

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-22-30



УДК 621.7.09

UDC 621.7.09

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

УДАЛЕНИЕ ЗАУСЕНЦЕВ И СКРУГЛЕНИЕ ОСТРЫХ КРОМОК ВИБРАЦИОННОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ БРОНЗЫ

✉¹ **Прокопец Галина Анатольевна**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-На-Дону, e-mail: galinepr@mail.ru

Мельникова Елена Павловна, д.т.н., заведующая кафедрой «Менеджмент организаций», Автомобильно-дорожный институт (филиал) ФГБОУ ВО Донецкого национального технического университета, г. Горловка.

Прокопец Анатолий Александрович, ведущий инженер кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-На-Дону.

Аннотация. Образующиеся в процессе лезвийной обработки деталей заусенцы и острые кромки должны быть удалены. Одним из эффективных методов их удаления является вибрационная абразивная обработка. Представленные результаты исследований объясняют механизм удаления заусенцев и скругления кромок деталей при данной обработке и могут быть использованы при проектировании соответствующей оптимальной технологической операции для ответственных деталей средних размеров из бронзы. Приведены результаты исследований по выбору обрабатывающих сред, режима обработки. На основе результатов проведенных экспериментов получены графические зависимости и проведен их анализ, сделаны выводы, приведены практические рекомендации.

DEBURRING AND ROUNDING OF SHARP EDGES BY VIBRATION ABRASIVE TREATMENT ON BRONZE PARTS

✉¹ **Prokopets Galina Anatolevna**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of Mechanical engineering technology, Don state technical university, Rostov-On-Don, e-mail: galinepr@mail.ru

Melnikova Elena Pavlovna, doctor of technical sciences, head of the department Management of organizations, Automobile and road institute (branch) of the Donetsk national technical university, Gorlovka.

Prokopets Anatoly Alexandrovich, leading engineer of the department of Mechanical Engineering technology, Don state technical university, Rostov-On-Don.

Annotation. The burrs and sharp edges formed during the blade processing of parts must be removed. One of the effective methods of their removal is vibration abrasive treatment. The presented research results explain the mechanism for removing burrs and rounding the edges of parts during this processing and can be used in designing the corresponding optimal technological operation for critical medium-sized bronze parts. The results of research on the choice of processing media and processing mode are presented. Based on the results of the experiments, graphical dependencies were constructed and analyzed, conclusions were drawn, and practical recommendations were given.

Ключевые слова: КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ, ЗАУСЕНЕЦ, ОСТРАЯ КРОМКА, ВИБРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА, ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ СРЕДА, РЕЖИМ ОБРАБОТКИ, ОПТИМИЗАЦИЯ.

Keywords: SURFACE QUALITY, BURR, SHARP EDGE, VIBRATION-ABRASIVE TREATMENT, PROCESSING MEDIUM, PROCESSING MODE, OPTIMIZATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В современном машиностроении широко распространены методы лезвийной обработки. При обработке многих материалов в результате лезвийной обработки на кромках деталей образуются заусенцы, формируются острые кромки. Обломившийся заусенец может привести к выходу из строя изделия или повышенному износу ответственных поверхностей. Острые кромки могут поранить руки оператора, могут выкрашиваться и загрязнять обрабатывающую среду и т.д. Именно поэтому на чертежах многих деталей в машиностроении конструктор указывает техническое требование по скруглению острых кромок и удалению заусенцев.

Существует достаточно много методов удаления заусенцев и скругления острых кромок: обработка металлорежущим инструментом в конце операции формообразования, электрохимическая обработка, обработка абразивным инструментом, в том числе и на слесарных операциях и др. Одним из эффективных методов удаления заусенцев и скругления острых кромок является обработка свободным абразивом, в частности, вибрационная абразивная обработка [1-4].

Преимуществами этого метода обработки являются безразмерность (формообразующие размеры детали при обработке в течение времени, необходимого для удаления заусенцев и скругления острых кромок, практически не изменяются), равномерность обработки поверхностей, возможность одновременной обработки деталей различной формы, близких по своим геометрическим и размерным характеристикам, а также физико-механическим свойствам материала, одинаковость параметров шероховатости по всем направлениям (стохастичность микрорельефа) и др.

На рис. 1 представлена 3D-модель четырехкамерной вибрационной установки для виброабразивной обработки (на схеме условно не показана система промывки технологической жидкостью и двигатель с гибкой муфтой). Рабочие камеры заполняются обрабатывающей средой требуемых характеристик на 70-75 % объема. Обрабатывающая среда при виброабразивной обработке в обязательном случае включает массив абразивных частиц, а также может включать технологическую жидкость и другие элементы, обусловленные целью обработки. Однако иногда обработка может осуществляться и «всухую» без промывки. Режимы обработки устанавливаются за счет изменения угла между дебалансными грузами вибратора (определяющими амплитуду A колебаний рабочей камеры, мм) и за счет изменения числа оборотов вала вибратора (определяющего частоту колебаний f рабочей камеры, Гц). В зависимости от типа (серийности) производства возможны различные схемы обработки. На установку могут устанавливаться от одной до четырех рабочих камер, которые заполняются обрабатывающими средами различных или идентичных характеристик. В одну рабочую камеру допускается при одинаковой цели обработки загружать различные детали (с соблюдением допустимого разброса геометрических, в том числе, микрогеометрических характеристик деталей и физико-механических свойств деталей). Возможны: поэтапная обработка с изменением режимов обработки при прочих равных условиях; обработка деталей в закрепленном состоянии; обработка в состоянии свободной загрузки в обрабатывающую среду и др. С одной стороны, эти факторы обеспечивают высокую гибкость технологии, а с другой, усложняют оптимизацию процесса, особенно по трудоемкости, и требуют учета значительного числа ограничений.

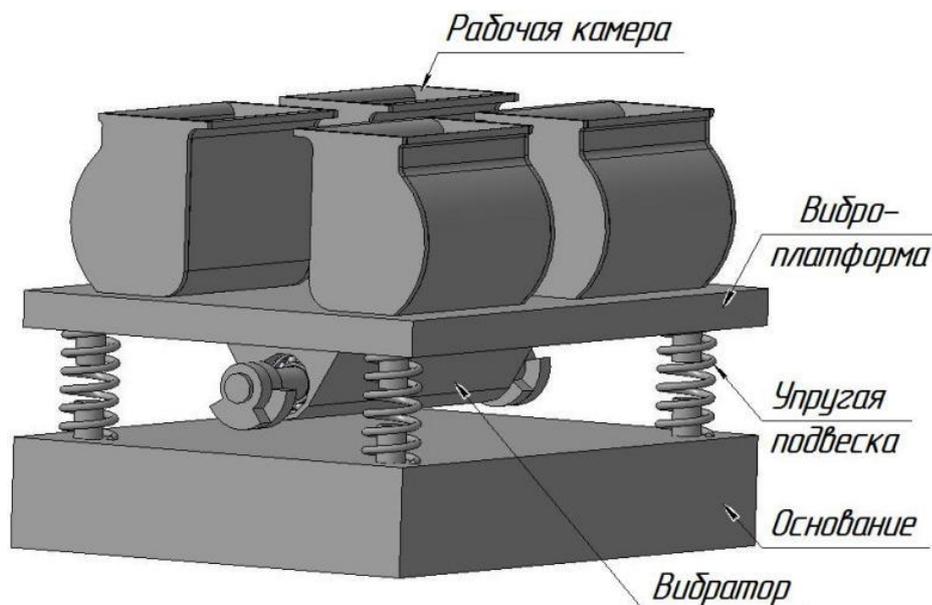


Рисунок 1 – Установка для виброабразивной обработки (система промывки и двигатель условно не показаны)

Удаление заусенцев и скругление кромок на деталях в процессе виброабразивной обработки обеспечивается за счет псевдотекучести обрабатывающей абразивной среды, а также за счет ее интенсивного перемешивания под действием направленных вибраций [5-7]. Нормальные соударения частиц обрабатывающей среды с поверхностью обрабатываемой детали при вибрационной обработке составляют малую часть соударений. Основная часть соударений идет под тупым углом к обрабатываемой поверхности, поэтому обрабатывающая среда огибает поверхность обрабатываемой детали, как бы «перетекает» по поверхности. При этом частицы обрабатывающей среды встречают наибольшее сопротивление движению на заусенцах, а также на выступях и кромках детали, что и создает условия для более интенсивной обработки указанных элементов поверхности. Повышение интенсивности обработки в области расположения на детали заусенцев и острых кромок обусловлено также уменьшением площади контакта взаимодействующих элементов и, как следствие, увеличением удельного давления в контакте частицы обрабатывающей среды и обрабатываемой поверхности и, соответственно, увеличением глубины внедрения частиц обрабатывающей среды в материал обрабатываемой детали.

Механизм удаления заусенцев в зависимости от физико-механических характеристик материала обрабатываемых деталей несколько различается. При обработке сравнительно хрупких материалов с грубыми заусенцами на первом этапе обламываются большие гребешки, а затем остатки удаляются срезанием мельчайших частиц металла. При обработке пластичных материалов, как правило, на первом этапе грубые заусенцы загибаются и значительно реже обламываются. В дальнейшем происходит их последовательное срезание небольшими объемами абразивными частицами обрабатывающей среды. В соответствии с этим и должен производиться выбор вида, размеров и зернистости абразивных частиц обрабатывающей среды, должны определяться режимы обработки, необходимость закрепления деталей и т.д.

В связи со значительной сложностью процессов, имеющих место при протекании процесса виброабразивной обработки, четкое прогнозирование ее результатов и однозначный расчет режима обработки затруднены. Поэтому требуются экспериментальные исследования для уточнения параметров обработки и выработки технологических инструкций для обработки заготовок с учетом материала деталей, исходной шероховатости и ограничений.

2 Материалы и методы

Основная задача исследований: определение основных особенностей удаления заусенцев и скругления острых кромок на ответственных деталях средних размеров из бронзы, выявление наиболее подходящих обрабатывающих сред и режимов обработки.

При постановке задачи по удалению заусенцев и скруглению острых кромок на деталях из бронзы, с учетом привязки к группе конкретных деталей, необходимо учитывать следующие основные особенности и ограничения:

- операция удаления заусенцев и скругления острых кромок – финишная, то есть все остальные геометрические, микрогеометрические и размерные характеристики готовой детали обеспечены предшествующими операциями;
- предельные отклонения размеров деталей, входящих в группу, соответствуют 7-8 квалитету точности, то есть съем материала с поверхности детали не должен приводить к выходу наиболее точных размеров детали за пределы допуска;
- минимальная шероховатость поверхностей деталей группы, равная Ra 0,63 мкм, достигается на предыдущих операциях;
- на ряде поверхностей деталей, работающих в условиях трения скольжения, не допускается шаржирование;
- радиус скругления кромок – не более 0,1 мм.

Таким образом, основной задачей вибрационной обработки деталей группы является удаление заусенцев с последующим скруглением острых кромок до радиуса 0,01 ... 0,1 мм на кромках детали за оптимальное время обработки с сохранением ранее достигнутого качества ответственных поверхностей и размерной точности детали. Это связано с тем, что наряду с процессом удаления заусенцев и скругления кромок происходит обработка всех остальных поверхностей, контактирующих с частицами обрабатывающей среды. Жесткие требования к шероховатости и точности размеров ответственных поверхностей требуют обеспечения в процессе обработки осуществления контроля на отсутствие выхода их параметров за пределы допуска.

Учитывая вышеуказанные особенности решения задачи, а также физико-механические характеристики материала деталей группы можно предварительно определить вид обрабатывающей среды. Используемые для экспериментов обрабатывающие среды были предварительно отобраны на основе результатов предварительных исследований [8-10]. Для исключения в соответствии с техническими требованиями возможности шаржирования поверхности обрабатываемых деталей при выкрашивании абразивных зерен, имеющих более высокую механическую прочность, чем связующий материал, а также исходя из требований максимально высокой стойкости частиц обрабатывающих сред для исследований было выбрано два вида обрабатывающей среды различной грануляции:

- «Байкалит» зеленый, грануляция 25...30 мм и 5...10 мм;
- формованный электротехнический фарфор, шары > 14 мм и >6 мм.

Грануляция определялась исходя из геометрической формы детали-представителя, которая имеет отверстие диаметром 18 мм (минимальный размер отверстия в деталях группы). Поэтому ее выбор осуществлялся с таким расчетом, чтобы не было заклинивания частиц обрабатывающей среды в отверстии. Технологическая жидкость – трехпроцентный раствор кальцинированной соды, эффективность которого была подтверждена ранее экспериментально [8, 9].

Для проведения экспериментальных исследований использовалась четырехкамерная вибрационная установка модели УВГ 4х10 (четыре камеры по 10 л). Рабочая камера заполнялась обрабатывающей средой, предварительно обгалтованной в течение 60 мин с промывкой трехпроцентным раствором кальцинированной соды. Объем загрузки – 75...85 % объема рабочей камеры. Режим работы виброустановки: амплитуда колебаний рабочей камеры – $A = 2,0$ мм; частота колебаний – $f = 24$ Гц.

В качестве образцов использовались типовые детали, сформированные из основных элементов, собранных в группу и предполагаемых для обработки по единой технологии деталей (рис. 2). Материал образцов – бронза, масса – 0,15 кг. Габаритные размеры образцов $\text{Ø}39 \times 22,5$ мм. Образцы предварительно обрабатывались по той же технологии, что и детали группы до этапа, на котором требовалось удаление заусенцев и скругление острых кромок. При этом различные поверхности имели различную шероховатость. Наиболее ответственные из них (торцы) предварительно обрабатывались с шероховатостью Ra 0,63, что требовало дополнительного контроля шероховатости этих поверхностей после обработки. Также в образцах имелось отверстие диаметром 18 мм, на входе и выходе которого также должны были быть удалены заусенцы и скруглены кромки. В каждом эксперименте обрабатывались по пять образцов.



Радиус в основании выступа образован за счет геометрии металлорежущего инструмента

Рисунок 2 – Внешний вид образцов с верхней и нижней частью

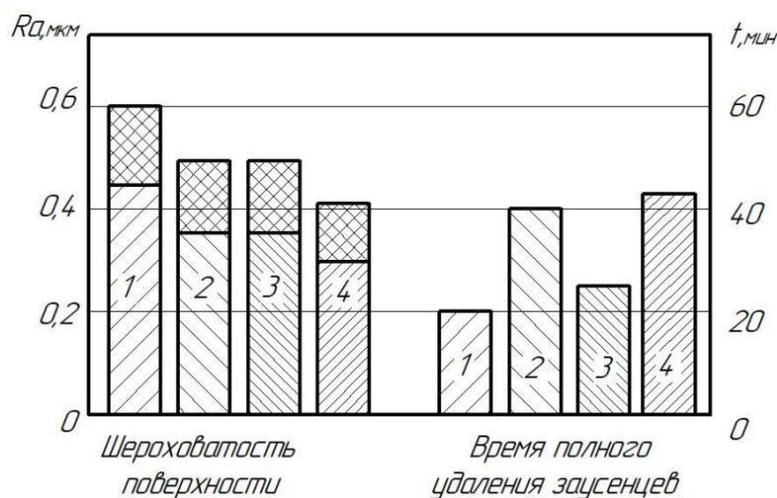
В процессе экспериментальных исследований контролировались отклонения наиболее точных линейных размеров (на образце это высота $22h8$ и диаметр $40h7$) и шероховатость наиболее чисто обработанных поверхностей – Ra 0,63 мкм. Шероховатость поверхности образцов измерялась на профилографе-профилометре в исходном состоянии и после полного удаления заусенцев. Степень удаления заусенцев определялась на микроскопе стереоскопическом МБС-2. Контроль удаления заусенцев производился через каждые 5 минут обработки с помощью микроскопа. Измерения линейных размеров производились на вертикальном оптиметре. Величина радиуса скругления кромки определялась с помощью двойного микроскопа акад. Линника МИС-11.

3 Результаты исследований

На основе результатов проведенных экспериментов были построены графические зависимости и проведен их анализ. На рис. 3 представлены результаты определения времени обработки, необходимого для полного удаления заусенцев при условии не превышения допустимого согласно техническому требованию радиуса скругления кромок 0,1 мм для четырех вариантов обрабатывающих сред. Также на рис. 3 представлена величина шероховатости на ответственных поверхностях (торцах образцов, предварительно обработанных с шероховатостью Ra 0,63), полученная за время обработки, необходимое для полного удаления заусенцев.

Все обрабатывающие среды обеспечивают после обработки шероховатость в пределах, заданных конструктором, то есть с этой точки все обрабатывающие среды пригодны для обработки. Минимальное время, необходимое для удаления заусенцев по контуру образцов было отмечено при обработке в «Байкалите» грануляцией 25...30 мм и фарфоровых шарах $\text{Ø}14$ мм. Однако, при обработке в «Байкалите» при визуальном контроле с помощью микроскопа на поверхностях образцов имеются забоины, и при обработке в указанных двух обрабатывающих средах заусенцы в канавках и в отверстиях $\text{Ø}18$ практически остались без изменений. Следовательно, данные обрабатывающие среды для обработки непригодны.

При обработке в «Байкалите» грануляцией 5...10 мм и фарфоровых шарах $\varnothing 6$ мм заусенцы в канавках и отверстиях были удалены практически полностью. При этом величина шероховатости поверхности после обработки в испытуемых средах соответствует требованиям чертежа, но равномерность обработки лучшая при использовании в качестве мелкогранулированной обрабатывающей среды шаров фарфоровых. При этом при обработке в «Байкалите» грануляцией 5...10 мм имеет место заклинивание двух и более частиц обрабатывающей среды в отверстиях образцов. Этому недостатка лишена обработка фарфоровыми шарами.

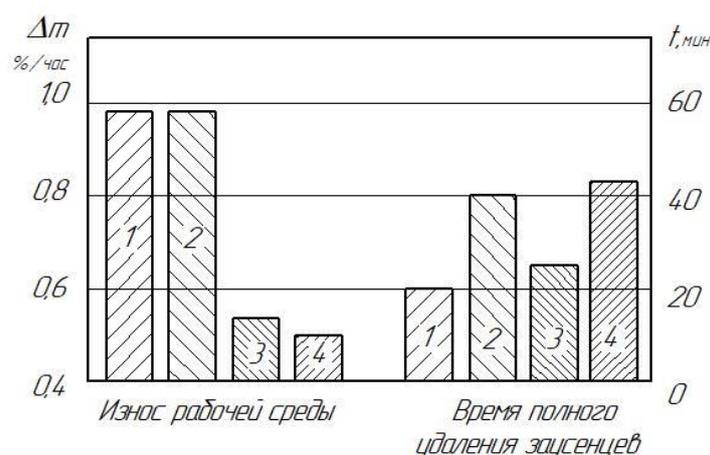


1, 2 – «Байкалит» зеленый, грануляция 25...30 мм и 5...10 мм соответственно,
3, 4 – формованный электротехнический фарфор, шары $\varnothing 14$ мм и $\varnothing 6$ мм соответственно

Рисунок 3 – Зависимость времени обработки до полного удаления заусенцев и шероховатости наиболее ответственных поверхностей детали от обрабатывающей среды

Также при определении оптимального вида обрабатывающей среды имеет большое значение ее надежность [11-14], которая, в частности, может оцениваться ее износом [15]. На рис. 4 представлена зависимость износа обрабатывающих сред от вида среды за время полного удаления заусенцев. Анализ данной зависимости показывает, что обрабатывающие среды имеют различную стойкость. Поэтому учитывая более высокую износостойкость шаров фарфоровых, а также результаты ранее приведенного анализа, целесообразно рекомендовать их в качестве обрабатывающей среды при обработке деталей из бронзы.

В целях изучения возможности сокращения трудоемкости обработки при использовании фарфоровых шаров $\varnothing 14$ мм были проведены испытания по обработке образцов в среде, состоящей из смеси шаров $\varnothing 14$ и $\varnothing 6$ мм в равной пропорции по объему. В результате использования такой обрабатывающей среды при сохранении ранее достигнутого качества поверхности детали время обработки сократилось до 35 мин. Обработка производилась при следующем режиме работы виброустановки: амплитуда колебаний рабочей камеры – $A = 1$ мм; частота колебаний – $f = 35$ Гц; непрерывная промывка загрузки трехпроцентным содовым раствором [16]. При этих условиях полностью удаляются заусенцы, средняя величина радиуса округления кромки 0,08 мм (максимальный радиус не превышает 0,1 мм), изменение линейных размеров составляет менее 0,1 допуска на изготовление детали, при этом изменений в размере отверстия не отмечено.



1, 2 – «Байкалит» зеленый, грануляция 25...30 мм и 5...10 мм соответственно,
3, 4 – формованный электротехнический фарфор, шары $\varnothing 14$ мм и $\varnothing 6$ мм соответственно

Рисунок 4 – Зависимость износа обрабатывающих сред от вида среды за время полного удаления заусенцев

4 Обсуждение и заключение

На основании результатов исследований можно сделать следующие выводы и сформулировать рекомендации:

1) Операция удаления заусенцев и скругления кромок на деталях из бронзы может выполняться методом виброабразивной обработки.

2) Оптимальные результаты операции по удалению заусенцев и скругления острых кромок на деталях из бронзы небольших размеров с отверстиями диаметром не менее 18 мм, имеющих поверхности с жесткими требованиями к качеству ответственных поверхностей могут быть получены при использовании шаров из электротехнического фарфора. Рекомендуемые размеры шаров – $\varnothing 6$ и $\varnothing 14$ мм в равной пропорции. Износ такой обрабатывающей среды около 0,5 % / час.

3) Для предотвращения повреждения ответственных поверхностей деталей от соударения их друг с другом рекомендуется использовать минимальную амплитуду, обеспечивающую циркуляционное перемещение загрузки $A = 1$ мм при частоте колебаний $f = 35$ Гц. Для практической реализации обработки рекомендуемая степень загрузки рабочей камеры составляет 75 ... 80 % ее объема. Рекомендуемая интенсивность промывки – 0,05...0,08 $\text{дм}^3/\text{мин}$ на 1 дм^3 объема рабочей камеры. При указанном режиме виброабразивная обработка может считаться безразмерной.

Список литературы

1 Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э. Современное состояние и перспективы развития методов обработки в гранулированных рабочих средах // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. – № 9 (111). – С. 12–20.

2 Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии. – Ростов н/Д, 1999. – 620 с.

3 РТМ 23.4.47-73 Объемная вибрационная обработка деталей машин на операциях очистки, удаления заусенцев и шлифования. — Ростов н/Д: НИИТМ, 1973. – 100 с.

4 Бабичев, А. П. и др. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок): под ред. Бабичева А. П. – Ростов н/Д: издательский центр ДГТУ, 2010. – 287 с.

- 5 Шевцов, С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах: Ростов н/Д, изд. СКНЦ ВШ, 2001. – 193 с.
- 6 Babichev A.P. Mechanics of the micro cutting by abrasive particle at vibroabrasive processing. *Key Engineering Materials*. 2005. – Т. 291-292. С. – 309-314.
- 7 Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Рожненко О. А. Удаление металла при абразивной обработке сложных поверхностей / Российские инженерные исследования. – 2013. – Т. 33. – № 5. – С. 302-305.
- 8 Мельникова Е. П., Прокопец Г. А. Влияние концентрации абразивного наполнителя гранул на интенсивность процесса вибрационной обработки. // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий»: сб. тр. науч. семинара. (г. Ростов-на-Дону, 28 февраля 2020 г.). Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. – 124-135.
- 9 Ю. П. Анкудимов, А. П. Шипиль, М. Е. Свинтицкий. Исследование работоспособности естественных абразивных материалов типа «Байкалит» при вибрационной обработке. В сб. статей «Отделочно-упрочняющая механическая обработка, качество поверхности и эксплуатационные свойства». Ростов-на-Дону, РИО РИСХМ, 1978. С. 115-129.
- 10 Прокопец, А. А. Влияние наладки технологической системы на надежность технологического процесса вибрационной обработки. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2009. – № 89-1. – С. 105-109.
- 11 Прокопец Г. А., Прокопец А. А. Система показателей оценки надежности технологического процесса вибрационной обработки деталей. Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. - № 8. – С. 5-9.
- 12 Г.А. Прокопец и др. Анализ надежности инструмента при вибрационной обработке. В сб.: *Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий: сборник трудов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей / под редакцией В.А. Лебедева; Донской государственный технический университет. – Текст: электронный. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2022. – С. 249-253*
- 13 Tamarkin M.A. The Optimization of Technological Processes of Details Processing by Free Abrasives. *International Symposium "Advances in Abrasive Technology-YIII" ISAAT2005. International Symposium "Progress in abrasive technology - YIII" ISAAT2005, St. Petersburg, 2005.*
- 14 Tamarkin M.A. The optimization of technological processes of details processing by free abrasives. *Key Engineering Materials*. 2005. Т. 291-292. С. 319-322.
- 15 Прокопец, А. А. Анализ механизмов износа рабочей среды при виброабразивной обработке. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2010. – Т. 10. – № 1 (44). – С. 64-69
- 16 Тамаркин М. А., Прокопец А.А., Прокопец Г.А. Обеспечение стабильности процесса вибрационной обработки путем управления амплитудой колебаний рабочей камеры. *Ж.: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. – № 2-3. – С. 61-67.

References

- 1 Tamarkin M. A., Tishchenko E. E. Current state and prospects for the development of processing methods in granular working media // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2020. – No. 9 (111). – P. 12–20.
- 2 Babichev, A. P. *Fundamentals of vibration technology*. – Rostov n/d, 1999. – 620 p.
- 3 RTM 23.4.47-73 *Volumetric vibration processing of machine parts during cleaning, deburring and grinding operations*. - Rostov n/d: НИИТМ, 1973. – 100 p.
- 4 Babichev, A. P. et al. *Application of vibration technologies in the operations of finishing and cleaning of parts (cleaning, washing, removal of flash and burrs, edge processing)*: ed. Babicheva A.P. – Rostov n/d: publishing center of DSTU, 2010. – 287 p.
- 5 Shevtsov, S. N. *Computer modeling of the dynamics of granular media in vibration technological machines: Rostov n/D, ed. SKNTs VSh, 2001. – 193 p.*

6 Babichev A.P. Mechanics of the micro cutting by abrasive particle at vibroabrasive processing. *Key Engineering Materials*. 2005. – Т. 291-292. S. – 309-314.

7 Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Rozhnenko O. A. Metal removal during abrasive processing of complex surfaces / *Russian engineering research*. – 2013. – Т. 33. – No. 5. – P. 302-305.

8 Melnikova E. P., Prokopets G. A. The influence of the concentration of abrasive granule filler on the intensity of the vibration processing process. // *Prospective directions for the development of finishing-hardening processing and vibration-wave technologies*”: collection of articles. tr. scientific seminar. (Rostov-on-Don, February 28, 2020). Rostov-on-Don: DSTU, 2020. – 124-135.

9 Yu. P. Ankudimov, A. P. Shipil, M. E. Svintitsky. Study of the performance of natural abrasive materials such as “Baikalit” during vibration processing. On Sat. articles “Finishing and strengthening mechanical processing, surface quality and performance properties.” Rostov-on-Don, RIO RISHM, 1978. pp. 115-129.

10 Prokopets, A. A. The influence of setting up a technological system on the reliability of the technological process of vibration processing. *Scientific and technical bulletins of SPbSPU*. 2009. – No. 89-1. – pp. 105-109.

11 Prokopets G. A., Prokopets A. A. System of indicators for assessing the reliability of the technological process of vibration processing of parts. *Strengthening technologies and coatings*. – 2015. - No. 8. – P. 5-9.

12 G.A. Prokopets et al. Analysis of tool reliability during vibration processing. In: *Fundamental principles of physics, chemistry and mechanics of high-tech technological systems for shaping and assembling products: collection of proceedings of the international scientific symposium of mechanical engineering technologists / edited by V.A. Lebedeva; Don State Technical University*. – Text: electronic. – Rostov-on-Don: DSTU, 2022. – P. 249-253

13 Tamarkin M.A. The Optimization of Technological Processes of Details Processing by Free Abrasives. *International Symposium "Advances in Abrasive Technology-YIII" ISAAT2005*. International Symposium "Progress in abrasive technology - YIII" ISAAT2005, St. Petersburg, 2005.

14 Tamarkin M.A. The optimization of technological processes of details processing by free abrasives. *Key Engineering Materials*. 2005. Т. 291-292. pp. 319-322.

15 Prokopets, A. A. Analysis of wear mechanisms of the working medium during vibroabrasive processing. *Bulletin of the Don State Technical University*. 2010. – Т. 10. – No. 1 (44). – pp. 64-69

16 Tamarkin M.A., Prokopets A.A., Prokopets G.A. Ensuring stability of the vibration processing process by controlling the vibration amplitude of the working chamber. *Zh.: Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2012. – No. 2-3. – pp. 61-67.

© Прокопец Г.А., Мельникова Е.П., Прокопец А.А., 2024