

А. Г. Исаев, Э. В. Бивзюк, И. М. Чукарина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Аннотация. Рассматривается проблема повышения эффективности технологического процесса упрочнения сварных стержневых конструкций транспортных машин. Актуальность исследования обусловлена необходимостью улучшения качества и надежности несущих конструкций при одновременном обеспечении безопасных условий труда. В работе описана роботизированная система, позволяющая повысить эффективность технологического процесса упрочнения сварных стержневых конструкций транспортных машин. Предложена структура роботизированного технологического комплекса, включающая устройство фиксации и поворота упрочняемой детали, исполнительный модуль с шарико-стержневым упрочнителем и систему управления технологическими параметрами. Разработаны алгоритмы формирования траектории движения инструмента и выбора режимов обработки, обеспечивающие заданные параметры качества. Практическая значимость работы подтверждается результатами внедрения: автоматизированная система обеспечивает повышение усталостной долговечности конструкций на 40–50 % по сравнению с ручной обработкой. Значительно улучшаются условия труда, снижается уровень вибрации, полностью исключаются ручные операции в зоне обработки.

Ключевые слова: шарико-стержневой упрочнитель, сварное соединение, роботизированный технологический комплекс.

Для цитирования: Исаев, А. Г. Повышение эффективности технологического процесса упрочнения несущих конструкций транспортных машин / А. Г. Исаев, Э. В. Бивзюк, И. М. Чукарина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 176–181. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_176.

Введение

Надежность несущих конструкций транспортных машин является важным вопросом в транспортном машиностроении. Большинство таких конструкций изготавливается с помощью сварки, а прочность в зонах сварных соединений в свою очередь и определяет надежность таких конструкций. Для повышения качества поверхностного слоя несущих конструкций используются разные методы, одним из которых является упрочнение поверхности детали шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ), показавшим свою эффективность при местном упрочнении деталей [1–3].

Устройство широко применяется в различных сферах машиностроения и может использоваться как совместно с обрабатывающим станком, так и вручную. Однако стоит отметить, что при ручном процессе упрочнения оператор длительное время находится в непосредственной близости от источника интенсивных ударных нагрузок. При этом человек-оператор является неотъемлемой частью системы «человек – машина – производственная среда», и на него действует ряд опасных и вредных производственных факторов во время реализации процесса упрочнения (рис. 1).

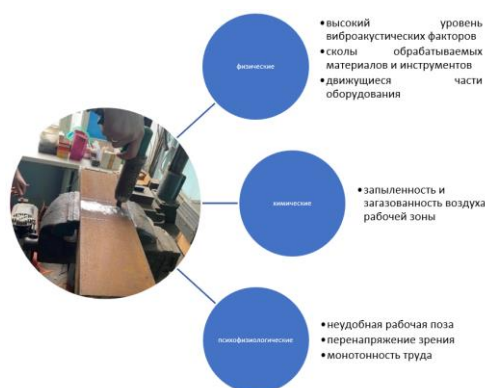


Рис. 1. Опасные и вредные факторы, присущие упрочнению методом ШСУ

Среди таких опасных и вредных факторов можно выделить повышенные уровни шума и вибрации. Уровень звукового давления, как правило, существенно превышает предельно допустимые значения, а спектр шума характеризуется выраженной высокочастотной составляющей. Превышения в рабочей зоне представлены, как показано на рис. 2 [2].

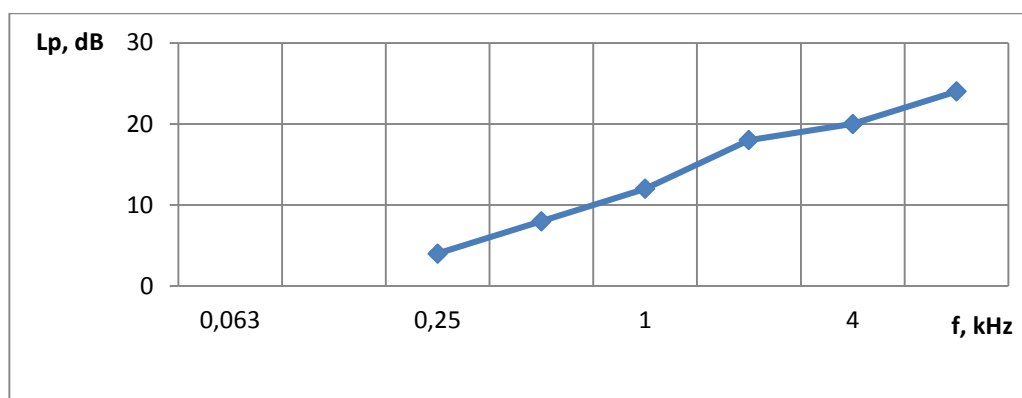


Рис. 2. Превышение уровней звукового давления при ручной обработке

Превышение виброакустических факторов при реализации процесса упрочнения является существенным ограничением и формирует необходимость разработки специализированных роботизированных и автоматизированных систем, которые включают:

- обеспечение безопасных условий за счет увеличения расстояния;
- обеспечение безопасных условий за счет снижения времени;
- стабилизации параметров процесса.

За последние годы роботизация процессов обработки деталей машин широко развивается. В работах Н. Liu [4, 5] показано, что применение промышленных роботов с ударным инструментом позволяет сформировать стабильные поля пластической деформации из нержавеющей стали и жаростойких сплавов. Параллельно развиваются роботизированные системы дробеструйного упрочнения для автомобильной и авиационной отрасли.

В работах Х. Ке [6] показано повышение стабильности шероховатости за счет использования робота-ассистента при полировании. Аналогичные результаты получены В. Zhang [7] по роботизированному ленточному шлифованию лопаток авиадвигателей, где робот обеспечивает точную траекторию и контролируемое снятие материала при сложной пространственной геометрии.

В связи с этим актуальной является разработка конструкции автоматизированной системы для процесса упрочнения поверхностей деталей методом ШСУ, обеспечивающей как качество обработки, так и снижение неблагоприятных факторов, что позволит обеспечить безопасные условия эксплуатации технологического процесса упрочнения стержневых конструкций транспортных машин.

Основная часть

Анализ условий эксплуатации технологического процесса упрочнения поверхностей деталей представляет целесообразным разработать специальное автоматизированное устройство для упрочнения стержневых деталей различных геометрических размеров, таких как швеллера, уголки, двутавровый профиль и стержневые конструкции.

Конструкция системы включает три основных узла:

- механизм подачи и фиксации обрабатываемой детали;
- механизм упрочнения;
- система управления.

Подача стержневых конструкций осуществляется по рольгангам, образующих направляющие пути для детали.

Учитывая, что упрочняющий инструмент имеет привод от компрессора, в качестве исполнительного механизма фиксации и поворота детали принята пневматическая система. Механизм фиксации включает два пневматических цилиндра, которые через рычажную систему приводят в действие универсальные прижимные колодки. Форма колодок выполнена таким образом, чтобы обеспечить надежную фиксацию конструкций различных геометрических размеров без смены оснастки, либо с минимальной переналадкой.

Для обеспечения возможности упрочнения всех поверхностей профиля детали механизм оборудован системой поворота, позволяющей последовательно ориентировать обрабатываемую поверхность относительно требуемого положения к упрочняющему устройству.

Механизм упрочнения представляет собой координатный исполнительный модуль с двумя перпендикулярными подачами, обеспечивающими перемещение устройства относительно детали. Перемещение инструмента осуществляется за счет шарико-винтовой передачи, что позволяет получать высокую точность позиционирования и повторяемость траектории обработки. Кинематическая схема автоматизированной системы представлена на рис. 3.

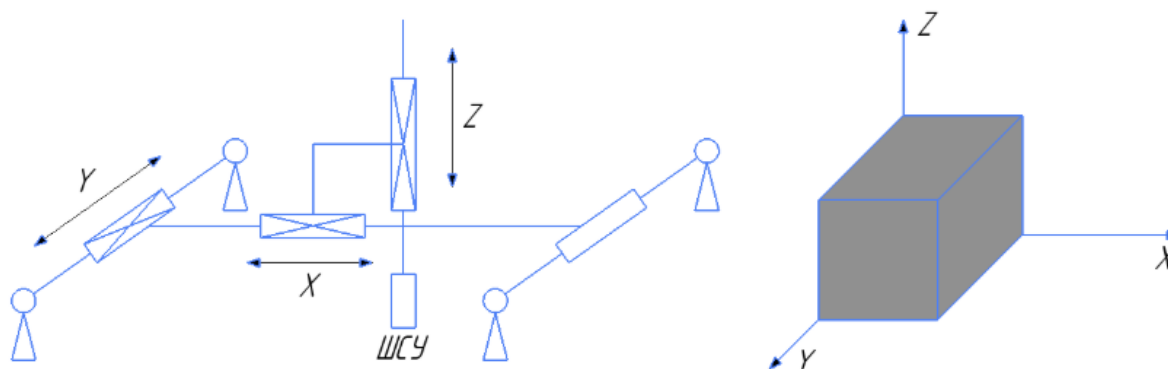


Рис. 3. Кинематическая схема системы

Конструкция механизма включает привод продольной и поперечной подачи упрочняющего устройства. Согласованная работа приводов позволяет формировать прямолинейные и ступенчатые траектории перемещения инструмента в плоскости обрабатываемой зоны и выдержать заданный шаг между переходами.

Для контроля положения исполнительного органа и его фиксации в заданных точках предусмотрена сенсорная система и система управления, обеспечивающая автоматизированное задание режимов и последовательности движения упрочнителя и обрабатываемой детали.

Общий вид системы представлен на рис. 4, показана компоновка узлов станда: механизм подачи и фиксации детали, механизм подачи упрочнителя, а также элементы системы управления. Пространственное разделение органов и рабочего места оператора позволяет реализовать дистанционное управление процессом упрочнения и снизить влияние виброакустических факторов, что позволяет также обеспечить безопасные условия эксплуатации рассматриваемого технологического процесса.

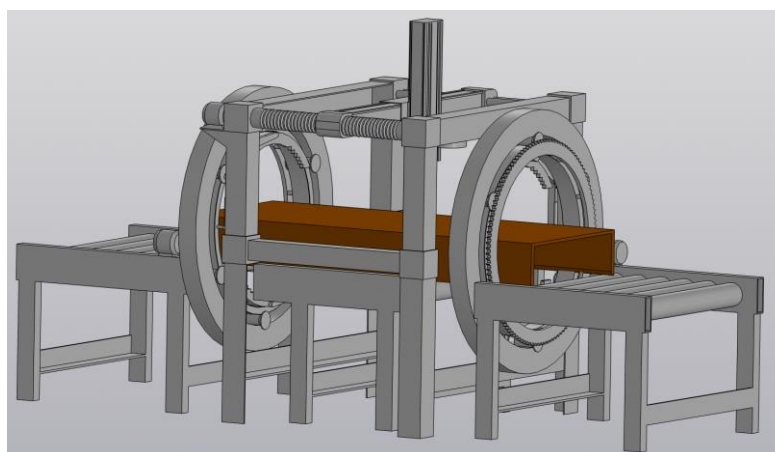


Рис. 4. Общий вид автоматизированной системы

На рис. 5 представлена блок-схема алгоритма работы автоматизированной системы.

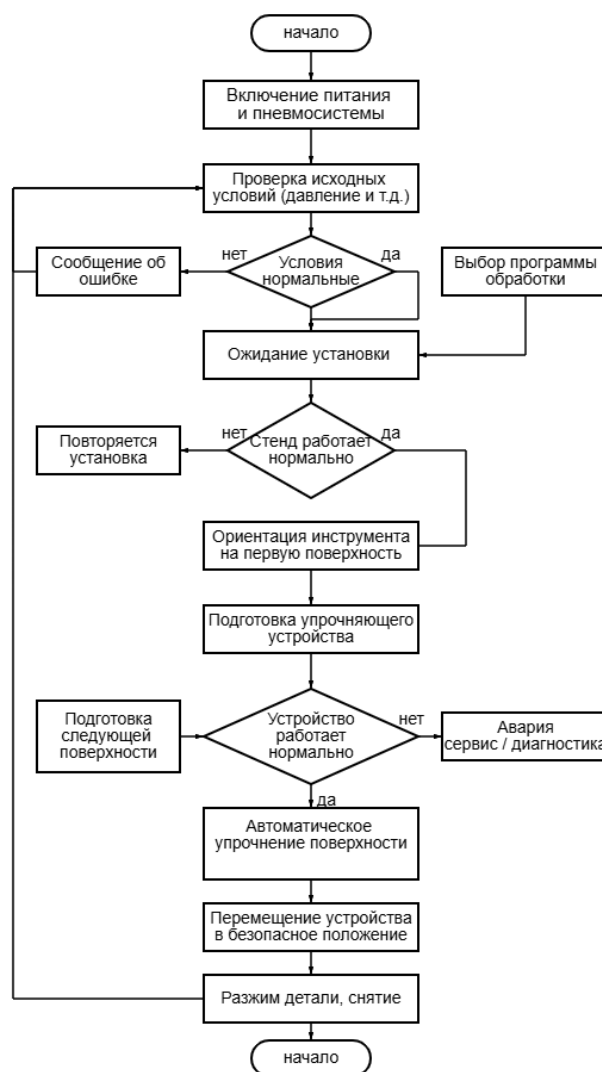


Рис. 5. Алгоритм работы устройства

Алгоритм включает этапы инициализации, подготовки к упрочнению, выполнения данного цикла и завершения работы. На начальном этапе производится включение питания и пневмосистемы, проверка исходных условий, таких как давление сжатого воздуха, отсутствие аварийных сигналов и т. д. Далее оператор задает параметры технологического процесса упрочнения и параметры обрабатываемой детали, после чего выполняется установка и фиксация детали. Механизм поворота ориентирует профиль таким образом, чтобы обрабатываемая поверхность находилась в рабочем положении относительно упрочнителя. Далее система переходит в автоматический режим.

Качество упрочняющего наклепа определяется выбором рациональных режимов обработки. Для их оптимизации были проведены экспериментальные исследования, устанавливающие взаимосвязь между параметрами процесса (скорость вращения детали, осевая подача, частота ударов шарика, величина статического усилия) и характеристиками упрочненного слоя (глубина наклепа, степень пластической деформации, шероховатость поверхности). На основе регрессионного анализа полученных данных создана математическая модель, позволяющая прогнозировать результат обработки. В ходе процесса оператор контролирует непрерывный технологический процесс. После обработки одной поверхности устройство переориентирует деталь, и цикл повторяется. По окончании цикла устройство перемещается в безопасное положение, деталь разжимается и снимается. Такой подход устраняет влияние человеческого фактора и обеспечивает воспроизводимость результатов от детали к детали.

Применение предложенной автоматизированной системы упрочнения методом ШСУ обеспечивает более высокую стабильность технологического процесса. Для стержневых конструкций, работающих в условиях переменных нагрузок, повышение однородности свойств поверхностного слоя является принципиально важным с точки зрения усталостной надежности.

Апробация разработанного комплекса проводилась на сварных рамах грузовых автомобилей. Сравнительный анализ показал, что автоматизированное ШСУ обеспечивает повышение усталостной долговечности конструкций в среднем на 40–50 %, по сравнению с ручной обработкой дробью, при одновременном снижении разброса показателей на 30 %. Это связано с высокой однородностью наклепа по всей протяженности сложноконтурных стержней. Значительно улучшаются условия труда: уровень вибрации на рабочем месте не превышает допустимых нормативов, а процесс полностью исключает ручные операции в зоне обработки. Предварительный расчет экономической эффективности для условий серийного производства демонстрирует, что внедрение комплекса окупается за 2–3 года за счет снижения брака по усталостным трещинам, увеличения межремонтного пробега машин и высвобождения персонала. Таким образом, разработанная роботизированная система представляет собой готовое технологическое решение для модернизации производственных линий изготовления несущих конструкций транспортной техники.

Выводы

В результате выполненных исследований разработана автоматизированная система для реализации процесса упрочнения поверхностей деталей методом шарико-стержневого упрочнения. Предложенная конструкция устройства и алгоритм работы обеспечивают автоматизированную подачу, фиксацию и ориентацию детали, программное перемещение устройства по заданной траектории и стабилизацию процесса обработки. Это позволяет повысить однородность свойств поверхностного слоя и одновременно обеспечить безопасные условия эксплуатации рассматриваемого технологического процесса, за счет снижения виброакустических факторов, что делает систему перспективной для внедрения в серийное производство.

Список литературы

- 1 **Тамаркин, М. А.** Обеспечение акустической безопасности при обработке плоских деталей шарико-стержневым упрочнителем / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. Г. Исаев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 2 (63). – С. 12–19. – DOI 10.12737/article_5ac49dc30826b3.63726809.
- 2 **Тамаркин, М. А.** Обеспечение акустической безопасности технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем плоских деталей при достижении заданных параметров поверхностного слоя / М. А. Тамаркин, А. Н. Чукарин, А. Г. Исаев // Науковедение. – 2016. – № 6. – С. 28. – ISSN 2223-5167.
- 3 **Исаев, А. Г.** Обеспечение акустической безопасности при шарико-стержневом упрочнении с учетом достижения заданных параметров качества поверхностного слоя (на примере плоских деталей) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.26.01, 05.02.08 / Исаев Александр Геннадьевич. – Ростов-на-Дону, 2017. – 129 с.
- 4 Robotic hammer peening-induced martensite in austenitic steels: Spatial distributions of plastic deformation and phase transformation / H. Liu, Ch. K. Ivan Tan, Yu. Wei [et al.] // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 297–301. – DOI 10.1016/j.procir.2020.02.033.
- 5 Laser-cladding and robotic hammer peening of stainless steel 431 on low alloy steel 4140 for surface enhancement and corrosion protections / H. Liu, Ch. K. I. Tan, X. Dong [et al.] // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2022. – Vol. 36, No. 21.

References

- 1 **Tamarkin, M. A.** Ensuring acoustic safety when processing flat parts with a ball-rod hardener / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, A. G. Isaev // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2018. – No. 2 (63). – P. 12–19. DOI10.12737/article_5ac49dc30826b3.63726809.
- 2 **Tamarkin, M. A.** Ensuring the acoustic safety of the technological process of processing flat parts with a ball-rod hardener when achieving the specified parameters of the surface layer / M. A. Tamarkin, A. N. Chukarin, A. G. Isaev // Naukovedenie. – 2016. – No. 6. – P. 28. – ISSN 2223-5167.
- 3 **Isaev, A. G.** Ensuring acoustic safety during ball-and-rod hardening, taking into account the achievement of the specified quality parameters of the surface layer (for example, flat parts) : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.26.01, 05.02.08 / Isaev Alexander Genadievich. – Rostov-on-Don, 2017. – 129 c.
- 4 Robotic hammer peening-induced martensite in austenitic steels: Spatial distributions of plastic deformation and phase transformation / H. Liu, Ch. K. Ivan Tan, Yu. Wei [et al.] // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 297–301. – DOI 10.1016/j.procir.2020.02.033.
- 5 Laser-cladding and robotic hammer peening of stainless steel 431 on low alloy steel 4140 for surface enhancement and corrosion protections / H. Liu, Ch. K. I. Tan, X. Dong [et al.] // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2022. –

– P. 2313–2327. – DOI 10.1080/01694243.2021.2011657.

6 Review on robot-assisted polishing : Status and future trends / X. Ke, Y. Yu, K. Li [et al.] // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2023. – Vol. 80. – P. 102482. – DOI 10.1016/j.rcim.2022.102482.

7 A review of surface quality control technology for robotic abrasive belt grinding of aero-engine blades / B. Zhang, Sh. Wu, D. Wang [et al.] // Measurement. – 2023. – Vol. 220. – P. 113381. – DOI 10.1016/j.measurement.2023.113381.

Vol. 36, No. 21. – P. 2313–2327. – DOI 10.1080/01694243.2021.2011657.

6 Review on robot-assisted polishing : Status and future trends / X. Ke, Y. Yu, K. Li [et al.] // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2023. – Vol. 80. – P. 102482. – DOI 10.1016/j.rcim.2022.102482.

7 A review of surface quality control technology for robotic abrasive belt grinding of aero-engine blades / B. Zhang, Sh. Wu, D. Wang [et al.] // Measurement. – 2023. – Vol. 220. – P. 113381. – DOI 10.1016/j.measurement.2023.113381.

A. G. Isaev, E. V. Bivzyuk, I. M. Chukarina

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE HARDENING PROCESS OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF TRANSPORT MACHINES

Abstract. The article examines the problem of improving the efficiency of the hardening process for welded rod structures of transport machines. The relevance of this research lies in the need to improve the quality and reliability of load-bearing structures while simultaneously ensuring safe working conditions. This paper describes a robotic system that can improve the efficiency of the hardening process for welded rod structures of transport machines. The proposed robotic system includes a device for clamping and rotating the workpiece to be hardened, an actuator module with a ball-and-rod hardener, and a process parameter control system. Algorithms for generating tool paths and selecting machining modes that ensure specified quality parameters have been developed. The practical significance of this work is confirmed by the implementation results: the automated system increases the fatigue life of structures by 40–50% compared to manual processing. Working conditions are significantly improved, vibration levels are reduced, and manual operations in the processing area are completely eliminated.

Keywords: ball-and-rod hardener, welded joint, robotic process system.

For citation: Isaev, A. G. Improving the efficiency of the hardening process of load-bearing structures of transport machines / A. G. Isaev, E. V. Bivzyuk, I. M. Chukarina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 176–181. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_176.

Сведения об авторах

Исаев Александр Геннадьевич

Донской государственный технический университет (ДГТУ),
кафедра «Робототехника и мехатроника»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: isaev278@mail.ru

Бивзюк Эмиль Витальевич

Донской государственный технический университет (ДГТУ),
кафедры «Робототехника и мехатроника»,
преподаватель кафедры,
e-mail: aemiliuslibertus@yandex.ru

Чукарина Ирина Михайловна

Донской государственный технический университет (ДГТУ),
кафедра «Технология машиностроения»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: chukarinaim@mail.ru

Information about the authors

Isaev Alexander Gennadievich

Don State Technical University (DSTU),
Chair “Robotics and Mechatronics”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: isaev278@mail.ru

Bivzyuk Emil Vitalievich

Don State Technical University (DSTU),
Chair “Robotics and Mechatronics”,
Lecturer of the Chair,
e-mail: aemiliuslibertus@yandex.ru

Chukarina Irina Mikhailovna

Don State Technical University (DSTU),
Chair “Mechanical Engineering Technology”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: chukarinaim@mail.ru