а уплотненная масса загрузки, поднимаясь по спиральным траекториям по стенке неподвижного контейнера, падает к центру ротора. После этого процесс движения рабочей загрузки повторяется, образуя сплошной тороидально-винтовой поток. Давление рабочих тел при частоте вращения ротора $150\text{--}400\text{ мин}^{-1}$ в 7–10 раз превышает контактное давление, возникающее при вибрационной обработке, а следовательно, существенно возрастает и интенсивность обработки. Процесс происходит при непрерывной подаче в контейнер технологической жидкости.

Обрабатываемые детали, как правило, загружают в контейнер навалом, но они могут закрепляться на шпинделях [3]; деталям со шпинделями сообщают планетарное вращение относительно стенок неподвижного контейнера, а обработку производят путем циклического погружения вращающихся деталей в тороидально-винтовой поток рабочей среды для создания одинаковых условий съема металла при абразивном резании или упрочнении металлическими шарами по длине детали и торцовых участках профиля обрабатываемых поверхностей. На повышение эффективности этой технологии направлены исследования по моделированию и управлению процессом обработки [4].

Технология центробежной обработки поверхностей деталей в контейнерах с планетарным вращением

Выполненный анализ известных методов объемной обработки деталей показал, что они имеют определенные области эффективного применения, но

их широкое внедрение на промышленных предприятиях ограничено присущими им недостатками.

Тенденцией развития технологии отделочно-упрочняющей и зачистной обработки является повышение контактного давления рабочих тел на обрабатываемые поверхности и скорости их относительного перемещения, эквивалентной скорости резания при шлифовании абразивными кругами или лезвийными инструментами.

В этом плане как более перспективную следует рассматривать технологию объемной обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности в контейнерах с планетарным вращением, которая основана на эффективном использовании инерционных, преимущественно центробежных, сил, возникающих при переносном вращении контейнеров вокруг центральной оси и относительного движения контейнеров вокруг собственных осей.

Нами установлено [5], что в зависимости от параметров планетарного вращения, грануляции шлифовального материала и условий обработки может обеспечиваться как обработка внутренних кольцевых поверхностей деталей (кольца подшипников качения, кольца прядильных и крутильных колец, втулки и гильзы со сложным профилем поверхности), так и объемная обработка деталей в скользящем на поверхности уплотненной загрузки слое шлифовального материала и деталей.

На рис. 1 приведена схема образования скользящего слоя в контейнере с планетарным вращением. При определенной степени уплотнения рабочие тела шлифовального материала будут переноситься со стенкой вращающегося контейнера и, достигнув границы уплотненной загрузки в точке В (угловое положение точки В определяется параметрами Ψ или φ), образуют на поверхности уплотненной загрузки поток шлифовального материала глубиной l . Высокая скорость движения рабочих тел в потоке шлифовального материала, называемого скользящим слоем, приводит к интенсивной объемной обработке поверхностей деталей, загруженных в контейнер вместе с обрабатывающей средой. Глубина скользящего слоя зависит от угловых скоростей вращения водила ω_1 и контейнера вокруг собственной оси ω_2 , диаметра контейнера D , расстояния L между осями водила O_1 и контейнера O , грануляции рабочих тел шлифовального материала, вязкости технологической жидкости и других факторов.

В скользящем слое происходит интенсивное взаимодействие деталей с рабочими телами, что приводит к всесторонней (объемной) обработке поверхностей деталей. По зарубежным данным [6], объемная центробежная обработка в контейнерах с планетарным вращением в 60–100 раз превышает производительность процесса в галтовочных барабанах и в 15–30 раз эффективнее вибрационной обработки, а в работе [7] подтверждено, что контактное давление шлифовального материала при центробежно-планетарной обработке в 20–25 раз больше, чем при вибрационной обработке, а соответственно выше и интенсивность съема металла.

Однако аналогично галтовочной, вибрационной и центробежно-ротационной обработке в контейнерах с планетарным вращением также формируются неодинаковые условия для контактного взаимодействия рабочих тел с обрабатываемыми поверхностями деталей в различных зонах контейнера, что связано с образованием внутри уплотненной массы рабочей загрузки

застойной зоны I (рис. 1), в которой относительное перемещение шлифовального материала и деталей, а следовательно, и обработка последних не происходит. Это приводит к нарушению стабильности показателей качества поверхностей в партии одновременно обрабатываемых в контейнере деталей. Поэтому необходимо проводить сплошной контроль, отделять бракованные детали и производить их повторную обработку или ручную дополировку, что существенно повышает трудоемкость отделочно-упрочняющих или зачистных операций.

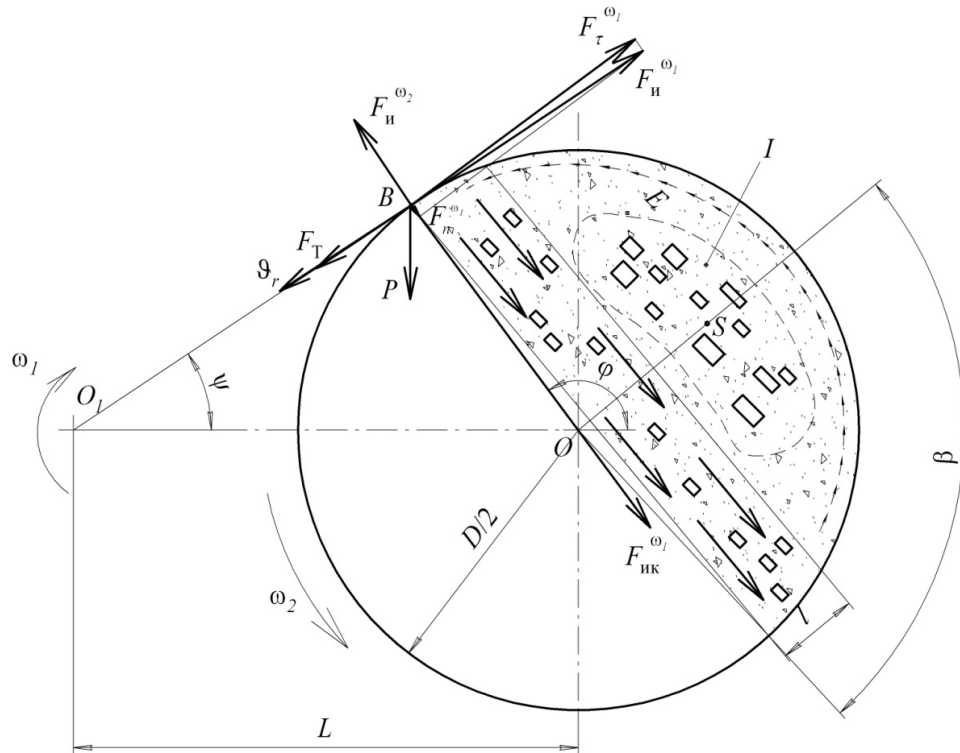


Рис. 1. Схема образования скользящего слоя в контейнере для центробежной объемной обработки

Для устранения описанного недостатка рассмотрим динамику процесса обработки. На произвольную гранулу шлифовального материала массой m в крайней точке уплотненного сегмента рабочей загрузки, прилегающей к стенке контейнера, действуют следующие силы: $F_T = N \cdot f$ – сила трения (N – нормальная реакция стенки контейнера; f – коэффициент трения гранулы о стенку контейнера); $F_u^{\omega_1} = m \cdot R \cdot \omega_1^2$ – центробежная сила инерции от переносного вращения контейнера со скоростью ω_1 ($R = O_1B$ – радиус); $F_u^{\omega_2} = m \cdot D / 2 \cdot \omega_2^2$ – центробежная сила от вращения контейнера вокруг собственной оси (D – внутренний диаметр контейнера); $F_{uk}^{\omega_1} = 2m \cdot v_r \cdot \omega_1$ – кориолисова сила инерции ($v_r = \omega \cdot D / 2$ – скорость движения гранулы со стенкой контейнера); $P = mg$ (g – ускорение свободного падения).

Переносное вращение контейнера со скоростью ω_1 уплотняет рабочую загрузку и прижимает ее к стенке контейнера. При вращении контейнера со скоростью ω_2 вокруг собственной оси рабочая загрузка перемещается со стенкой контейнера и смещается на угол φ от положения равновесия. Под действием нормальной составляющей центробежной силы $F_n^{\omega_1}$ и кориолисовой силы инерции $F_{uk}^{\omega_1}$ гранулы рабочей загрузки, достигнув границы уплотненного сегмента в точке В, скатываются по поверхности уплотненной загрузки, образуя движущийся с высокой скоростью поток шлифовального материала и обрабатываемых деталей глубиной l , в котором будет происходить всесторонняя обработка поверхностей деталей.

Исследование динамических характеристик рабочей загрузки, выполненное в работе [8], показало, что возможны различные режимы движения скользящего слоя:

- каскадный, при котором происходит плавное перемещение скользящего слоя по поверхности уплотненной загрузки без отрыва гранул от основной массы уплотненного сегмента шлифовального материала;
- каскадно-водопадный, когда вместе с плавным скольжением гранул шлифовального материала по поверхности уплотненного сегмента рабочей загрузки наблюдается полет части гранул скользящего слоя с отрывом от основной массы;
- водопадный режим движения, при котором происходит отрыв и переход в фазу полета всего объема скользящего слоя.

Режимы каскадно-водопадного и водопадного движения рабочей загрузки в скользящем слое следует использовать на черновых операциях зачистной обработки, так как во время полета в объеме контейнера происходит преимущественно ударное взаимодействие гранул шлифовального материала с поверхностями деталей, а это приводит к появлению глубоких рисок и кратеров на поверхности металла, а также возможно появление вмятин и забоин при соударении деталей.

Для отделочной обработки поверхностей деталей с формированием высоких качественных характеристик поверхностного слоя необходимо использовать каскадный режим движения рабочей загрузки, который характеризуется меньшим внедрением режущих элементов гранул в поверхность металла и ускоряет нивелирование исходной поверхности.

Установлено, что создание такого режима движения при заданной скорости ω_1 переносного вращения контейнера для известных конструктивных параметров центробежного устройства достигается при соблюдении условия

$$F_m = \frac{(\bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2)^2 \cdot D}{2\omega_1^2 L} \leq 0,16 - 0,17,$$

где F_m – модифицированное число Фруда; L – расстояние между осями воды и контейнера.

При меньших значениях F_m снижается производительность обработки вследствие уменьшения контактного давления рабочих тел на обрабатываемые поверхности и скорости движения деталей в скользящем слое. В то же время увеличение числа Фруда до величины, большей 0,17, сопровождается

переходом к каскадно-водопадному режиму движения скользящего слоя, что нежелательно для финишной обработки, так как приводит к снижению показателей качества поверхности.

Известно, что диапазон значений числа Фруда от 0 до 3 соответствует каскадному режиму движения загрузки в объеме контейнера. В то же время при $F_m = 0,3-0,65$ происходит переход к каскадно-водопадному режиму движения, а при $F_m = 0,65-1$ – к водопадному.

Следует учитывать, что переходу движения уплотненной рабочей загрузки от каскадного режима к каскадно-водопадному способствует снижение коэффициента внутреннего трения шлифовального материала или введение в состав технологической жидкости присадок со смазывающим эффектом. Поэтому при использовании в качестве рабочих тел фарфоровых или металлических полированных шаров рекомендуется несколько сужать диапазон значений F_m (уточнение диапазона производится экспериментальным путем.)

Кроме того, при назначении скоростей ω_1 и ω_2 планетарного движения контейнеров следует ограничивать максимально допустимую угловую скорость ω_2 вращения контейнера относительно водила соотношением:

$$\omega_{2\max} \leq \omega_1 \left(1 \pm \frac{1}{D} \sqrt{2DL} \right).$$

Знак «плюс» принимают при одностороннем, а знак «минус» при противоположном направлении вращения водила и контейнера. При несоблюдении этого условия прекращается процесс обработки, поскольку под действием силы инерции $F_u^{\omega_1}$ (см. рис. 1) рабочая загрузка распределяется по внутренней стенке контейнера с образованием концентричного кольца, вращающегося синхронно с контейнером, т.е. происходит так называемая самофутеровка. При этом относительное движение рабочих тел и поверхностей обрабатываемых деталей отсутствует. Это необходимо учитывать при регламентировании режимов обработки.

Размеры гранул шлифовального материала должны быть соизмеримы с конструктивными элементами поверхностей обрабатываемых деталей. Поэтому размеры и масса гранулированных рабочих тел будут невелики.

Чтобы компенсировать снижение производительности обработки, вызванное уменьшением грануляции рабочих тел, можно увеличить контактное давление, создавая более высокое уплотнение загрузки инерционными силами. Количественно степень уплотнения рабочей загрузки можно оценить напряженностью $H_{\text{и}}$ инерционного силового поля, которая представляет собой отношение центробежного ускорения к ускорению свободного падения:

$$H_{\text{и}} = \frac{\omega_1^2 \cdot R_{\text{в}}}{g},$$

где $R_{\text{в}} = L + 0,5D$ – радиус водила; g – ускорение свободного падения.

Обычно при объемной центробежной обработке напряженность поля ограничивают величиной $H_{\text{и}} \leq 25$. Для повышения эффективности обработки мелких и жестких деталей напряженность может быть увеличена до $H_{\text{и}} = 50$.

Принимая параметры $L = 200$ мм (из конструктивных соображений), с учетом допустимого значения напряженности H_n найдем частоту вращения водила:

$$n_1 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{50g}{L}}, \text{ мин}^{-1}.$$

При дальнейшем увеличении частоты вращения водила происходит сильное уплотнение рабочей загрузки и начинается проскальзывание рабочих тел относительно стенки контейнера, возрастает нагрев технологической жидкости, отмечается износ стенок контейнера, т.е. создаются условия для центробежной обработки внутренних поверхностей деталей типа колец или втулок.

Результаты экспериментальных исследований формирования шероховатости поверхности

Для проведения исследований была разработана установка, кинематическая схема которой приведена на рис. 2.

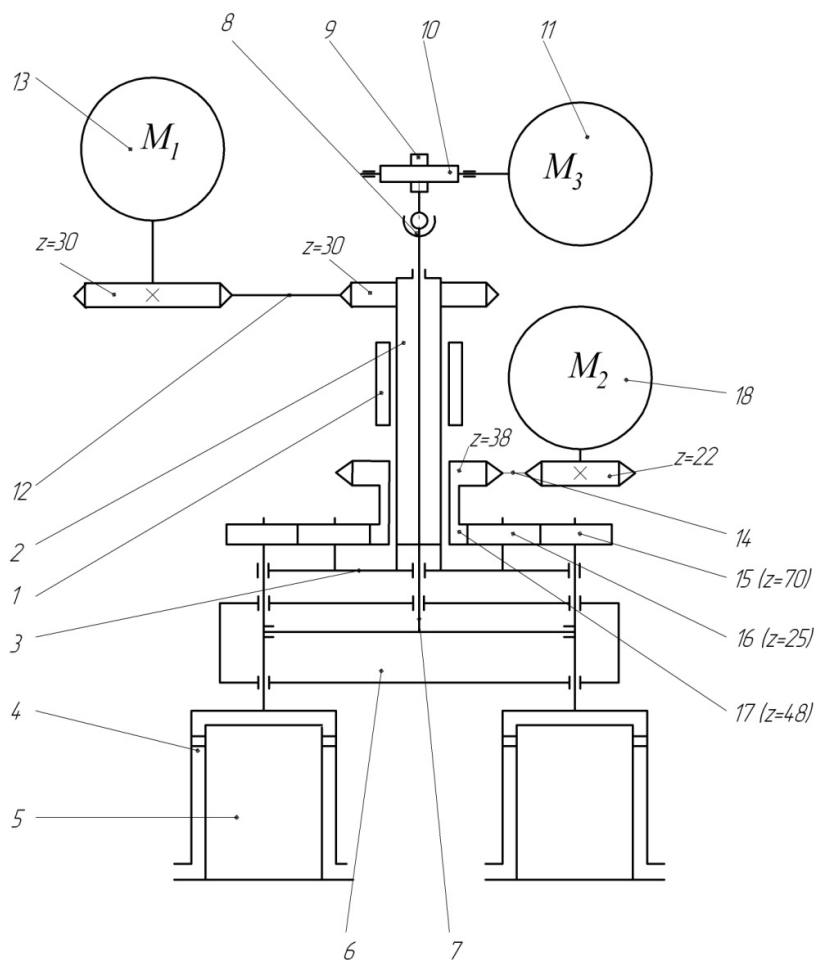


Рис. 2. Кинематическая схема установки для экспериментальных исследований

Установка состоит из основания 1, в опорах которого установлен шпиндель 2. На шпинделе жестко закреплен рычаг 3. В цилиндрические обоймы 4 устанавливают сменные контейнеры 5 с рабочей загрузкой. Обоймы смонтированы в опорах водила 6. В полости шпинделя 2 установлен шток 7, один конец которого закреплен на водиле 6. Второй конец штока соединен посредством шарнира 8 с механическим вибратором, состоящим из эксцентриковой втулки 9 и эксцентрикового вала 10, соединенного с валом двигателя 11.

Водило 6 соединено со шпинделем 2 шлицевой втулкой и кинематически связано цепной передачей 12 с двигателем 13. Для независимого вращения контейнеров вокруг собственных осей предусмотрен автономный привод, который состоит из цепной передачи 14, зубчатых колес 15, 16, 17 и двигателя 18. Все приводные двигатели 11, 13 и 18 являются регулируемые.

Обрабатываемые детали и шлифовальный материал загружают в съемные контейнеры 5 и заливают технологическую жидкость. Герметично закрывают контейнеры и устанавливают в обоймы 4. Включают сначала привод 13 вращения водила 6, а с выдержкой 4–5 с приводы 18 вращения контейнеров и 11 механического вибратора.

Для конструктивных параметров установки ($D = 200$ мм и $L = 200$ мм) напряженность инерционного силового поля составляла $H_{\text{и}} = 3,2\text{--}10$ при частоте вращения водила $n_1 = 120\text{--}200$ мин⁻¹. Исследования проводились на деталях арматуры водоразборных кранов, изготовленных из латуни ЛС59-1Д литьем под давлением.

Обработка проводилась формованными трехгранными призмами ПТ 15×15 на керамической связке. В качестве технологической жидкости использовалась техническая вода с добавками активных смачивателей (ОП-7) и технического мыла в концентрации 0,5–1 %.

Для построения математической модели поставлен полный факторный эксперимент 2⁴. В качестве переменных величин были приняты следующие технологические факторы: n_1 – частота вращения водила, мин⁻¹; k_3 – степень заполнения контейнера ($k_3 = v_3/v_k$, где v_3 – объем загрузки; v_k – объем контейнера); t – время обработки, мин⁻¹; η_3 – насыщенность рабочей загрузки ($\eta_3 = v_{\text{ш}}/v_d$, где $v_{\text{ш}}$ – объем, занимаемый шлифовальным материалом; v_d – объем, занимаемый обрабатываемыми деталями).

Производительность обработки оценивалась удельным массовым съемом металла (параметр оптимизации) q , мг/см².

Уравнение математической модели в натуральных переменных после проверки значимости коэффициентов имеет вид

$$\begin{aligned} q = & 21,0068 - 0,2349n_1 - 10,0043k_3 - 1,9270t + 18,8874\eta_3 - \\ & - 0,6691n_1k_3 + 0,0082n_1t + 45,4666k_3^2 + 0,0254t^2 - 7,0233\eta_3^2 + \\ & + 0,1696n_1\eta_3 + 0,8820k_3t - 23,4888k_3\eta_3 + 0,1341t\eta_3 + 0,0028n_1^2. \end{aligned}$$

Проверка адекватности модели по критерию Фишера F показала: расчетное значение $F_p = 0,6382$, табличное $F_T = 4,07$. Следовательно, модель адекватна.

Величина съема металла на интенсивных режимах составила $q = 50\text{--}60 \text{ мг/см}^2$, что свидетельствует о высокой эффективности обработки, необходимой для удаления дефектного поверхностного слоя металла (литье под давлением).

Шероховатость поверхности после обработки измерялась на профилометре-профилографе мод. 201 завода «Калибр» и профилометре «Сейтроник». Исследования показали, что после обработки абразивными гранулами в виде формованных призм шероховатость поверхности латунных деталей составила $R_a = 1,08\text{--}1,12 \text{ мкм}$. Для дальнейшего снижения шероховатости поверхности был использован второй переход с применением рабочих тел в виде стальных полированных шаров. При этом шероховатость снизилась до $R_a = 0,18\text{--}0,2 \text{ мкм}$.

Профилограммы исходной поверхности после первого и второго переходов центробежной обработки приведены на рис. 3.

Сравнение профилограмм исходной поверхности (рис. 3,*а*) и после обработки гранулами ПТ15×15 (рис. 3,*б*) показывает, что абразивные призмы полностью удаляют неровности исходной поверхности и формируется новая шероховатость, параметры которой определяются режущим контуром абразивных гранул. Дальнейшее снижение шероховатости без смены шлифовального материала невозможно. Использование в качестве рабочих тел на втором переходе металлических шаров позволило сформировать поверхность, выступы которой округлены и сглажены, что свидетельствует о пластическом деформировании и течении металла под динамическим воздействием стальных шаров (рис. 3,*в*).

В то же время на поверхности могут сохраниться следы отдельных глубоких царапин или кратеров, которые образовались на первом переходе после обработки призмами. Величина контактных давлений при обработке шарами не всегда позволяет устранить эти дефекты. Поэтому при разработке технологии многопереходной обработки необходимо учитывать влияние технологической наследственности.

При контактном взаимодействии рабочих тел с обрабатываемой поверхностью происходят упруго-пластические деформации, которые вызывают возникновение и движение дислокаций с концентрацией их около линий сдвигов. Увеличение плотности дислокаций сопровождается повышением микротвердости и снижением пластичности. Измерения микротвердости проводились на приборе ПМТ-5, а для определения ее изменения по глубине на образцах выполнялись косые срезы под углом $1\text{--}1,5^\circ$ с последующей доводкой поверхности среза на чугунном притире.

Результаты исследований показали, что упрочнение по сравнению с исходной поверхностью составляет после обработки стальными шарами 15–20 %, а глубина деформированного слоя достигает 0,3–0,35 мкм, что создает благоприятные предпосылки для повышения усталостной прочности.

Для создания одинаковых условий обработки и периодического устранения застойной зоны в объеме контейнера при центробежной обработке рекомендуется использовать низкочастотные осевые вибрации. Они позволяют повысить качество обработки труднодоступных участков профиля, но приводят к снижению на 15–20 % мощности, потребляемой приводом вращения контейнера вокруг собственной оси, что объясняется разрыхлением под действием осевых вибраций контейнера уплотненной загрузки, и уменьшению

контактного взаимодействия гранул с обрабатываемыми поверхностями, а следовательно, приводит к снижению производительности обработки. Поэтому область их эффективного применения следует ограничивать напряженностью инерционного силового поля величиной $H_{\text{и}} \leq 2g$.

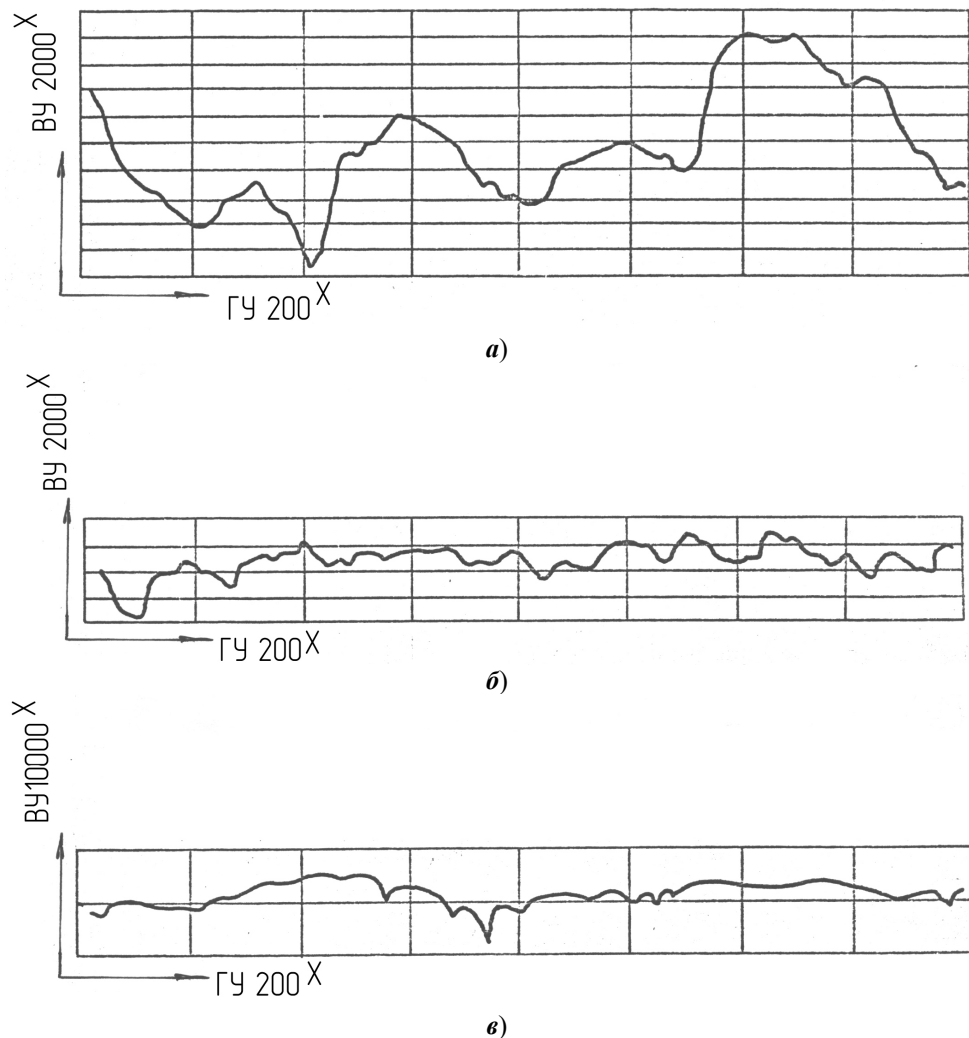


Рис. 3. Формирование микрорельефа поверхности при объемной обработке деталей:

- а** – исходная шероховатость (поверхность после литья под давлением $R_a=12,5-20$ мкм; ГУ и ВУ – горизонтальное и вертикальное увеличения по осям координат);
- б** – поверхность после обработки гранулами ПТ15×15 ($R_a=0,95$ мкм; $n_1=150$ мин⁻¹; $n_2=1,73 n_1$; $k_3=0,5...0,6$; $t=15$ мин);
- в** – поверхность после обработки металлическими шарами $\varnothing 4$ мм и $\varnothing 7,8$ мм в соотношении 1:1 по объему ($R_a=0,18$ мкм; $n_1=110$ мин⁻¹; $n_2=1,73 n_1$; $k_3=0,55$; $t=15$ мин)

Более эффективное влияние на повышение производительности и стабильности центробежно-планетарной объемной обработки деталей оказывает сообщение контейнерам радиальных осциллирующих движений [10] или сообщение водилу, несущему контейнеры с рабочей загрузкой, переносного

вращения в плоскости, перпендикулярной плоскости планетарного движения контейнеров [11].

Для повышения качества рабочих поверхностей деталей из цинковых сплавов нами предложена новая технология двухпереходной обработки [12], в которой предусмотрены новые составы обрабатывающей среды, состоящие из рабочих тел в виде фарфоровых шаров на первом переходе и смеси стальных и полимерных шаров на втором переходе, а также технологических жидкостей с различными активными присадками для обоих переходов обработки. Кроме того, получены расчетные соотношения для регламентирования режимов планетарного вращения и переносного вращения водила с контейнерами. Это позволило на деталях автомобильной фурнитуры (ручки наружные, корпуса замков и т.п.) из цинкового сплава ЦАМ4-1 и исходной шероховатостью $R_a = 0,8-0,4$ мкм (литье под давлением) обеспечить получение блестящей поверхности с шероховатостью $R_a = 0,08-0,06$ мкм, что удовлетворяет технически требованиям.

На рис. 4 приведен общий вид центробежно-планетарного станка для объемной обработки деталей.



Рис. 4. Общий вид центробежно-планетарного станка для объемной обработки деталей

Станок предназначен для обработки мелких и средних деталей сложной формы на технологических операциях шлифования, полирования, упрочнения, а также для подготовки поверхностей под гальванические покрытия и

скругления острых кромок. В разработанном станке предусмотрено бесступенчатое регулирование вращения водила как вокруг собственной оси, так и вокруг оси переносного движения для обработки деталей различной жесткости с использованием в качестве рабочих тел обрабатывающей среды как абразивных гранул, так и фарфоровых или металлических шаров.

Заключение

Показано, что технология центробежной обработки в контейнерах с планетарным вращением является достаточно универсальной и позволяет обрабатывать различные виды поверхностей деталей, преимущественно сложного профиля.

Выполненные исследования свидетельствуют о высокой эффективности новых способов центробежной обработки, которые по достигаемым качественным характеристикам можно отнести к технологиям финишной обработки. Важными технологическими преимуществами являются возможность снижения исходной шероховатости поверхностей при использовании двухпереходной обработки абразивными гранулами и стальными шарами с $R_a = 12,5\text{--}20$ мкм до $R_a = 0,18\text{--}0,2$ мкм, а при обработке деталей из цинковых сплавов с $R_a = 0,8\text{--}0,4$ мкм до $R_a = 0,08\text{--}0,06$ мкм и обеспечения упрочнения поверхностного слоя металла на 15–20 % на глубине до 0,3–0,35 мкм, что повышает усталостную прочность деталей.

При выборе способа центробежной обработки надо учитывать форму, размеры и материал деталей, требования к рабочим поверхностям, объем выпуска, наличие технологического оборудования, возможность его приобретения или разработки.

Список литературы

1. Кулаков Ю. М., Хрульков В. А. Отделочно-зачистная обработка деталей. М. : Машиностроение, 1979. 216 с.
2. Трилиский В. О., Бурштейн И. Е., Алферов В. И. Объемная центробежно-ротационная обработка деталей. М. : НИИмаш, 1983. 52 с.
3. Патент № 2755328 Российская Федерация В24В 31/00. Способ и устройство для центробежно-шпиндельной обработки поверхностей изделий / Зверовщиков В. З., Липов А. В., Павловский П. Г., Нестеров С. А., Зверовщиков А. В. Оpubл. 15.09.2021, БИ № 26.
4. Тамаркин М. А., Виноградов Д. В., Тищенко Э. Э., Гаврилов Д. И. Технологические особенности процесса центробежно-ротационной обработки. Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Шлифабразив-2001». Волжский : ВолжскИСИ, филиал ВолгГАСА, 2001. С. 162–165.
5. Мартынов А. Н., Зверовщиков В. З. Особенности динамики процесса финишной обработки деталей в центробежно-планетарных установках // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента : Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 10. Пенза : Пен. политехн. ин-т, 1981. С. 68–74.
6. Patented № 3513604, U.S.Cl. Masahisa Matsunaga Hisamine Kobayashi. High Speed Surface Finishing Method. United States Patent Office 51-313, Int.Cl. B24B 1/100, May 26, 1970.
7. Степашкин С. М., Калашников С. Н., Левчук Д. М. [и др.]. Прогрессивные технологические процессы в автостроении. Механическая обработка, сборка / под ред. С. М. Степашкина. М. : Машиностроение, 1980. 320 с.

8. Сячин Е. Т. Конструкторско-технологическое обеспечение рациональных условий обработки деталей приборостроения в планетарных барабанах // Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин и приборов : тез. докл. науч.-техн. конф. Ростов н/Д, 1988. С. 151.
9. Зверовщиков В. З., Зверовщиков А. Е. О влиянии низкочастотных вибраций на эффективность объемной центробежной обработки деталей // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента : межвуз. сб. науч. тр. Вып. 17. Пенза : Пенз. политехн. ин-т, 1989. С. 62–64.
10. Патент 2401730 Российская Федерация. В24В 31/04. Способ центробежной абразивной обработки деталей / Зверовщиков В. З., Зверовщиков А. Е., Нестеров С. А., Зотов Е. В., Юртаева Е. В. Опубл. 20.10.2010, БИ № 29.
11. Авторское свидетельство № 1627382 (СССР), МКИ В24В 31/104 Способ обработки деталей и устройство для его осуществления / Мартынов А. Н., Зверовщиков В. З., Зверовщиков А. Е., Манько А. Т. Опубл. 15.02.1991, БИ № 6.
12. Патент 2261789 Российская Федерация. В24В 1/00, 31/104. Способ обработки деталей из цинка и цинковых сплавов / Зверовщиков В. З., Нестеров С. А., Зверовщиков А. В., Ставицкий В. Н. Опубл. 10.10.2005, БИ № 28.

References

1. Kulakov Yu.M., Khrul'kov V.A. *Otdelochno-zachistnaya obrabotka detaley = Finishing and cleaning parts*. Moscow: Mashinostroenie, 1979:216. (In Russ.)
2. Trilisskiy V.O., Burshteyn I.E., Alferov V.I. *Ob"emnaya tsentrobezhno-rotatsionnaya obrabotka detaley = Volumetric centrifugal-rotary machining of parts*. Moscow: NII-mash, 1983:52. (In Russ.)
3. Patent № 2755328 Russian Federation V24V 31/00. Method and device for centrifugal-spindle surface treatment of products. Zverovshchikov V.Z., Lipov A.V., Pavlovskiy P.G., Nesterov S.A., Zverovshchikov A.V.; publ. 15.09.2021, bull. № 26. (In Russ.)
4. Tamarkin M.A., Vinogradov D.V., Tishchenko E.E., Gavrilov D.I. *Tekhnologicheskie osobennosti protsessy tsentrobezhno-rotatsionnoy obrabotki Protssesy abrazivnoy obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlifabraziv-2001» = Technological features of the centrifugal rotary machining process abrasive machining processes, abrasive tools and materials: proceedings of the International scientific and engineering conference “Shlifabraziv-2001”*. Volzhskiy: VolzhskISI, filial VolgGASA, 2001:162–165. (In Russ.)
5. Martynov A.N., Zverovshchikov V.Z. Features of the dynamics of the process of finishing parts in centrifugal planetary installations. *Almaznaya i abrazivnaya obrabotka detaley mashin i instrumenta: mezhvuz. sb. nauch. tr. Vyp. 10 = Diamond and abrasive processing of machine parts and tools: collected papers. Issue 10*. Penza: Pen. politekhn. in-t, 1981:68–74. (In Russ.)
6. Patented № 3513604, U.S.Cl. Masahisa Matsunaga Hisamine Kobayashi. *High Speed Surface Finishing Method*. United States Patent Office 51-313, Jnt.Cl. B24B 1/100, May 26, 1970.
7. Stepashkin S.M., Kalashnikov S.N., Levchuk D.M. [et al.]. *Progressivnye tekhnologicheskie protsessy v avtostroenii. Mekhanicheskaya obrabotka, sborka = Progressive technological processes in the automotive industry. Mechanical processing, assembly*. Moscow: Mashinostroenie, 1980:320. (In Russ.)
8. Syachin E.T. Design and technological support of rational conditions for processing parts of instrumentation in planetary drums. *Intensifikatsiya i avtomatizatsiya otdelochno-zachistnoy obrabotki detaley mashin i priborov: tez. dokl. nauch.-tekhn. konf. = Intensification and automation of finishing and cleaning of parts of machines and devices: collected articles of scientific and engineering conference*. Rostov-on-Don, 1988:151. (In Russ.)

9. Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikov A.E. On the influence of low-frequency vibrations on the efficiency of volumetric centrifugal machining of parts. *Almaznaya i abrazivnaya obrabotka detaley mashin i instrumenta: mezhvuz. sb. nauch. tr. Vyp. 17 = Diamond and abrasive processing of machine parts and tools: collected papers. Issue 17*. Penza: Penz. politekhn. in-t, 1989:62–64. (In Russ.)
10. Patent 2401730 Russian Federation. V24V 31/04. The method of centrifugal abrasive processing of parts. Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A., Zotov E.V., Yurtaeva E.V.; publ. 20.10.2010, bull. № 29. (In Russ.)
11. Author's certificate No. 1627382 (SSSR), MKI V24V 31/104 Method for processing parts and device for its implementation. Martynov A.N., Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikov A.E., Man'ko A.T.; publ. 15.02.1991, bull. № 6. (In Russ.)
12. Patent 2261789 Russian Federation. V24V 1/00, 31/104. Method for processing parts made of zinc and zinc alloys. Zverovshchikov V.Z., Nesterov S.A., Zverovshchikov A.V., Stavitskiy V.N.; publ. 10.10.2005, bull. № 28. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Зиновьевич Зверовщиков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: wzzwer@mail.ru

Vladimir Z. Zverovshchikov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Сергей Александрович Нестеров

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nesterovs@list.ru

Sergey A. Nesterov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of technologies
and equipment of mechanical engineering,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Анатолий Владимирович Зверовщиков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: avz.docent@gmail.com

Anatoliy V. Zverovshchikov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of technologies
and equipment of mechanical engineering,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Александр Евгеньевич Зверовщиков

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Aleksandr E. Zverovshchikov

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Артём Вячеславович Стешкин

инженер-исследователь научной
лаборатории «Технологии, материалы,
процессы и оборудование
машиностроения», Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tmspgu@mail.ru

Artem V. Steshkin

Research engineer of the scientific
laboratory “Technologies, materials,
processes and equipment of mechanical
engineering”, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 20.04.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 14.05.2022

Принята к публикации / Accepted 25.05.2022