



УДК 621.8

UDC 621.8

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ВЛИЯНИЕ БЛИЗКОРЕЗОНАНСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ДВУХМАССОВОЙ ВИБРОУПРОЧНЯЮЩЕЙ УСТАНОВКИ НА ФУНДАМЕНТ ЕЁ ОСНОВАНИЯ И УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ МОЩНОСТИ**

**IN INFLUENCE OF THE NEAR-RESONANCE OPERATING MODE OF A TWO-MASS VIBRATION HARDENING UNIT ON THE FOUNDATION AND SPECIFIC POWER COSTS**

✉<sup>1</sup> **Мерчалов Сергей Васильевич**,  
к.т.н., доцент кафедры автомобилей и сервиса,  
Воронежский государственный лесотехниче-  
ский университет имени Г.Ф. Морозова,  
г. Воронеж, e-mail: [merchalov-60@mail.ru](mailto:merchalov-60@mail.ru)

✉<sup>1</sup> **Merchalov Sergey Vasilievich**,  
candidate of technical sciences, associate professor of  
the department of automobiles and service, Voronezh  
state forestry university named after G.F. Morozov,  
Voronezh, e-mail: [merchalov-60@mail.ru](mailto:merchalov-60@mail.ru)

**Мерчалов Александр Сергеевич**,  
к.т.н., инженер, АО «Созвездие», г. Воронеж.

**Merchalov Alexander Sergeevich**,  
candidate of technical sciences, engineer, JSC  
“Sozvezdie”, Voronezh.

**Прядкин Владимир Ильич**,  
д.т.н., профессор кафедры автомобилей и сер-  
виса, Воронежский государственный лесотех-  
нический университет имени Г.Ф. Морозова,  
г. Воронеж.

**Pryadkin Vladimir Ilyich**,  
doctor of technical sciences, professor, depart-  
ment of automobiles and service, Voronezh state  
forestry university named after G.F. Morozov,  
Voronezh.

**Аннотация.** В машиностроение производят крупногабаритные детали методом литья из углеродистых сталей, чугунов с наличием внутренних полостей, имеющие невысокий запас прочности без применения способов упрочнения. Например, такими деталями являются корпуса турбонасосов, редукторов, а также турбины. В самолетостроение используют крупногабаритные детали сложной пространственной формы, такие как, панели крыла, фюзеляжа, отсек шасси, работающие в условиях знакопеременных динамических нагрузок при ограничении массы и запаса прочности. Применять современные методы упрочнения таких деталей не всегда возможно из-за наличия полостей и сложности их пространственной формы поверхности. Такую проблему решают методом виброударного упрочнения (ВУ). Недостаток (ВУ) - это большие объемы инструментальной среды и

**Annotation.** In mechanical engineering, large-sized parts are produced by casting from carbon steels, cast irons with internal cavities, having a low safety margin without the use of strengthening methods. For example, such parts are turbopump housings, gearboxes, and turbines. In aircraft construction, large-sized parts of complex spatial shape are used, such as wing panels, fuselage, chassis compartment, operating under alternating dynamic loads with limited mass and safety margin. It is not always possible to apply modern methods of strengthening such parts due to the presence of cavities and the complexity of their spatial surface shape. This problem is solved by the vibration impact hardening (VI) method. The disadvantage of (VI) is large volumes of the tool environment and high energy costs. Modern (VI) operate in a superresonant mode with rigid fastening of parts and have one dynamic system. The article presents the results of studies of a two-mass

высокие энергозатраты. Современные (ВУ) работают в зарезонансном режиме с жестким креплением деталей и имеют одну динамическую систему. В статье представлены результаты исследований двухмассовой динамической системы виброупрочняющей установки, в которой заложены преимущества близкорезонансных и зарезонансных режимов, которые уменьшают недостатки современных (ВУ). Первую массу составляет деталь с упругими элементами, которая работает в среде интенсивных колебаний в близко резонансном режиме. Вторую массу представляет инструментальная среда с контейнером, которая работает в зарезонансном режиме. Различные режимы работы станка создаются за счет изменения давления воздуха в пневматических резинокордных камерах (ПРК), а также за счет их поджатия. Такая компоновка опытного образца виброупрочняющей установки при испытаниях показала уменьшение затрат мощности на единицу амплитуды колебаний на 35-40 % при работе в режиме, близком к резонансу по сравнению с до- и зарезонансными областями режимов. Амплитуда колебаний фундамента изменялась незначительно.

**Ключевые слова:** ВИБРОУПРОЧНЯЮЩИЙ СТАНОК, ДВУХМАССОВАЯ СИСТЕМА, БЛИЗКО РЕЗОНАНСНЫЕ РЕЖИМЫ, АМПЛИТУДА КОЛЕБАНИЙ, ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕЗИНОКОРДНЫЕ КАМЕРЫ (ПРК), ЗАТРАТЫ МОЩНОСТИ.

dynamic system of a vibration-hardening unit, which incorporates the advantages of near-resonance and super-resonance modes, which reduce the disadvantages of modern (VU). The first mass is a part with elastic elements, which operates in an environment of intense vibrations in a near-resonance mode. The second mass is a tool environment with a container, which operates in a super-resonance mode. Various operating modes of the machine are created by changing the air pressure in the pneumatic rubber-cord chambers (PRC), as well as by compressing them. Such a layout of the experimental model of the vibration-hardening unit during tests showed a decrease in power consumption per unit of vibration amplitude by 35-40% when operating in a mode close to resonance compared to the pre- and super-resonance regions of the modes. The amplitude of base vibrations changed insignificantly.

**Keywords:** VIBRATION HARDENING MACHINE, TWO-MASS SYSTEM, NEAR-RESONANCE MODES, OSCILLATION AMPLITUDE, PNEUMATIC RUBBER-CORD CHAMBERS (PRC), POWER COSTS.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

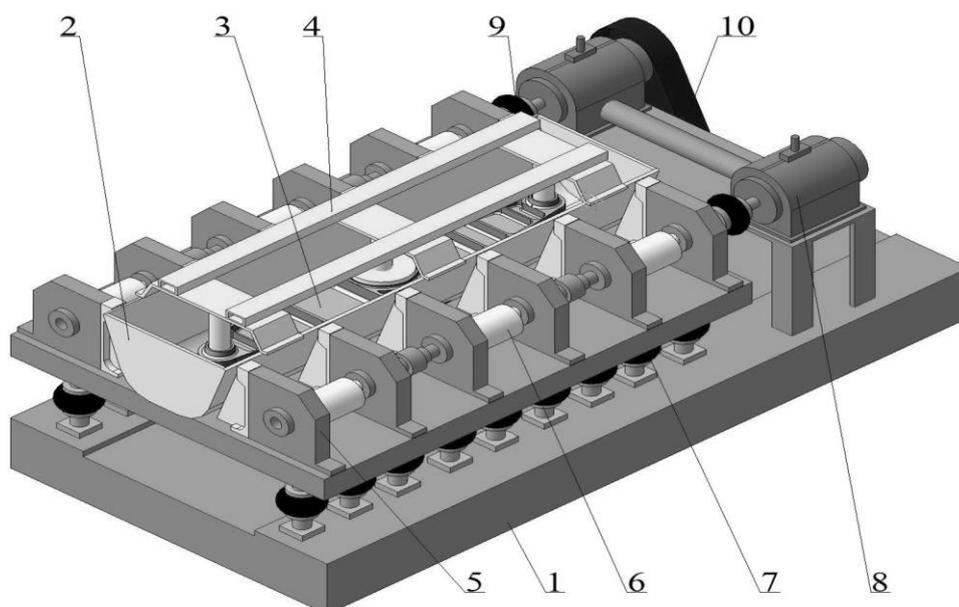
## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современное машиностроение производит крупногабаритные детали способом литья из углеродистых сталей, чугунов с наличием внутренних полостей, имеющие невысокий запас прочности без применения методов упрочнения. Например, такими деталями являются корпуса турбонасосов, редукторов, а также турбины. В самолетостроении используют крупногабаритные изделия сложной пространственной формы такие как панели крыла, фюзеляжа, отсеки шасси, работающие в условиях знакопеременных динамических нагрузок при ограничении массы и запаса прочности. Повышать сопротивление усталости таких деталей пытаются еще на стадии проектирования, используя конструкторские методы. На стадии производства уже окончательно применяют упрочняющие методы термического, криогенного, химико-термического и физико-химического воздействий на поверхность деталей [1, 2]. Достоинством таких технологий являются высокие технологические возможности. К недостатку можно отнести то, что их трудно применять к поверхностям сложной пространственной формы.

Такую проблему лучше решать методом виброударного упрочнения (ВУ), который позволяет обрабатывать как внешние, так и внутренние поверхности деталей сложной формы. Применение виброударного упрочнения приводит к равномерному снижению высотных параметров шероховатости за счет рабочей инструментальной среды в виде металлических шариков, формированию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, образованию наклепа, созданию мелкодисперсной структуры [3]. Существенный недостаток (ВУ) – это большие объемы инструментальной среды. В зависимости от размеров крупногабаритных деталей требуется от нескольких сотен до нескольких тонн стальных шариков. Для вибрирования такой массы нужны двигатели высокой мощности, что делает процесс энергоемким и затратным. При работе оборудования возникают высокие вибровоздействия на фундамент цехового помещения, что может снижать его несущую способность и не обеспечивает экологическую опасность. Разрабатываются новые инновационные методы (ВУ). Авторы [4] предлагают локальный метод с использованием шарико-стержневого упрочнителя для обработки зон концентраторов напряжений крупногабаритных мало жестких изделий и сложной конфигурации. Модернизация методов (ВУ) направлена как для конкретных изделий [5-8], так и материалов изделий [1, 2, 9].

Из видов виброударного упрочнения в основном применяется виброупрочнение деталей «в навал» и с жестким креплением. Для деталей небольших размеров и больших партий применяется упрочнение «в навал», при этом рабочая среда и детали, которые никак не закреплены, свободно перемещаются в контейнере вибрационного станка относительно друг друга. Для повышения усталостной прочности крупногабаритных деталей используют виброударное упрочнение с жестким креплением.

Наиболее часто применяются зарезонансные режимы работы оборудования с одномассовой компоновкой и с инерционным приводом при мягкой виброизоляции. Преимущества таких конструкций состоят в передаче на фундамент и опоры сравнительно небольших динамических нагрузок и достаточно высокой стабильности [5]. Очевидный недостаток одномассовых машин – низкий коэффициент усиления вынуждающей силы. Такое оборудование требует для процесса достаточно большую массу металлических шариков к массе детали в соотношении 1:15. По такому принципу работает виброупрочняющий станок ВУД-2500, конструкция которого представлена на (рис. 1).



1 – основание; 2 – контейнер для металлических шариков; 3 – деталь для обработки; 4 – устройство для держания детали; 5 – опоры валов; 6 – вал дебалансный; 7 – амортизаторы пневматические; 8 – редуктор; 9 – муфта соединительная; 10 – привод

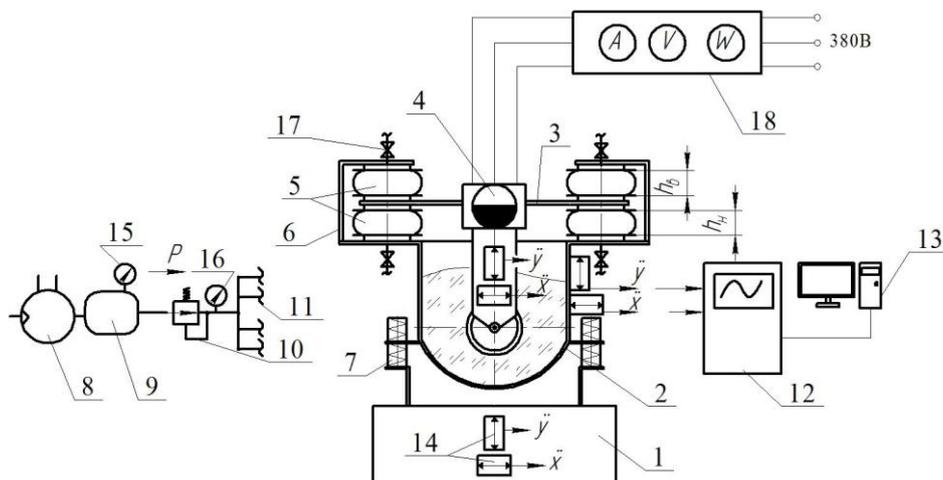
Рисунок 1 – Конструкция виброупрочняющего станка ВУД-2500

Известно, что главным преимуществом близкорезонансных режимов является меньшая энергоёмкость процесса при равных амплитудах колебаний, относительно зарезонансных. Большой минус таких режимов – значительные вибрационные нагрузки на основание с низкой устойчивостью режима колебаний [10, 11].

Предлагается новая двухмассовая динамическая система виброустановки, в которой заложены преимущества близко-резонансных и зарезонансных режимов. Планируется в близкорезонансном режиме обработать деталь с упругими элементами с оснасткой в среде интенсивных колебаний, при этом вибратор установлен на детали. Деталь жестко закреплена, что предоставляет первую массу. Известно, что резонансный режим характеризуется резким ростом амплитуды колебаний при той же частоте вынуждающей силы. Для нашей предлагаемой двухмассовой динамической системы это поможет уменьшить затраты энергии на единицу амплитуды колебаний и, в целом, на выбор мощности привода. Вторая масса состоит из контейнера с загруженной инструментальной средой. Она соединена с первой массой пневматическими резинокордными камерами (ПРК) и на нее воздействуют колебания с меньшей амплитудой. Режим работы второй массы реализуется за резонансным режиме. За счет такой схемы можно получить, на наш взгляд, уменьшение вибрационной нагрузки на фундамент.

## 2 Материалы и методы

Для доказательства работоспособности выдвинутых предположений была разработана двухмассовая система опытного виброупрочняющего устройства (рис. 2). Изготовленная экспериментальная установка представлена на (рис. 3). Согласно предположению, первая массовая система – это деталь с упругой подвеской 3 с резинокордными пневмоэлементами 5, действующими в противодавлении. Контейнер 2 с инструментальной средой и амортизаторами 7 образуют вторую массовую систему. Амплитуду колебаний системы задают изменением давления воздуха в пневматических резинокордных камерах (ПРК) 5 и их поджатием. С помощью мотор-вибратора 4 модели ЭВ-320-4 с частотой вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  передаются вибрации на деталь.



- 1 – основание; 2 – контейнер; 3 – устройство для держания детали и деталь; 4 – вибратор; 5 – пневматические резинокордные камеры; 6 – приспособления для регулировки поджатия элементов; 7 – амортизаторы; 8 – компрессор; 9 – ресивер; 10 – датчик давления; 11 – резиновые шланги для подача воздуха; 12 – прибор ВИ-6-5М12; 13 – ПК переносной; 14 – датчики для замера виброускорений; 15, 16 – манометр для контроля давления воздуха; 17 – клапан для подачи и удаления воздуха; 18 – комплект К50 для замера энергозатрат

Рисунок 2 – Предлагаемая технологическая система двухмассового опытного виброупрочняющего устройства



Рисунок 3 – Экспериментальный образец виброупрочняющего устройства с двухмассовой системой

Величины амплитуд вибрации системы фиксировали с помощью прибора ВИ-6-5М12, который работал с датчиками виброускорения 14. Датчики крепились на детали, контейнере, основании по координатам  $X$  и  $Y$  (рис. 2). Персональный компьютер 13 соединялся с измерительным комплексом ВИ-6-5М12 через контроллер (рис. 4.). Для измерения амплитуды перемещения применяли осциллограф К12-20. Мощность мотор-вибратора замеряли измерительным комплектом К50.



Рисунок 4 – Комплекс ВИ-6М для замера амплитудно-частотных характеристик экспериментальной установки

Для изменения амплитуды колебаний подвижной системы использовали изменения давления от 0,05 до 0,4 МПа на двух уровнях поджатия ПРК 5. Поджимали как верхнюю, так и нижнюю камеру (рис. 2). Первый уровень соответствовал значениям  $h_6 = 95$  мм и  $h_n = 85$  мм; второй уровень –  $h_6 = 78$  мм и  $h_n = 67$  мм. Первая масса системы – деталь с вибратором  $m_1$  имеет массу 15,25 кг. Вторая масса системы – контейнер с шариками  $m_2$  имеет массу 54,3 кг. Масса металлических шариков  $m_0$  – 30 кг. Шарика выполнены из материала ШХ15 с диаметром 4 мм.

### 3 Результаты исследований

В статье представлены результаты исследования виброупрочняющего устройства с двухмассовой системой в близкорезонансном режиме по воздействию на основание, контейнер и энергетические затраты. Зависимости представлены на (рис. 5-7). Графические зависимости имеют максимумы в области резонанса (рис. 5, 6).

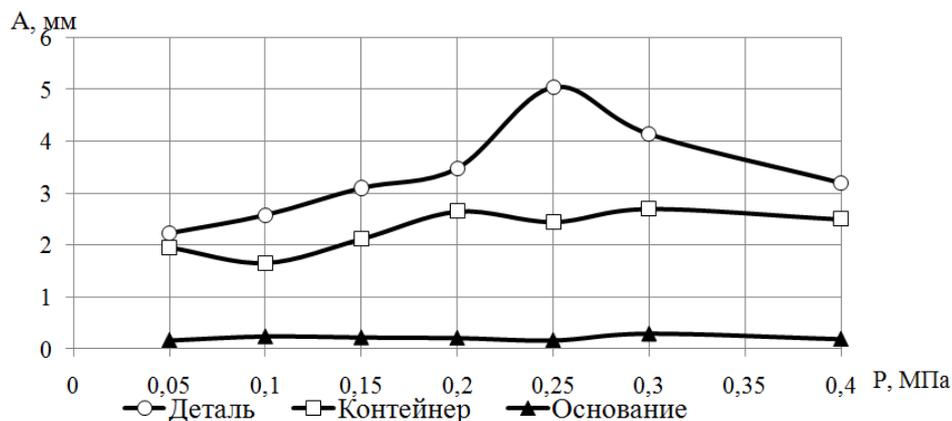


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды перемещения  $A$  детали, контейнера, основания от давления  $P$  при поджатии ПРК  $h_b = 95$  мм,  $h_n = 85$  мм.

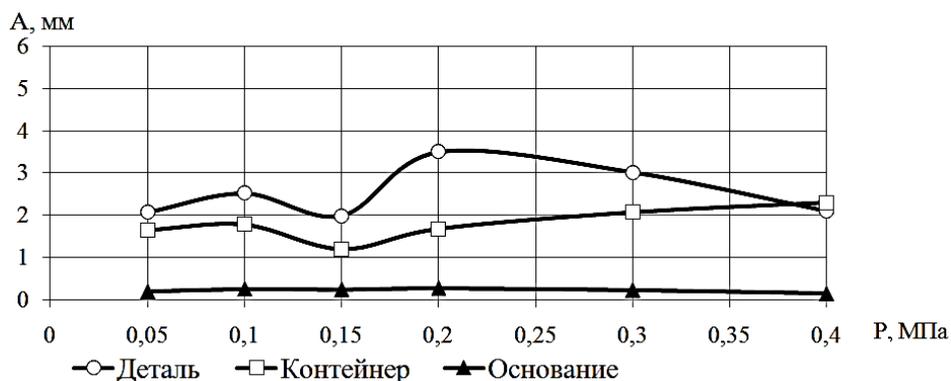


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды перемещения  $A$  детали, контейнера, основания от давления  $P$  при поджатии ПРК  $h_b = 78$  мм и  $h_n = 67$  мм

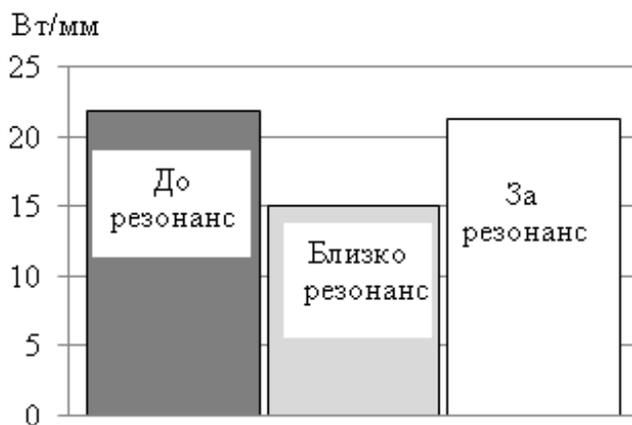


Рисунок 7 – Затраты удельной мощности на единицу амплитуды при различных режимах установки

#### 4 Обсуждение и заключение

Можно заметить, что наступление резонансного режима предлагаемой системы зависит от степени поджатия пневмоупругих элементов и давления. Увеличение степени поджатия пневмоупругих элементов (рис. 6) создает резонансный режим уже при давлении 0,2 МПа при поджатии ПРК  $h_6 = 78$  мм и  $h_n = 67$  мм по сравнению 0,25 МПа при поджатии ПРК  $h_6 = 95$  мм,  $h_n = 85$  мм на графике (рис. 5). Это можно объяснить тем, что при увеличении степени поджатия пневмоупругих элементов система становится жестче и переходит как бы из двухмассовой в одномассовую. При этом будут теряться ее преимущества. Такая предложенная двухмассовая система виброупрочняющего станка, работающая в близко-резонансном режиме, как видно из графических зависимостей, может регулировать амплитуду колебаний детали от 5 мм при давлении 0,25 МПа до 3,5 мм при давлении 0,2 МПа за счет степени поджатия ПРК и давления воздуха в них. Это позволит обрабатывать детали с различными свойствами материалов при помощи определенного режима работы устройства и расширить их ассортимент.

Работа установки в близко резонансном режиме, согласно (рис.7) показывает, что удельная мощность, затрачиваемая на единицу амплитуды колебаний, на 35-40 % меньше, чем в до- и зарезонансной области. Эти данные подтвердили ранее выдвинутые предположения о том, что близко-резонансный режим имеет более высокие значения амплитуды колебаний при меньших затратах мощности для ведения такого режима, амплитуда колебаний фундамента из-за воздействия основания изменяется незначительно.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В предлагаемой двухмассовой динамической системе виброупрочняющей установки заложены преимущества близко-резонансных и зарезонансных режимов.

2. В близкорезонансном режиме работает только деталь с упругими элементами с оснасткой в среде интенсивных колебаний. Вторая масса состоит из контейнера с загруженной инструментальной средой. Она соединена с первой массой пневматическими резинокордными камерами (ПРК) и на нее воздействуют колебания с меньшей амплитудой.

3. Предложенная двухмассовая система виброупрочняющего станка может регулировать амплитуду колебаний детали от 5 мм при давлении 0,25 МПа до 3,5 мм при давлении 0,2 МПа за счет степени поджатия ПРК и давления воздуха в них. Это позволит обрабатывать детали с различными свойствами материалов при помощи определенного режима работы устройства и расширить их ассортимент. Амплитуда колебаний фундамента из-за воздействия основания изменяется незначительно.

4. Работа установки в близкорезонансном режиме показывает, что удельная мощность, затрачиваемая на единицу амплитуды колебаний на 35-40 % меньше, чем в до- и зарезонансной области.

5. Результаты исследований могут быть использованы для технологий виброударного упрочнения в машиностроении и для модернизации сопутствующего оборудования.

#### Список литературы

1 Чудина, О.В. Повышение эффективности поверхностного упрочнения конструкционных сталей закалкой ТВЧ и ультразвуковой обработкой / О.В.Чудина, Д.С. Симонов, Т.С. Симонова, А.Н. Литовченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 19. № 9 (225). – С. 427-431.

2 Чудина, О.В. Химико-термическая обработка деталей, полученных селективным лазерным плавлением / О.В. Чудина, В.А. Зорин, А.А. Брежнев, П. Брингулис, Д.С. Симонов // Сварочное производство. – 2022. – № 5. – С. 35-40.

3 Крупский, Р. Ф. Удаление следов контактно осажённого железа с поверхности заготовок из титановых сплавов при вибрационной ударной обработке / Р. Ф. Крупский, В. В. Алтухова // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: Сборник научных статей по итогам восьмой международной научной конференции, Казань, 30 сентября 2019 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2019. – С. 12-15. – EDN ZKBVZJ.3. – DOI 10.15593/perm.mech/2020.2.10. – EDN BQZNET.N WZIHIM.

4 Тамаркин, М.А. Разработка методики проектирования технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем с учетом формирования сжимающих остаточных напряжений / М.А. Тамаркин, Э. Э.Тищенко, С. А. Новокрещенов, С. А. Морозов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 143-149. – DOI 10.23947/1992-5980-2020-20-2-143-149. – EDN WIVYLO.

5 Радченко, В. П. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных трубопроводах в состоянии поставки и после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью / В. П. Радченко, В. Ф. Павлов, Т. И. Бербасова, М. Н. Саушкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 2. – С. 123-13

6 Лебедев, В. А. Технологические особенности упрочнения коленчатых валов виброударным методом / В. А. Лебедев, Ф. А. Пастухов, М. М. Чаава, Г. В. Серга // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 390-396. – DOI 10.23947/2687-1653-2020-20-4-390-39.

7 Нефедов, А. С. Применение виброударной обработки при восстановлении высоконагруженных пружин сжатия / А. С. Нефедов // Актуальные проблемы инженерных наук : Материалы VII-й (64) ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука-региону», Ставрополь, 03–29 апреля 2019 года. – Ставрополь: Издательский дом "Тэсэра", 2019. – С. 269-271. – EDN JNQQTХ.

8 Сухочев, Г. А., Грымзин А. Ю., Подгорнов С. Н. Применение комбинированной обработки для увеличения показателей качества лопаточных деталей / Г. А. Сухочев, А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов // Научная опора Воронежской области : Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2021. – С. 167-170. – EDN RRQINV.

9 Прокопец, Г. А. Особенности подхода к назначению параметров виброударной обработки инструментальных сталей на примере стали марки У12 / Г. А. Прокопец, А. С. Кочетова, А. В. Папко, А. В. Мураев // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий : Сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей, Ростов-на-Дону, 22–26 сентября 2021 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2021. – С. 58-61. – EDN EZAACP.

10 Елисеев, В.А. Особенности упругих взаимодействий элементов вибрационных технологических машин с учетом неударяющих связей: расчетные схемы, математические модели, приложения / В.А. Елисеев, А.С. Миронов //Современные проблемы теории машин.–2024.– №17.– С.74-79.

11 Семенченко, И.Ю. Выведение поправочного коэффициента для расчета установившейся шероховатости при вибрационной упрочняющей обработке с высокими амплитудами/ И.Ю. Семенченко, В.Б. Васильев, А.А. Мордовцев //Упрочняющие технологии и покрытия. .– 2020.– №4. – С.168-171.

## References

1 Chudina, O.V. Improving the efficiency of surface hardening of structural steels by high-frequency current quenching and ultrasonic treatment / O.V. Chudina, D.S. Simonov, T.S. Simonova, A.N. Litovchenko // Hardening technologies and coatings. - 2023. - Vol. 19. No. 9 (225). - P. 427-431.

2 Chudina, O.V. Chemical-thermal treatment of parts obtained by selective laser melting / O.V. Chudina, V.A. Zorin, A.A. Brezhnev, P. Bringulis, D.S. Simonov // Welding production. -2022. - No. 5. - P. 35-40.

3 Krupskiy, R. F. Removal of traces of contact deposited iron from the surface of titanium alloy workpieces during vibration impact treatment / R. F. Krupskiy, V. V. Altukhova // Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of implementation in production: Collection of scientific articles following the results of the eighth international scientific conference, Kazan, September 30, 2019. - Kazan: Limited Liability Company "CONVERT", 2019. - P. 12-15. - EDN ZKBVZJ.3. - DOI 10.15593/perm.mech/2020.2.10. - EDN BQZNET.N WZIHIM.

4 Tamarkin, M.A. Development of a methodology for designing a technological process for processing with a ball-and-rod hardener, taking into account the formation of compressive residual stresses / M.A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, S. A. Novokreshchenov, S. A. Morozov // Bulletin of the Don State Technical University. - 2020. - Vol. 20, No. 2. - Pp. 143-149. - DOI 10.23947/1992-5980-2020-20-2-143-149. - EDN WIVYLO.

5 Radchenko, V. P. Method for reconstructing residual stresses and plastic deformations in thin-walled pipelines in the as-delivered condition and after two-sided vibro-impact surface shot hardening / V. P. Radchenko, V. F. Pavlov, T. I. Berbasova, M. N. Saushkin // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. – 2020. – No. 2. – P. 123-13

6 Lebedev, V. A. Technological features of hardening crankshafts by the vibration-impact method / V. A. Lebedev, F. A. Pastukhov, M. M. Chaava, G. V. Serga // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2020. – Vol. 20, No. 4. – P. 390-396. – DOI 10.23947/2687-1653-2020-20-4-390-39.

7 Nefedov, A. S. Application of vibro-impact treatment in the restoration of highly loaded compression springs / A. S. Nefedov // Actual problems of engineering sciences: Proceedings of the VII (64) annual scientific and practical conference of teachers, students and young scientists of the North Caucasian Federal University "University Science for the Region", Stavropol, April 3-29, 2019. - Stavropol: Publishing house "Tesera", 2019. - P. 269-271. - EDN JNQQTIX.

8 Sukhochev, G. A., Grymzin A. Yu., Podgornov S. N. Application of combined processing to increase the quality indicators of blade parts / G. A. Sukhochev, A. Yu. Grymzin, S. N. Podgornov // Scientific support of the Voronezh region: Collection of works of the winners of the competition of scientific research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of development of science and technology. - Voronezh: Voronezh State Technical University, 2021. - P. 167-170. - EDN RRQINV.

9 Prokopets, G. A. Features of the approach to assigning parameters for vibro-impact processing of tool steels using the example of steel grade U12 / G. A. Prokopets, A. S. Kochetova, A. V. Papko, A. V. Muraev // Fundamental foundations of physics, chemistry and mechanics of science-intensive technological systems for shaping and assembling products: Collection of papers of the scientific symposium of mechanical engineers, Rostov-on-Don, September 22–26, 2021. – Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2021. – P. 58–61. – EDN EZZAZP.

10 Eliseev, V. A. Features of elastic interactions of elements of vibration technological machines taking into account non-retaining connections: calculation schemes, mathematical models, applications / V. A. Eliseev, A. S. Mironov // Modern Problems of Machine Theory. - 2024. - No. 17. - P. 74-79.

11 Semenchenko, I. Yu. Derivation of a correction factor for calculating steady-state roughness during vibration hardening treatment with high amplitudes / I. Yu. Semenchenko, V. B. Vasiliev, A. A. Mordovtsev // Hardening technologies and coatings. . - 2020. - No. 4. - P. 168-171.

© Мерчалов С. В., Мерчалов А. С., Прядкин В. И., 2025