

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-208-219>

УДК 621.793:621.36



Оригинальная статья

**О. Г. Девойно^{1*}, И. И. Вегера², В. Г. Залесский^{2*},
В. В. Рудый³, В. В. Жарский⁴**

¹*Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь*

²*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академика Купревича, 10, 220084, Минск, Республика Беларусь*

³*ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»,
ул. 40 лет Октября, 4, 222161, Жодино, Минская область, Республика Беларусь*

⁴*ООО «Рухсервомотор»,
ул. Монтажников, 5, 220019, Минск, Республика Беларусь*

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ
ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДВЕСКИ
ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ МАШИН МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО
И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Аннотация. Представлен анализ мирового опыта в области исследований и применения инновационных методов поверхностного упрочнения деталей машиностроения с помощью лазерного и высокочастотного индукционного нагрева. Доказана актуальность применения методов лазерного и индукционного упрочнения для внутренних поверхностей тяжело нагруженных деталей карьерной техники. Представлены результаты моделирования и расчета тепловых и электромагнитных полей при воздействии внешнего электромагнитного поля и пучков лазерного излучения. Описана оригинальная конструкция комплекса оборудования для обработки внутренних поверхностей деталей подвески внешним электромагнитным полем. Показаны оптимальные конструкции индукторов с магнитопроводами из различных материалов. Приведены исследования структуры и свойств, получаемых на внутренних поверхностях тяжело нагруженных деталей подвески автомобилей семейства БелАЗ, которые обработаны по оптимальным режимам поверхностного индукционного воздействия. Описана разработанная оригинальная технология лазерного поверхностного упрочнения, позволяющая повысить износостойкость тяжело нагруженных деталей. Приведены данные по внедрению результатов исследований на ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» для обработки широкой номенклатуры тяжело нагруженных деталей подвески.

Ключевые слова: индукционный нагрев, лазерная закалка, комплекс поверхностного упрочнения, индуктор, магнитомягкий материал, микроструктура, физико-механические свойства

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Девойно Олег Георгиевич** – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет. <https://orcid.org/0000-0001-6927-8594>. E-mail: plazteh@bntu.by; *Вегера Иван Иванович* – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vegera@phti.by; *Залесский Виталий Геннадьевич** – доктор физико-математических наук, доцент, директор Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси. E-mail: v.zallesski@phti.by; *Рудый Виктор Викторович* – кандидат технических наук, главный технолог ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». E-mail: viktor.rudy@gmail.com; *Жарский Владимир Владимирович* – доктор технических наук, главный технолог ООО «Рухсервомотор».

Вклад авторов: *Девойно Олег Георгиевич* – планирование исследования в области лазерной обработки, сбор и систематизация данных, проведение сравнительного анализа, написание и оформление текста рукописи; *Вегера Иван Иванович* – планирование исследования в области индукционной поверхностной обработки, сбор и систематизация данных, проведение сравнительного анализа, написание и оформление текста рукописи; *Залесский Виталий Геннадьевич* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, редактирование текста рукописи; *Рудый Виктор Викторович* – проведение исследований, сбор и систематизация данных, апробация результатов при промышленных испытаниях; *Жарский Владимир Владимирович* – проведение исследований, сбор и систематизация данных, апробация результатов, разработка концепции лазерного оборудования.

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Для цитирования: Инновационные технологии упрочнения внутренних поверхностей деталей подвески тяжело нагруженных машин методами лазерного и высокочастотного индукционного воздействия / О. Г. Девойно [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 3. – С. 208–219. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-208-219>

Поступила в редакцию: 09.06.2023

Утверждена к публикации: 07.09.2023

Подписана в печать: 21.09.2023

Original article

**Oleg G. Devoino^{1*}, Ivan I. Vegera², Vitali G. Zaleski^{2*},
Viktor V. Rudy³, Vladimir V. Zharsky⁴**

¹Belarusian National Technical University,

65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus

²Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,

10, Akademichian Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus

³JSC “BELAZ” – the Management Company of the Holding “BELAZ-HOLDING”,

4, 40 let Octyabrya Str., 222161, Zhodino, Minsk Region, Republic of Belarus

⁴“Ruchservomotor” LLC,

5, Montazhnikov Str., 220019, Minsk, Republic of Belarus

**INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING OF INTERNAL SURFACES
OF SUSPENSION PARTS OF HEAVY-LOADED MACHINES BY LASER
AND HIGH-FREQUENCY INDUCTION METHODS**

Abstract. In the article innovative methods of surface hardening of internal surfaces of machine parts by laser and high-frequency induction heating are presented. The relevance of applying the methods of laser and induction hardening for the internal surfaces of heavily loaded parts of quarry equipment is proved. The results of modeling and calculation of thermal and electromagnetic fields under the influence of an external electromagnetic field and laser radiation beams are presented. The original design of a complex of equipment for processing the internal surfaces of suspension parts by external electromagnetic field is described. The optimal designs of inductors with magnetic circuits made of various materials are shown. The study of the structure and properties obtained on the internal surfaces of heavily loaded suspension parts of cars, line of the BELAZ company, treated according to the optimal modes of surface induction exposure is given. The developed original technology and equipment of laser surface hardening, which makes it possible to increase the wear resistance of heavily loaded parts, is described. Data on the implementation of research results at JSC “BELAZ” – the Management Company of the Holding “BELAZ-HOLDING” for processing a wide range of heavily loaded suspension parts are given.

Keywords: induction heating, laser hardening, surface hardening complex, inductor, soft magnetic material, microstructure, physical and mechanical properties

Conflict of Interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about authors: *Oleg G. Devoino** – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University. <https://orcid.org/0000-0001-6927-8594>. E-mail: plazteh@bntu.by; *Ivan I. Vegera* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department at Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vegera@phti.by; *Vitali G. Zaleski** – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Director at Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: v.zaleski@phti.by; *Viktor V. Rudy* – Cand. Sci. (Engineering), Chief Technologist at JSC “BELAZ” – the Management Company of the Holding “BELAZ-HOLDING”. E-mail: viktor.rudy@gmail.com; *Vladimir V. Zharsky* – Dr. Sci. (Engineering), Chief Technologist at “Ruchservomotor” LLC.

Contribution of the authors: *Oleg G. Devoino* – planning a study in the field of laser processing, collecting and systematizing data, conducting a comparative analysis, writing and formatting the text of the manuscript; *Ivan I. Vegera* – planning research in the field of induction surface treatment, collecting and systematizing data, conducting a comparative analysis, writing and formatting the text of the manuscript; *Vitali G. Zaleski* – substantiation of the concept, development of the design of an experimental study, editing the text of the manuscript; *Viktor V. Rudy* – conducting research, collecting and systematizing data, approving the results during industrial tests; *Vladimir V. Zharsky* – conducting research, collecting and systematizing data, testing the results, developing the concept of laser equipment.

For citation: Devoino O. G., Vegera I. I., Zaleski V. G., Rudy V. V., Zharsky V. V. Innovative technologies for strengthening of internal surfaces of suspension parts of heavy-loaded machines by laser and high-frequency induction methods. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 3, pp. 208–219 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-208-219>

Received: 09.06.2023

Approved for publication: 07.09.2023

Signed to the press: 21.09.2023

Введение. Актуальной задачей современного машиностроительного производства является повышение надежности и долговечности механизмов и машин за счет увеличения поверхностной твердости и износостойкости деталей. Для реализации данной задачи широко применяются различные методы химико-технической и термической обработки. Инновационными технологиями поверхностного упрочнения являются скоростные методы термической обработки, такие как высокочастотный индукционный, лазерный, плазменный нагрев и др. [1–3]. Однако следует отметить, что реализация данных методов относительно упрочнения внутренних поверхностей деталей сопряжена с рядом технологических трудностей.

Так, индукционный нагрев поверхностей, осуществляемый внешним электромагнитным полем индуктора, с точки зрения моделирования и практической реализации значительно сложнее нагрева любых поверхностей внутренним полем. Из-за кольцевого эффекта и эффекта близости при индукционном нагреве внешним полем снижаются магнитный поток и, как следствие, удельная мощность, передаваемая в деталь [4, 5].

При нагреве наружной поверхности детали в нее попадает до 95 % энергии, выделяемой индуктором, а 5–10 % рассеивается в окружающем пространстве и отводится водой, охлаждающей индуктор. При обработке внутренних поверхностей нагрев осуществляется внешней стороной индуктора, где плотность потока магнитного поля значительно ниже, при этом обеспечивается обратная пропорция: 70 % энергии рассеивается, а 30 % идет на нагрев детали. Поэтому с целью компенсации кольцевого эффекта и «выдавливания» магнитного поля на поверхность для нагрева детали внешним полем в конструкцию индукторов устанавливаются магнитопроводы [6, 7].

В зависимости от формы, габаритов и требований к свойствам после обработки для различных деталей с внутренней поверхностью приходится решать следующие научно-технические задачи: расчет и моделирование индукторов, подбор материалов для изготовления оснастки, разработка систем механизации для равномерного вращения и перемещения детали, изучение микроструктуры и свойств упрочненных слоев и т.д. [8].

Основной технической проблемой при лазерной закалке внутренних поверхностей представляется доставка излучения в зону обработки, так как в этом случае имеет место малое расстояние между оптическими компонентами системы и зоной воздействия лазерного луча. Важной технологической задачей является реализация процесса лазерной закалки как финишной операции без нарушения микрогеометрии поверхностного слоя. В большинстве случаев лазерные технологии используют в качестве инструмента луч, генерируемый непосредственно источником [9–11], что сильно затрудняет получение стабильного качества обработки.

В связи с этим *цель исследования* – разработка и внедрение оригинальных, технологий и оборудования лазерного и индукционного поверхностного упрочнения тяжело нагруженных деталей подвески автомобилей БЕЛАЗ для повышения их эксплуатационных свойств и ресурса работы.

Технология индукционного нагрева. Детали подвески автомобилей БЕЛАЗ, такие как шток, наконечник, штанга, крышка, ступица, корпус мотор редуктора, водило, являются тяжело нагруженными, поэтому к их поверхностно упрочненному слою предъявляются следующие требования: твердость поверхности 45–58 HRC, глубина слоя 2–6 мм. Данные детали изготавливаются из легированных конструкционных сталей типа 40X, 40XH, 45 (ГОСТ 4543-2016).

Для реализации технологии термообработки внутренних поверхностей, в частности поверхностного электромагнитного упрочнения длинномерных и сложнопрофильных деталей подвески автомобилей БЕЛАЗ грузоподъемностью до 450 т, специалистами Физико-технического института НАН Беларуси и ОАО «БЕЛАЗ» был разработан и внедрен комплекс оборудования ФТИ 3.179 (рис. 1).

Данный комплекс позволяет обрабатывать крупногабаритные детали длиной до 3 м с внутренними отверстиями диаметром до 300 мм. С целью получения равномерного температурного поля и, как следствие, распределения свойств по сечению были проведены расчеты с моделированием распределения электромагнитных полей по поверхности. Моделирование проводилось в программном комплексе ELCUT, который использовался на правах бесплатного доступа («ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.5. Руководство пользователя», URL: http://www.tor.ru/elcut/free_doc_r.htm). С помощью программы была получена

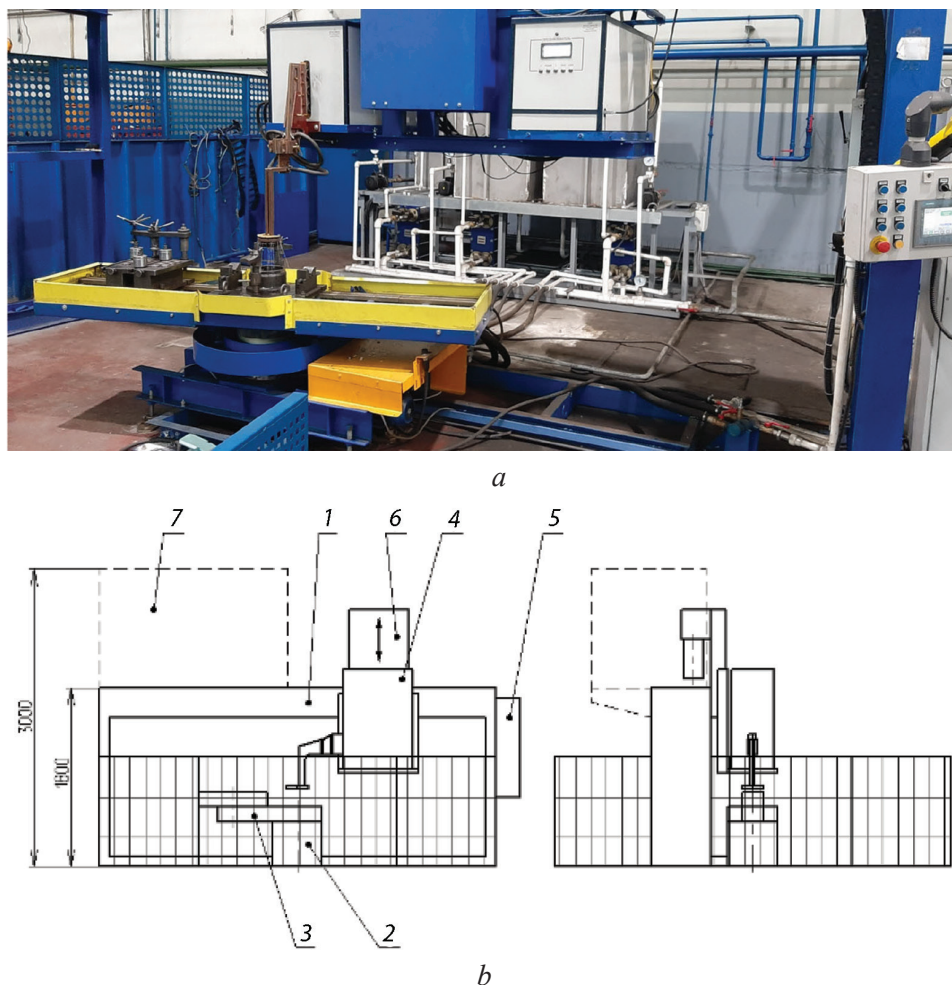


Рис. 1. Комплекс оборудования ФТИ 3.179: *a* – внешний вид; *b* – функциональная схема (1 – порталная система горизонтального перемещения полупроводникового транзисторного генератора с блоком согласования; 2 – опорный подшипниковый узел вращения стола; 3 – поворотный-вращающийся стол для крепления и установки деталей; 4 – полупроводниковый транзисторный генератор с блоком согласования и индуктором; 5 – система управления; 6 – механизм вертикального перемещения полупроводникового транзисторного генератора с блоком согласования; 7 – станция подготовки и охлаждения закалочной жидкости)

Fig. 1. Equipment complex FTI 3.179: *a* – appearance; *b* – functional diagram (1 – portal system for horizontal movement of a semiconductor transistor generator with a matching unit; 2 – support bearing unit for table rotation; 3 – rotary table for fastening and installing parts; 4 – semiconductor transistor generator with a matching unit and an inductor; 5 – control system; 6 – mechanism for vertical movement of semiconductor transistor generator with matching unit; 7 – station for the preparation and cooling of the hardening liquid)

картина распределения силовых линий и плотности тока по поверхности детали в случае использования в конструкции индуктора специальных магнитопроводов из магнитомягких материалов (рис. 2).

Расчетами установлено, что благодаря применению магнитопровода удается «выдавить» ток на поверхность индукционного витка и получить равномерное распределение плотности тока по поверхности детали на глубину до 2–5 мм в зависимости от частоты и мощности источника нагрева. Моделирование также показало, что на торцах детали плотность тока гораздо выше, чем по центру, и это необходимо учитывать для предотвращения оплавления и перегрева краев. Исходя из полученного результата была разработана оптимальная конструкция индукторов для всей номенклатуры деталей подвески автомобилей БЕЛАЗ. Конструктивные особенности одного из типов индукторов представлены на рис. 3.

В качестве магнитопровода в конструкции индуктора были применены высокочастотные магнитомягкие материалы на основе ферритов различного состава (Mn–Zn, Ni–Zn). Главной характеристикой таких материалов является магнитная индукция насыщения. Данная величина

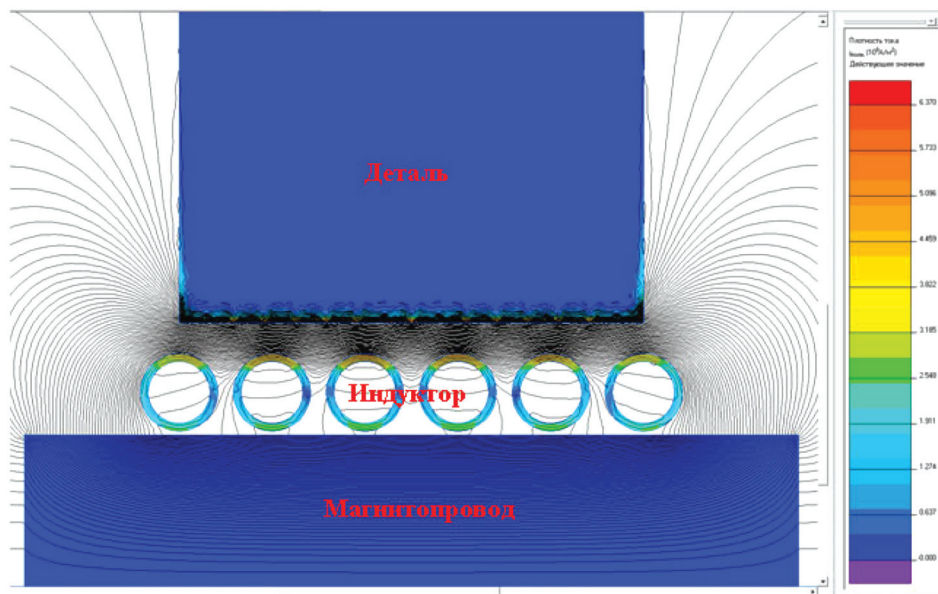


Рис. 2. Распределение силовых линий тока на внутренней поверхности детали

Fig. 2. Distribution of current lines on the inner surface of the detail

характеризует энергоёмкость материала, то есть при бесконечном росте напряженности магнитного поля значение магнитной индукции в магнитопроводе не превысит величину, определяемую свойствами материала. Если поместить медный проводник прямоугольного сечения с переменным током в паз магнитопровода, то магнитный поток будет стремиться пройти по пути меньшего сопротивления – по магнитопроводу, где выше магнитная проницаемость. Соответственно ЭДС самоиндукции и сопротивление тока будут больше на участках проводника, прилегающих ко дну паза магнитопровода. На участках, лежащих на поверхности, не охваченной магнитопроводом, ЭДС самоиндукции и сопротивление тока меньше. Следовательно, произойдет перераспределение плотности тока по сечению проводника, и ток будет стремиться протекать по стороне проводника, не контактирующей с магнитопроводом.

Таким образом, создание вокруг проводника разомкнутой магнитной цепи (магнитопровода) позволяет достичь требуемого перераспределения тока по сечению проводника. Поэтому,

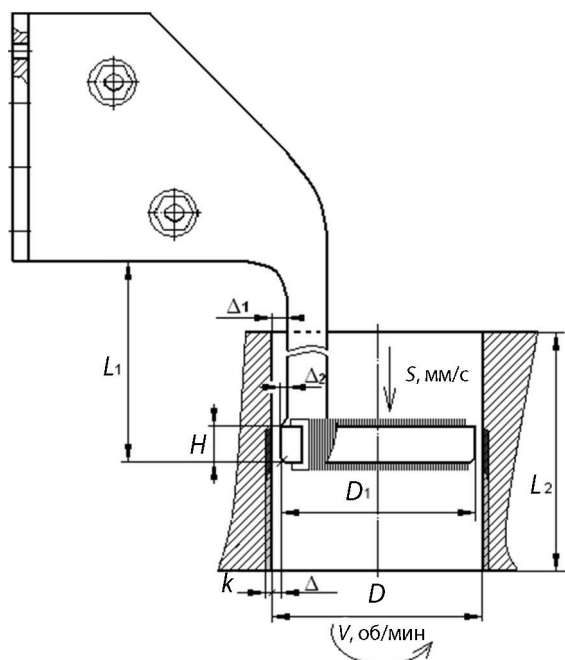


Рис. 3. Конструкторская схема одновиткового индуктора со спреером и магнитопроводом для закалки внутренних цилиндрических отверстий: D – диаметр закаливаемой поверхности, D_1 – наружный диаметр индукционного витка, H – высота индукционного витка и внутреннее окно магнитопровода, Δ – зазор между индукционным витком и закаливаемой поверхностью, Δ_1 – зазор между токоподводящими шинами и закаливаемой поверхностью, Δ_2 – величина смещения индукционного витка к токоподводящим шинам, L_1 – длина токоподводящих шин, L_2 – длина закаливаемой поверхности, k – толщина закаленного слоя

Fig. 3. Design scheme of the single-turn inductor with a sprayer and a magnetic circuit for hardening internal cylindrical holes: D – diameter of the surface to be hardened, D_1 – outer diameter of the induction loop, H – height of the induction loop and inner window of the magnetic circuit, Δ – gap between the induction loop and the hardened surface, Δ_1 – gap between the current-carrying bars and the hardened surface, Δ_2 – displacement value of the induction loop to the current-carrying busbars, L_1 – length of the current-carrying busbars, L_2 – length of the hardened surface, k – thickness of the hardened layer

используя П-образный магнитопровод, обращенный открытой стороной к внешней части витка в индукционном витке, свернутом в виде кольца, можно «заставить» протекать ток не по внутренней, а по внешней стороне витка.

Промышленную апробацию разработанной технологии и оборудования осуществляли на деталях, представленных в таблице.

Сравнение требований документации и экспериментальных результатов
Comparison of documentation requirements and experimental results

Наименование детали (номер чертежа (КД) на деталь)	Наименование параметра	Показатель параметра	
		по требованию чертежей	по результатам испытаний
Штанга подвески (7540-2909 054)	Твердость	≥ 40 HRC	48–55 HRC
	Глубина закалки	–	3,2–4,7 мм
	Микроструктура закаленного слоя	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит
Крышка цилиндра (75 132-3 429 057)	Твердость	40–50 HRC	42–46 HRC
	Глубина закалки	1,8–5,3 мм	2,5–3,3 мм
	Микроструктура закаленного слоя	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит	Мелкоигольчатый мартенсит
Наконечник (7513-3003 060)	Твердость,	40–50 HRC	43–48 HRC
	Глубина закалки	1,8–5,3 мм	2,4–3,6 мм
	Микроструктура закаленного слоя	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит	Мелкоигольчатый мартенсит
Штанга подвески (75 570-2909 016)	Твердость	≥ 42 HRC	46–53 HRC
	Глубина закалки	≥ 3,3 мм	3,8 мм
	Микроструктура закаленного слоя	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит	Среднеигольчатый мартенсит
Штанга подвески (75 600-2919 016)	Твердость	≥ 42 HRC	44–54 HRC
	Глубина закалки	≥ 3,3 мм	3,8 мм
	Микроструктура закаленного слоя	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит	Среднеигольчатый мартенсит
Шток (75 710-3 429 048)	Твердость	47–56 HRC	49–53 HRC
	Глубина закалки	1,8–5,3 мм	2,3–4,2 мм
	Микроструктура закаленного слоя	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит	Среднеигольчатый мартенсит
Шток (75 570-3 429 048)	Твердость	≥ 47 HRC	52–55 HRC
	Глубина закалки	1,8–5,3 мм	2,2–2,5 мм
	Микроструктура закаленного слоя	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит	Мелкоигольчатый мартенсит
Крышка (75 306-8 603 056)	Твердость	40–54 HRC	43–46 HRC
	Глубина закалки	1,8–5,3 мм	2,8–3,3 мм
	Микроструктура закаленного слоя	Мелкоигольчатый, среднеигольчатый мартенсит	Среднеигольчатый мартенсит

После поверхностной индукционной закалки детали разрезали в поперечном и продольном направлениях, исследовали макро- и микроструктуру, измеряли распределение твердости в поверхностно-закаленных слоях. Было установлено, что зона закалки располагается по всей длине отверстия равномерно, твердость поверхности и глубину закаленного слоя можно варьировать в зависимости от требований в широких пределах 40–58 HRC и 2–5 мм соответственно (рис. 4). По торцам глубина закаленного слоя всегда выше за счет краевого эффекта, чем по основному телу детали. Изменяя форму магнитопровода, можно снизить глубину закалки на торцах, предотвратить появление трещин и исключить хрупкое выкашивание края детали.

Установлено, что микроструктура поверхностно-закаленного слоя в центральной части на глубине до 2–3 мм представляет собой однородный мартенсит с мелкодисперсными включениями

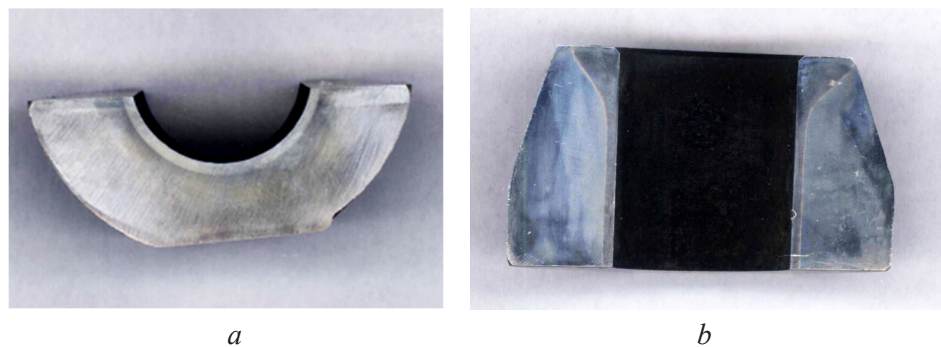


Рис. 4. Макроструктура поверхностно упрочненного слоя внутреннего отверстия в продольном (*a*) и поперечном сечении (*b*)

Fig. 4. Macrostructure of the surface-hardened layer of the inner hole in the longitudinal (*a*) and cross section (*b*)

цементита по границам зерен (рис. 5, *a, b*). На глубине 3–5 мм (рис. 5, *c*) наблюдается переходная зона, в структуре которой наряду с мартенситом появляется троостит и нерастворенные зерна феррита. Микроструктура основы детали представляет собой феррито-перлитную матрицу со средним балом зерна 7–8 (ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна»), сформированную в результате предварительной нормализации.

Технология лазерного упрочнения. Вторым оригинальным методом поверхностного упрочнения внутренних отверстий, внедренным на ОАО «БЕЛАЗ», является лазерный нагрев. Лазерные технологии имеют ряд преимуществ перед традиционными способами повышения износостойкости тяжело нагруженных деталей, поскольку позволяют реализовывать термические процессы со сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения поверхностного слоя и обеспечивают возможность локальной термообработки рабочих поверхностей деталей без их объемного разогрева.

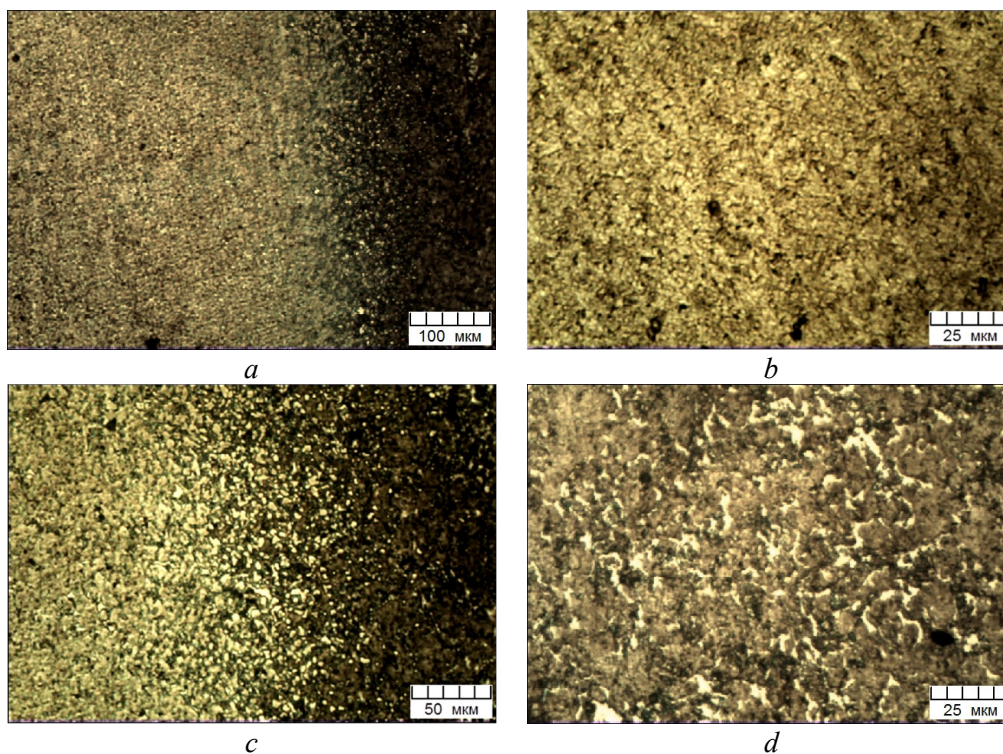


Рис. 5. Микроструктура закаленной зоны внутреннего отверстия: *a* – макроструктура поверхностно-закаленного слоя, *b* – микроструктура поверхностно-закаленного слоя, *c* – переходная зона, *d* – микроструктура основного металла

Fig. 5. Microstructure of the hardened zone of the inner hole: *a* – macrostructure of the surface-hardened layer, *b* – microstructure of the surface-hardened layer, *c* – transition zone, *d* – microstructure of the base metal

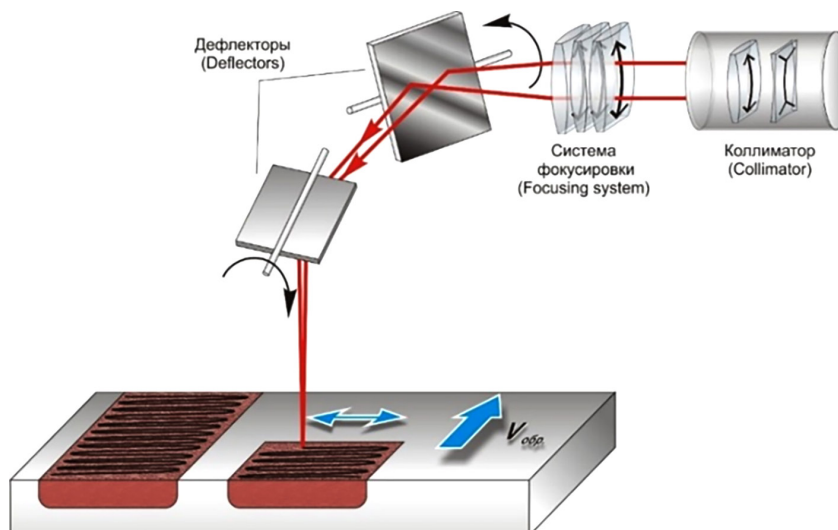


Рис. 6. Схема адаптивной оптической системы [12]

Fig. 6. Scheme of the adaptive optical system [12]

Сотрудниками Белорусского национального технического университета и ООО «Рухсервомотор» выполнен комплекс работ по разработке технологии лазерного упрочнения излучением иттербиевого оптоволоконного лазера. В разработанном технологическом комплексе для лазерной поверхностной обработки высокое качество, вплоть до возможности применения операции лазерного поверхностного упрочнения в качестве чистовой обработки, обеспечивается за счет использования не имеющей аналогов в мире адаптивной оптической системы. Такая система позволяет регулировать распределение энергии по сечению пятна лазерного воздействия на поверхности заготовки.

Генерируемый в оптоволоконном лазере луч (рис. 6) транспортируется через оптоволокно в специальную оптическую головку. Проходя через коллиматор, он преобразуется в параллельный пучок диаметром 10 мм, а затем направляется на два зеркала, которые встроены в сканирующую однокоординатную систему, обеспечивающую согласованное сканирование во взаимно перпендикулярных направлениях. Управляющая программа движения зеркал встроена в управляющую программу лазерного технологического комплекса. Далее луч через фокусирующую и поворотную оптику транспортируется в зону обработки.

Учитывая тот факт, что твердотельные лазеры имеют высокую частоту модуляции излучения, то есть позволяют менять мощность излучения с очень высокой частотой, появляется вариант программного изменения мощности в течение каждого цикла сканирования, что обеспечивает возможность сканирования «псевдопятна» с требуемым распределением энергии по его площади.

Так как тепловые процессы обладают определенной степенью инерционности, существует минимальная частота сканирования, выше которой нарисованное «псевдопятно» можно с определенной степенью точности рассматривать как стационарное (рис. 7). При этом следует учитывать, что инерционностью также обладает меха-

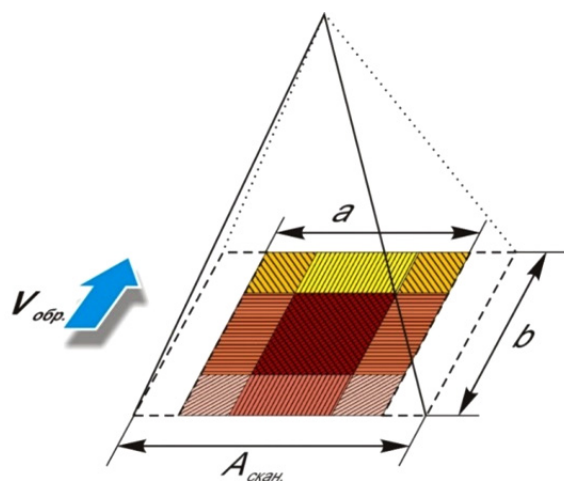


Рис. 7. Схема сформированного на поверхности заготовки «псевдопятна» лазерного воздействия; a и b – геометрические размеры пятна, $V_{обп}$ – скорость сканирования, $A_{скан.}$ – амплитуда сканирования [12]
 Fig. 7. Scheme of the “pseudo-spot” of laser action formed on the surface of the workpiece; a and b – the geometric dimensions of the spot, $V_{обп}$ – the scanning speed, $A_{скан.}$ – the scanning amplitude [12]

нический привод зеркал, поэтому возникает ограничение по максимальной частоте сканирования. Исходя из приведенных ограничений в установке использовались частоты сканирования в пределах 200–230 Гц.

Для удобства управления энергетическими параметрами лазерной обработки в производственных условиях «псевдопятно» зоны лазерного воздействия представляло собой прямоугольник с девятью зонами, размерами которых можно было варьировать. В данных зонах устанавливались требуемые уровни плотности мощности путем изменения мощности излучения с использованием управляющей программы технологического комплекса. Указанное распределение энергии описывалось с помощью 14 параметров на диалоговом окне управляющего компьютера.

Оптимизация параметров упрочнения проводилась путем моделирования тепловых полей с последующей экспериментальной верификацией итоговых значений. Важным условием получения корректных расчетных результатов при решении тепловых задач, вызывающим большие затруднения, является адекватное задание исходного распределения энергии по сечению пятна лазерной обработки.

В результате численной реализации тепловых моделей для разных распределений энергии по сечению «псевдопятна» устанавливали характер распределения тепловых полей в процессе лазерного воздействия, а затем – геометрические размеры зон лазерной закалки [12].

Примеры расчетов тепловых полей и зон лазерной закалки при различных распределениях энергии по сечению пятна приведены на рис. 8, 9. В верхней части рис. 8 показаны характер рас-

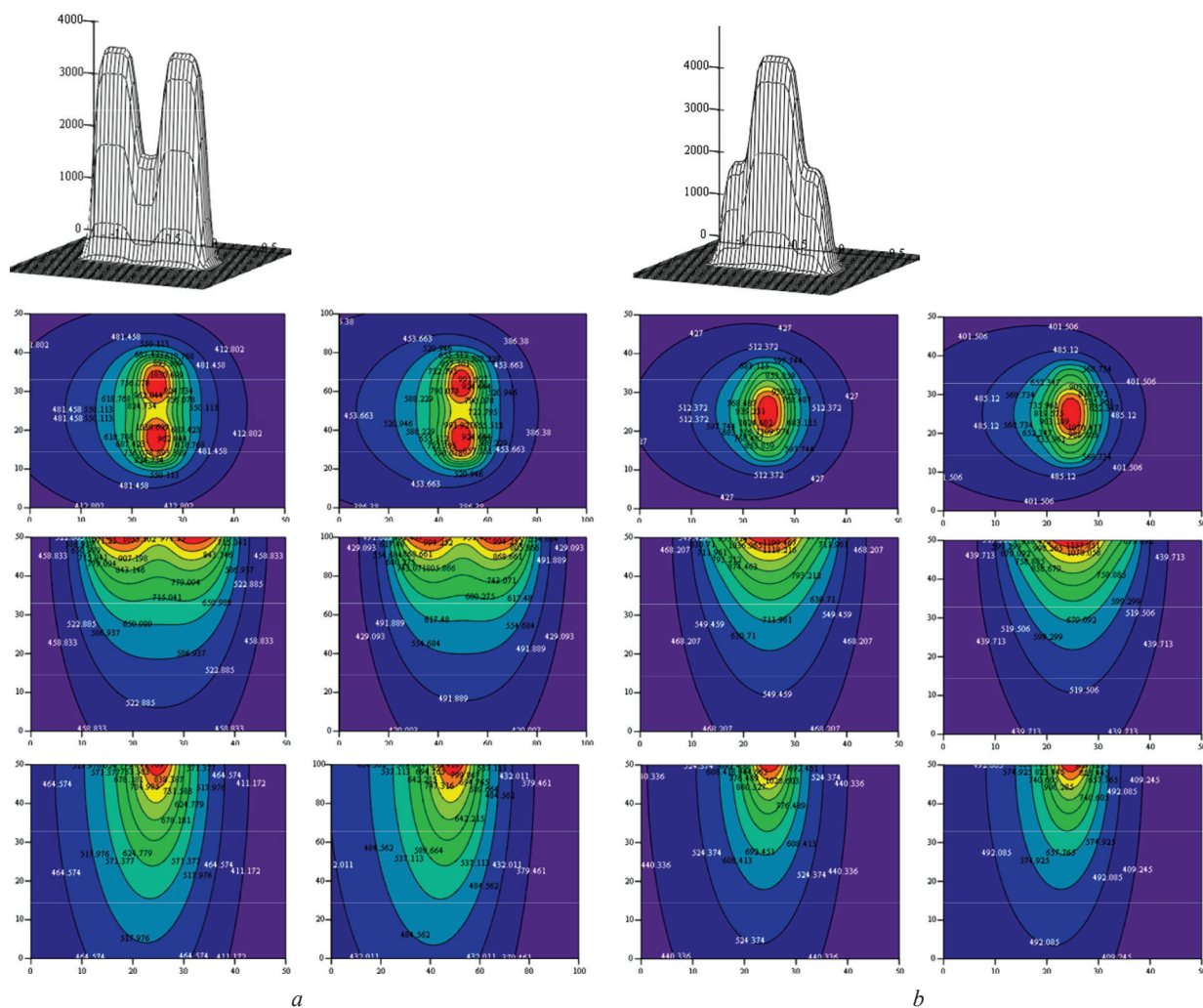


Рис. 8. Результаты расчета тепловых полей при различных распределениях энергии по сечению лазерного пятна: *a* – с энергетическими максимумами по периферии пятна, *b* – с максимумом энергии в центре; $Q = 1 \text{ кВт}$, $v = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$

Fig. 8. Results of calculation of thermal fields at different energy distributions over the cross section of the laser spot: *a* – with energy maxima on the periphery of the spot, *b* – with a maximum of energy in the center; $Q = 1 \text{ kW}$, $v = 1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$

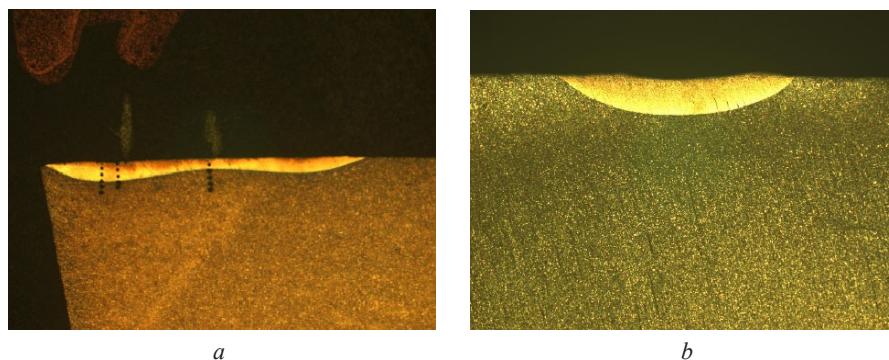


Рис. 9. Примеры различной геометрии зон закалки различных распределениях энергии по сечению лазерного пятна

Fig. 9. Examples of different geometry of quenching zones with different energy distributions over the cross section of the laser spot

пределений энергии по сечению пятна, под ними – соответствующие им распределения тепловых полей в различных проекциях при мощности излучения $Q = 1$ кВт и скорости перемещения луча $v = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Приведенные на рис. 9 макроструктуры зон лазерной закалки для описанных условий лазерной обработки (см. рис. 8) показывают соответствие их геометрии характеру распределения энергии по сечению пятна. Это подтверждает возможность эффективного управления параметрами упрочненных слоев за счет варьирования распределением энергии по сечению лазерного пятна.

В результате выполненных расчетов [13] и экспериментальных исследований была сформирована база данных по влиянию параметров лазерной обработки на геометрические параметры пятна и физико-механические свойства упрочненных зон для разных марок сталей и чугунов. Данные результаты легли в основу создания разработки уникального лазерного комплекса MLS-20-3DF-A для упрочнения деталей «корпус мотор редуктора» и «водило» автомобилей семейства БЕЛАЗ (рис. 10).

Комплекс имеет базовое сварное основание, изготовленное из стального проката, и координатную систему на базе четырех линейных модулей, на которой установлена оптическая головка со сменными поворотными тубусами для вращения луча. Подача обрабатываемых деталей в рабочую зону установки осуществляется на платформе, которая по рельсам с помощью электрического привода закатывается внутрь установки. В качестве источника лазерного излучения

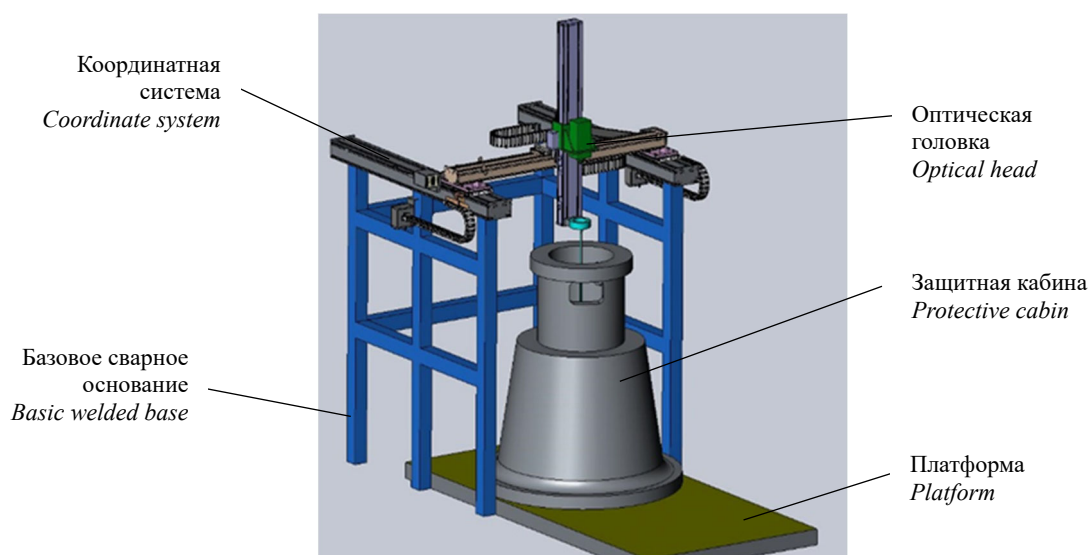


Рис. 10. Кинематическая схема комплекса MLS-20-3DF-A
Fig. 10. Kinematic diagram of the MLS-20-3DF-A complex

использован иттербиевый волоконный лазер ЛС-2 мощностью 2 кВт. Зона обработки детали закрыта защитной кабиной. С боковых сторон кабины применяются защитные экраны. Окна для наблюдения за процессом обработки выполнены из стекла с интерферометрическим покрытием, что обеспечивает необходимую защиту от воздействия лазерного излучения.

Оборудование укомплектовано полуавтоматической системой технического зрения для точного определения положения конструктивных элементов заготовок после их подачи в зону обработки. Технологический комплекс оснащен адаптивной системой настройки станка на геометрию заготовки и лазерным инструментом, позволяющим настраивать в широком диапазоне параметры термической обработки деталей, начиная от щадящих финишных режимов поверхностного упрочнения посадок и заканчивая процессами с высокой удельной энергией (например, наплавка и сварка). Наличие системы цифровой подготовки рабочих программ обработки посадок по модели заготовки позволяет встраивать оборудование в полностью оцифрованные технологические линии с удаленным онлайн-контролем параметров процесса производства.

После обработки деталей, изготовленных из стали 40Л (ГОСТ 977-880 «Отливки стальные. Общие технические условия») на данном оборудовании, были получены следующие свойства внутренней поверхности:

при скорости сканирования 700 мм/с: твердость дорожки лазерного упрочнения – 460–530 НV, глубина дорожки – 0,4 мм, ширина дорожки – 3,7–4,0 мм;

при скорости сканирования 900 мм/с: твердость дорожки лазерного упрочнения – 480–550 НV, глубина дорожки – 0,5 мм, ширина дорожки – 4,7–4,8 мм.

Качество полученных упрочненных слоев полностью соответствует требованиям документации и позволяет увеличить износостойкость поверхности в несколько раз.

Заключение. Методами компьютерного моделирования температурных полей и распределения электромагнитного поля в пространстве и на поверхности детали разработаны и обоснованы две технологии поверхностного упрочнения ответственных деталей подвески тяжелонагруженных машин – индукционного нагрева и лазерного упрочнения.

Полученные результаты могут быть использованы при решении задач упрочнения внутренних поверхностей внешним полем и обеспечения высокого качества и однородности упрочнения поверхностей. Разработанные технологии реализованы на специально разработанном оборудовании и внедрены в производство ОАО «БЕЛАЗ».

Список использованных источников

1. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А. И. Гордиенко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 287 с.
2. Структура и свойства износостойких покрытий: монография / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: БГАТУ, 2006. – 327 с.
3. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий / А. В. Белый [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 457 с.
4. Слухоцкий, А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
5. Николаев, Е. Н. Термическая обработка металлов токами высокой частоты / Е. Н. Николаев, И. М. Коротин. – М.: Высш. шк., 1977. – 207 с.
6. Особенности технологии нагрева при индукционной термообработке внешним электромагнитным полем / И. И. Вегера [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – № 1. – С. 54–61. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-54-61>
7. Специальные магнитные материалы и практика их применения при высокочастотном индукционном нагреве / А. К. Вечер [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 2 кн. / редкол.: В. Г. Залеский [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларусі, 2021. – Кн. 2: Электротехнологии. – С. 59–72.
8. Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Рубаника. – Минск: Изд. центр БГУ, 2021. – Гл. 43: Моделирование, расчет и разработка процессов высокочастотной термообработки шлицевых поверхностей. – С. 638–652.
9. Effect of laser-discrete-quenching on bonding properties of electroplated grinding wheel with AISI 1045 steel substrate and nickel bond / Cong Mao [et al.] // Chin. J. Aeronautics. – 2021. – Vol. 34, iss. 6. – P. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.010>
10. Sensitivity Analysis of Laser Quenching Parameters of ASTM 1045 of Disk Laser Based on Response Surface Method / Zhibin Yu [et al.] // Met. Mater. Int. – 2019. – Vol. 27, iss. 5. – P. 1236–1251. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00437-6>

11. Hung, T.-P. Investigation of Surface Residual Stress for Medium Carbon Steel Quenched by YAG Laser with Extended Cycloidal Motion / T.-P. Hung, H.-A. Tsai, A.-D. Lin // *Metals*. – 2022. – Vol. 12, iss. 11. – Art. ID 1903. <https://doi.org/10.3390/met12111903>
12. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>

References

1. Gordienko A. I., Gurchenko P. S., Mikhlyuk A. I., Vegeera I. I. *Processing of Mechanical Engineering Products Using Induction Heating*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 287 p. (in Russian).
2. Vityaz' P. A., Kozhuro L. M., Il'yushchenko A. F., Devoino O. G., Kardapolova M. A. *Structure and Properties of Wear-Resistant Coatings*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2006. 327 p. (in Russian).
3. Belyi A. V., Kalinichenko A. S., Devoino O. G., Kukareko V. A. *Surface Engineering of Structural Materials Using Plasma and Beam Technologies*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 457 p. (in Russian).
4. Slukhotskii A. E., Ryskin S. E. *Inductors for Induction Heating*. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 264 p. (in Russian).
5. Nikolaev E. N., Korotin I. M. *Heat Treatment of Metals with High Frequency Currents*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 207 p. (in Russian).
6. Vegeera I. I., Zizika A. V., Tsykunou P. Y., Yakovich V. M. Features of heating technology at inductionthermal processing with external electromagnetic field. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 54–61 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-54-61>
7. Vecher A. K., Govor G. A., Demidenko O. F., Vegeera I. I., Ziziko A. V. Special magnetic materials and the practice of their application in high-frequency induction heating. Zaleskii V. G. et al., eds. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnykh trudov. Kniga 2: Elektrotekhnologii* [Modern Methods and Technologies of Creation and Processing of Materials: A Collection of Scientific Papers. Book 2: Electrical Technologies]. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 2021, pp. 59–72 (in Russian).
8. Rubanik V. V. (ed.). *Promising Materials and Technologies. Chapter 43: Modeling, Calculation and Development of Processes of High-Frequency Heat Treatment of Spline Surfaces*. Minsk, BSU Publishing Center, 2021, pp. 638–652 (in Russian).
9. Mao Cong, Cai Peihao, Hu Yongle, Zhong Yujie, Wei Jishuang, Bi Zhuming, Jiang Yifeng [et al.]. Effect of laser-discrete-quenching on bonding properties of electroplated grinding wheel with AISI 1045 steel substrate and nickel bond. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, vol. 34, iss. 6, pp. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.010>
10. Yu Zhibin, Li Chang, Chen Zhengwei, Li Yunfei, Han Xing. Sensitivity Analysis of Laser Quenching Parameters of ASTM 1045 of Disk Laser Based on Response Surface Method. *Metals and Materials International*, 2019, vol. 27, iss. 5, pp. 1236–1251. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00437-6>
11. Hung T.-P., Tsai H.-A., Lin A.-D. Investigation of Surface Residual Stress for Medium Carbon Steel Quenched by YAG Laser with Extended Cycloidal Motion. *Metals*, 2022, vol. 12, iss. 11, art. ID 1903. <https://doi.org/10.3390/met12111903>.
12. Devoino O. G., Zarski V. V., Pilipchuk A. P. Simulation of surface hardening using a fiber-optic laserscanning. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 435–443 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>