



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-323-330

EDN: RARIXZ

УДК 621.78

Научная статья / Research article

Лазерное термоупрочнение колес зубчатых, изготовленных из порошковых материалов

Д.А. Разин^a , И.С. Печников^b , К.А. Фролов^b , А.Б. Люхтер^b 

^a Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Российская Федерация

^b Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

✉ denisrazintv@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 16 апреля 2023 г.

Доработана: 14 июля 2023 г.

Принята к публикации: 18 июля 2023 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. Сложно представить современное машиностроение без своевременного и точечного совершенствования технологических процессов, в связи с чем появляются новые и улучшаются традиционные методы изготовления и обработки различного рода конструкций и деталей. Одним из путей снижения экономических затрат на механическую обработку зубчатых колес, изготовленных традиционными методами, является переход в область порошковой металлургии — порошковое спекание. Представлена возможность локального повышения механических свойств зубчатых колес, изготовленных методом порошкового спекания, с помощью лазерной обработки. Лазерная обработка проводилась на роботизированном комплексе сварки и термоупрочнения, который включает в себя 6-осевой промышленный робот, 2-осевой сварочный позиционер, лазерную головку и иттербиевый волоконный лазер мощностью 5 кВт. Высокая, относительно литых заготовок, пористость спеченного материала является фактором, ограничивающим возможность использования лазерного термоупрочнения, так как способствует повышению вероятности оплавления кромок обрабатываемых поверхностей. Настоящая работа направлена на решение данной проблемы. Перед проведением экспериментов были выделены основные критерии качества: «отсутствие оплавления» и «глубина упрочнения». В ходе проводимой серии экспериментов по лазерному термическому упрочнению удалось существенно повысить твердость образцов (в состоянии поставки около 30 HRC), которая после обработки находится в диапазоне от 55 до 65 HRC глубиной до 2800 мкм на зубьях шестерен, изготовленных из порошковых материалов. Однако остаются открытыми вопросы, находящие решение в проведении эксплуатационных испытаний, таких как долговечность и износ.

Ключевые слова: порошковая металлургия, лазерное термическое упрочнение, колесо зубчатое, закалка, металлографическое исследование

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

© Разин Д.А., Печников И.С., Фролов К.А., Люхтер А.Б., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования

Разин Д.А., Печников И.С., Фролов К.А., Люхтер А.Б. Лазерное термоупрочнение колес зубчатых, изготовленных из порошковых материалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 323–330. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-323-330>

Laser thermal hardening of gear wheels manufactured from powder materials

Denis A. Razin^a , Iliya S. Pechnikov^b , Kirill A. Frolov^b , Alexander B. Lyukhter^b 

^a National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

^b Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

✉ denisrazintv@gmail.com

Article history

Received: April 16, 2023

Revised: July 14, 2023

Accepted: July 18, 2023

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. It is difficult to imagine modern mechanical engineering without timely and targeted improvement of technological processes, in connection with which new and enhanced traditional methods of manufacturing and processing various types of structures and parts are being developed. One of the ways to reduce the economic costs of machining gears made by traditional methods is the transition to the field of powder metallurgy — powder sintering. This paper presents the possibility of a local increase in the mechanical properties of gears made by powder sintering using laser processing. Laser processing was carried out on a robotic welding and heat strengthening complex, which includes a 6-axis industrial robot, a 2-axis welding positioner, a laser head and a 5 kV ytterbium fiber laser. The high porosity of the sintered material compared to cast billets is a factor limiting the possibility of using laser thermal hardening, as it increases the likelihood of melting the edges of the machined surfaces. The present work is aimed at solving this problem. Before carrying out the experiments, the main quality criteria were identified: “no melting” and “hardening depth”. In the course of a series of experiments on laser thermal hardening, it was possible to significantly increase the hardness of the samples (in the delivered state about 30 HRC), which after processing is in the range from 55 to 65 HRC with a depth of up to 2800 μm on gear teeth made of powder materials. However, open questions remain, which are resolved in performance testing, such as durability and wear.

Keywords: powder metallurgy, laser thermal hardening, gear wheel, hardening, metallographic examination, hardness, microhardness

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state task in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FZUN-2020-0015, state task of the VIGU).

For citation

Razin DA, Pechnikov IS, Frolov KA, Lyukhter AB. Laser thermal hardening of gear wheels manufactured from powder materials. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):323–330. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-323-330>

Введение

Работа по оптимизации технологических процессов не прекращается. Постоянно требуется улучшение существующих технологий [1; 2] и создаются новые с целью снижения финансовых и временных затрат на получение конечного продукта.

Процесс изготовления зубчатых колес традиционными методами являются весьма трудо-

затратными. Альтернативным вариантом получения заготовок для зубчатых колес является порошковая металлургия (ПМ).

ПМ обладает рядом преимуществ перед классическими способами получения заготовок зубчатых колес [3; 4]. Среди них следует выделить коэффициент использования сырья, близкий к единице, и значительное упрощение механической обработки заготовки либо полное избавление от данной операции.

Среди имеющихся разнообразных способов обработки металлов ПМ занимает свое особое место, так как позволяет не только производить изделия различных форм и назначений, но и создавать принципиально новые материалы, получить которые иным путем крайне трудно или вообще невозможно.

ПМ успешно конкурирует с литьем, обработкой давлением, резанием и другими методами получения изделий, дополняя или заменяя каждую из них. Являясь одной из молодых отраслей производства порошковая металлургия одновременно и есть древнейший способ получения изделий.

Процесс порошковой металлургии имеет много преимуществ по сравнению с другими технологиями формования металлов давлением, такими какковка, литье металла или механическая обработка.

Во-первых, ПМ выделяется своей экономической эффективностью [5], это выражается в значительном сокращении постпроизводственных процессов, что существенно снижает потери металла в производстве и, следовательно, снижает общие затраты. Кроме того, процесс имеет более низкое энергопотребление по сравнению с другими технологиями производства.

Во-вторых, ПМ позволяет обеспечить уникальность продукции благодаря высокой гибкости, то есть возможно адаптирование сплавов и физических характеристик в соответствии с требованиями. Производя детали с повторяемыми однородными структурами материала, процесс порошковой металлургии позволяет изготавливать конструкционные металлические компоненты с высокой точностью и согласованностью механического поведения для широкой области применения [5–7].

Порошковая металлургия используется для изготовления уникальных материалов с индивидуальными свойствами, которые невозможно достичь, используя классические способы плавления или формования изделий другими методами [8; 9]. Это позволяет получать композитные материалы из металлов, которые было бы невозможно смешивать иными методами, и обрабатывать материалы с высокой температурой плавления.

Важнейшим преимуществом порошковой металлургии является гибкость, которая включает в себя возможность контроля пористости,

регулирования параметров прочности, позволяет достичь в зависимости от функциональной особенности изделия желаемых изотропных и анизотропных свойств, также обладает уникальными магнитными свойствами и высокими значениями износостойкости, высокой повторяемостью и точностью при серийном производстве.

Методом порошковой металлургии возможно и изготовление колес зубчатой передачи, которые являются неотъемлемой частью огромного числа конструкций.

Основными проблемами изготовления зубчатых колес традиционными методами являются высокая стоимость и сложность их изготовления. В снижении стоимости изготовления способны помочь технологии порошковой металлургии.

Вдобавок дополнительным способом снижения экономических затрат на изготовление и замену вышедших из строя зубчатых колес является повышение износостойкости и, соответственно, долговечности их контактных поверхностей путем объемного либо локального упрочнения. В настоящее время известно множество методов упрочнения зубчатых колес, основными из которых являются закалка, улучшение, цементация, азотирование, нитроцементация, накатывание, электромеханическая обработка, цианирование, ультразвуковая обработка.

И хотя некоторые из перечисленных методов имеют достаточно хорошие показатели, общим недостатком каждого из них является образование на поверхности, вследствие термических или других видов воздействия, хаотичных, случайно расположенных микрорельефов, которые в процессе работы, особенно в период приработки, изнашиваются наиболее интенсивно, образуя абразивные частицы и снижая поверхностную прочность материалов.

Другим недостатком большинства методов упрочнения зубчатых колес является появление необходимости последующей (финишной) механической обработки ввиду температурных деформаций. Для зубчатых колес зачастую устанавливаются высокие качества точности, которые не позволяют применять изделия даже с незначительными деформациями. Необходимость проведения финишной обработки после операции упрочнения, помимо того, что это дополнительная операция, требует наличия специали-

зированной дорогостоящего инструмента, способного обрабатывать поверхности с твердостью 50 HRC и более.

Лазерное термоупрочнение (ЛТУ) [11], за счет локальности и времени нагрева, позволяет практически полностью избежать данных недостатков. Важно заметить, что зубчатые колеса после операции ЛТУ не нуждаются в дополнительной обработке, так как температурные деформации [12] от процесса ЛТУ находятся в диапазоне от 5 до 100 мкм.

К преимуществам технологии лазерного термического упрочнения также необходимо отнести низкое время обработки [13] (сам процесс обработки зуба длится несколько секунд, после чего происходит переход на другой зуб и при этом достигаются высокие значения твердости (более 50 HRC).

Лазерная закалка обеспечивает высокие скорости нагрева, которая сводит к минимуму риск деградации основного материала. Самозакалка основана на отводе тепла от поверхности в сердцевину детали путем теплопроводности вместо обычного охлаждения распылением воды [14].

Как и любая технология, лазерное термоупрочнение обладает рядом недостатков и ограничений, среди которых наиболее значимыми являются:

- высокие требования к качеству упрочняемой поверхности и к идентичности геометрических размеров изделий из одной партии;

- необходимость осуществлять подбор параметров упрочнения (скорость обработки, мощность лазерного излучения, размер пятна) для каждой позиции номенклатуры изделий, в зависимости от материала, размера зубьев и т.д. Необходимо заметить, что влияние данного фактора постоянно снижается за счет наработки базы данных режимов обработки конкретных материалов и сложных поверхностей.

Несмотря на эти недостатки, ЛТУ является одной из наиболее перспективных [15] технологий локального повышения механических свойств изделий.

Одним из недостатков изделий, изготовленных методами порошковой металлургии, является их высокая склонность к коррозии, обусловленная высокой пористостью после спекания. Микропоры в деталях, изготовленные методом порошковой металлургии, могут приводить

к ухудшению характеристик, вплоть до их полной непригодности в эксплуатации. Для уменьшения пор в деталях увеличивают их плотность, давление при прессовании, уменьшают размеры частиц порошка [16].

Образцы зубчатого колеса (рис. 1) изготовлены методом порошковой металлургии. Изделия, полученные из порошковых материалов, как правило, имеют микродефекты (несплошности, поры), что вызывает ряд нерешенных вопросов при обработке. Пористые материалы более склонны к оплавлению, чем изделия из металла, изготовленного по другим технологиям (литье, прокат). Это связано с тем, что наличие микродефектов в основном металле способно локально снизить теплопроводность, что приводит к местному перегреву и, соответственно, оплавлению.



Рис. 1. Внешний вид исследуемых зубчатых колес
Источник: фото Д.А. Разина

Figure 1. The appearance of the investigated gears
Source: photo by D.A. Razin

1. Методы исследования

Важнейшим критерием повторяемости результатов при лазерном термическом упрочнении является соответствие элементного состава обрабатываемого изделия, поэтому образцы предварительно прошли контроль химического состава с помощью лазерно-искрового эмиссионного спектрометра «Эланик».

Для упрочнения образцов был использован роботизированный комплекс сварки и термоупрочнения, включающий в себя 6-осевой промышленный робот компании Fanuc, лазерную головку, 2-осевой позиционер и иттербиевый волоконный лазер производства ООО НТО «ИРЭ-Полус» мощностью 5 кВт.

При проведении экспериментальных работ были выбраны два вида зубчатых колес, выпол-

ненных из порошкового материала: косозубое (рис. 1, а) и прямозубое (рис. 1, б).

Оценка наличия оплава поверхности зубчатых колес проводилась методом визуального контроля. Образцы, на поверхности которых были обнаружены следы оплава, не допускались к дальнейшему исследованию.

Критерием качества упрочнения были выбраны следующие показатели: отсутствие оплава кромок, глубина и твердость упрочненной зоны.

Глубина упрочнения оценивалась путем проведения металлографических исследований на микроскопе LEICA DM ILM, в ходе которых выбранное поперечное сечение образца проходило пробоподготовку, а затем осуществлялась

химическая обработка микрошлифа в четырехпроцентном нитале для выявления очертания зоны упрочнения. Замеры микротвердости проводились на ПМТ-3 на шлифе образца до осуществления химического вытравливания упрочненной зоны во избежание погрешности, вносимой раствором кислоты.

2. Результаты исследования

В ходе выполнения исследовательской работы была проведена серия экспериментов по лазерному термоупрочнению. В рамках проведенных экспериментов были отобраны наиболее приемлемые три режима обработки, которые удовлетворяли проведенному визуальному контролю (отсутствовало оплавление).



Рис. 2. Демонстрация зон замера микротвердости на образцах зубчатых колес
Источники: общая разработка авторов статьи Д.А. Разина и К.А. Фролова
Figure 2. Demonstration of microhardness measurement zones on gear samples
Source: general development of the authors of the article D.A. Razin and K.A. Frolov

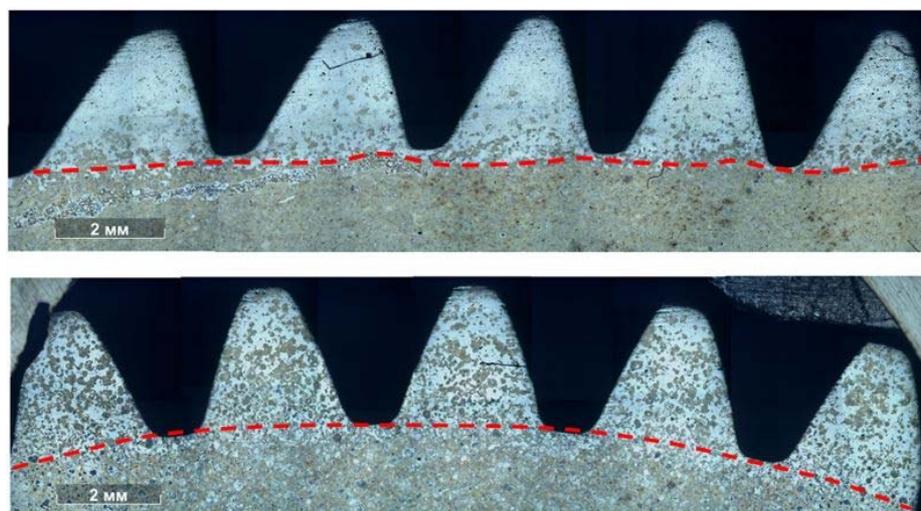


Рис. 3. Металлографические снимки образцов после травления, красной пунктирной линией выделена зона температурных структурных превращений
Источники: общая разработка авторов статьи Д.А. Разина и К.А. Фролова
Figure 3. Metallographic images of samples after etching, the zone of temperature structural transformations is marked with a red dotted line
Source: general development of the authors of the article D.A. Razin and K.A. Frolov

Замер микротвердости производили в нескольких направлениях с шагом в 100 мкм от края зуба. Для оценки глубины зоны упрочнения, от каждого замера микротвердости проводился перпендикуляр к плоскости, подверженной лазерному излучению. На рис. 2 указаны зоны замеры микротвердости образцов зубчатых колес после лазерного термоупрочнения, выполненных из порошкового материала.

На рис. 3 представлены металлографические снимки образцов после операции химического травления в 4 %-ном нитале, пунктирной линией выделена граница температурных структурных изменений.

Образцы в состоянии поставки имели значения твердости ниже 30 HRC. После лазерной обработки на поверхности значения твердости значительно возросли.

На исследуемых образцах зубчатых колес, изготовленных методом порошковой металлургии с обработкой в виде лазерного термоупрочнения, значение твердости упрочненного слоя лежит в диапазоне от 55 до 65 HRC на глубину до 2800 мкм (рис. 4).

На рис. 4 представлен усреднённый график распределения твердости на образцах зубчатых колес после упрочнения.

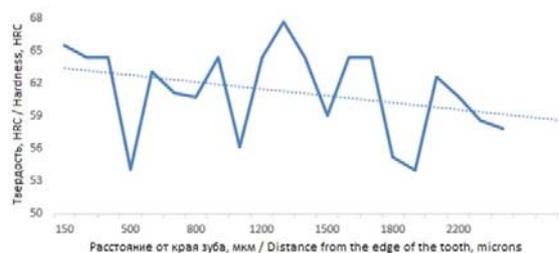


Рис. 4. График распределения микротвёрдости по глубине упрочненной зоны

Источники: общая разработка авторов статьи Д.А. Разина и К.А. Фролова

Figure 4. Graph of distribution of microhardness over the depth of the hardened zone

Source: general development of the authors of the article D.A. Razin and K.A. Frolov

Образцы зубчатых колес удалось упрочнить без значительного изменения геометрических параметров зубьев и, таким образом, удовлетворить требованиям визуально-измерительного контроля, при том, что модуль исследуемых зубьев составлял 1,25.

Далее упрочненные опытные образцы были направлены индустриальному партнеру для про-

ведения эксплуатационных испытаний, таких как долговечность и износ.

Заключение

Подводя итог выполненной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Порошковую металлургию можно считать практически безотходным производством, также она имеет ряд преимуществ, которые были описаны в работе, перед традиционными методами обработки зубчатых колес.

2. Предложенный в данной работе метод упрочнения зубчатых колес может быть применим и должен быть использован в определенных условиях.

3. Локальная закалка методом ЛТУ может повысить механические характеристики зубчатых колес. В работе показана возможность локального достижения твердости контактных поверхностей зубчатых колес, изготовленных из порошковых материалов до 55–65 HRC при изначальных значениях до 30 HRC в состоянии поставки.

4. Снижение пористости исходного порошкового материала позволило бы существенно расширить область технологических режимов, потенциально пригодных для обработки.

Настоящая работа доказывает возможность применения лазерного термоупрочнения в порошковой металлургии, а также указывает на возможные проблемы применения технологии лазерного термического упрочнения зубчатых колес, изготовленных методами порошковой металлургии.

Список литературы

1. *Аборкин А.В., Бабин Д.М., Бокарев Д.В., Елкин А.И.* Влияние отжига на структуру и свойства алюмоматричных композитов, упрочненных WC1-x/УНТ структурами // Сборник трудов V Международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ — 2020)». Москва, 27–29 октября 2020 г. С. 3–6.

2. *Aborkin A., Khorkov K., Prusov E., Ob'edkov A., Kremlev K., Perezhogin I., Alymov M.* Effect of Increasing the Strength of Aluminum Matrix Nanocomposites Reinforced with Microadditions of Multiwalled Carbon Nanotubes Coated with TiC Nanoparticle // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9. Is. 11. Article 1596. <https://doi.org/10.3390/nano9111596>

3. Animesh B., Eisen W.B. Hot Consolidation of Powders & Particulates. Metal Powder Industries Federation, Princeton, USA, 2003. 254 p.

4. German R.M. (Ed.) Powder Metallurgy Science, 2nd ed.; Metal Powder Industries Federation: Princeton, NJ, USA, 1994. 472 p.

5. Hidalgo A.A., Frykholm R., Ebel T., Pyczak F. Powder Metallurgy Strategies to Improve Properties and Processing of Titanium Alloys: A Review // *Advanced Engineering Materials*. 2017. Vol. 19. Is. 6. Article 1600743. <https://doi.org/10.1002/adem.201600743>

6. Bolzoni L. Sintering of Titanium Alloys. Processing and Properties // *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. 2022. Vol. 3. P. 353–361. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00081-8>

7. Bolzoni L., Ruiz-Navas E.M., Gordo E. Understanding the properties of low-cost iron-containing powder metallurgy titanium alloys // *Materials and Design*. 2016. Vol. 110. P. 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.010>

8. Bocanegra-Bernal M.H. Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics // *Journal of materials science*. 2004. Vol. 39. No. 21. P. 6399–6420. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000044878.11441.90>

9. Schatt W., Wieters K.-P. Powder metallurgy: processing and materials. European powder metallurgy association. EPMA Publ.; 1997.

10. Бжитских А.П. Повышение износостойкости зубчатой передачи привода буровой лебедки на основе регулярного микрорельефа поверхности зубьев // Сборник трудов конференции «Геология и нефтегазозносность западносибирского мегабассейна (опыт, инновации)» Тюмень, 10–11 декабря 2014 года. Изд-во: Тюменский индустриальный университет. 2014. С. 19–23.

11. Frerichs F., Lu Y., Lübben T., Radel T. Process Signature for Laser Hardening // *Metals*. 2021. No. 11. Article 465. <https://doi.org/10.3390/met11030465>

12. Zhang H., Shi Y., Xu C.Y., Kutsuna M. Surface Hardening of Gears by Laser Beam Processing // *Surface Engineering*. 2003. Vol. 19. No. 2. P. 134–136. <https://doi.org/10.1179/026708403225002595>

13. Печников И.С., Завитков А.В., Фролов К.А. Применение лазерных технологий при термообработке зубчатого венца шестерни / Сборник трудов конференции «Наука и техника в дорожной отрасли». Москва, 18 марта 2021 года. М., 2021. Т. 4. С. 70–72.

14. Nemecek S., Muzik T., Misek M. Laser hardening of gear wheels // *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* // AIP Publishing. 2012. Article 411. <https://doi.org/10.2351/1.5062480>

15. Grezev N.V., Begunov I.A., Shamov E.M. Laser hardening of gear teeth using a powerful fibre laser // *Welding International*. 2016. Vol. 30. Is. 11875–879. <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1154268>

16. Суслина С.В. Герметизация микропористости в деталях, изготовленных методом порошковой металлургии // *Современные проблемы науки и образования*. 2005. №. 1. С. 37–38.

17. Ye Y., Zhang Y., Huang T., Zou S., Dong Y., Ding H., Vasudevan V.K., Ye C. A Critical Review of Laser Shock Peening of Aircraft Engine Components // *Advanced Engineering Materials*. 2023. Article 2201451. <https://doi.org/10.1002/adem.202201451>

References

1. Aborkin AV, Babin DM, Bokarev DV, Elkin AI. Effect of annealing on the structure and properties of aluminum matrix composites hardened with WC1-x/CNT structures. *Vitality and Structural Materials Science (ZhivKoM — 2020): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference in a remote format*. Moscow, October 27–29. 2020:3–6. (In Russ.)

2. Aborkin A, Khorkov K, Prusov E, Ob'edkov A, Kremlev K, Perezhogin I, Alymov M. Effect of Increasing the Strength of Aluminum Matrix Nanocomposites Reinforced with Microadditions of Multiwalled Carbon Nanotubes Coated with TiC Nanoparticle. *Nanomaterials*. 2019;9(11):1596. <https://doi.org/10.3390/nano9111596>

3. Animesh B, Eisen WB. *Hot Consolidation of Powders & Particulates*. Metal Powder Industries Federation, Princeton, USA, 2003.

4. German RM. (Ed.) *Powder Metallurgy Science*. 2nd ed.; Metal Powder Industries Federation. Princeton, NJ, USA; 1994.

5. Hidalgo AA, Frykholm R, Ebel T, Pyczak F. Powder Metallurgy Strategies to Improve Properties and Processing of Titanium Alloys: A Review. *Advanced Engineering Materials*. 2017;19(6):1600743. <https://doi.org/10.1002/adem.201600743>

6. Bolzoni L. Sintering of Titanium Alloys. Processing and Properties. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. 2022;3:353–361. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00081-8>

7. Bolzoni L, Ruiz-Navas E.M., Gordo E. Understanding the properties of low-cost iron-containing powder metallurgy titanium alloys. *Materials and Design*. 2016;110:317–323. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.010>

8. Bocanegra-Bernal MH. Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics. *Journal of materials science*. 2004;39(21): 6399–6420. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000044878.11441.90>

9. Schatt W, Wieters K.-P. *Powder metallurgy: processing and materials*. European powder metallurgy association. EPMA Publ.; 1997.

10. Bzhitskikh AP. Increasing the wear resistance of the gear drive of the drilling winch based on the

regular microrelief of the teeth surface. Proceedings of the conference “Geology and oil and gas potential of the West Siberian megabasin (experience, innovation)” Tyumen, December 10–11. Tyumen Industrial University Publ.; 2014. P. 19–23. (In Russ.)

11. Frerichs F, Lu Y, Lübben T, Radel T. Process Signature for Laser Hardening. *Metals*. 2021;11:465. <https://doi.org/10.3390/met11030465>

12. Zhang H, Shi Y, Xu CY, Kutsuna M. Surface Hardening of Gears by Laser Beam Processing. *Surface Engineering*. 2003;19(2):134–136. <https://doi.org/10.1179/026708403225002595>

13. Pechnikov IS, Zavitkov AV, Frolov KA. Application of laser technologies in heat treatment of gear ring gear. *Proceedings of the conference “Science and technology in the road industry”*. Moscow, March 18. 2021;4:70–72. (In Russ.)

14. Nemecek S, Muzik T, Misek M. Laser hardening of gear wheels. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. AIP Publ.; 2012:411. <https://doi.org/10.2351/1.5062480>

15. Grezev NV, Begunov IA, Shamov EM. Laser hardening of gear teeth using a powerful fibre laser. *Welding International*. 2016;30(11):875–879. <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1154268>

16. Suslina SV. Sealing microporosity in parts manufactured by powder metallurgy. *Modern problems of science and education*. 2005;1:37–38. (In Russ.)

17. Ye Y, Zhang Y, Huang T, Zou S, Dong Y, Ding H, Vasudevan VK, Ye C. A Critical Review of Laser Shock Peening of Aircraft Engine Components. *Advanced Engineering Materials*. 2023:2201451. <https://doi.org/10.1002/adem.202201451>

Сведения об авторах

Разин Денис Андреевич, аспирант кафедры физического материаловедения института новых материалов и нанотехнологий, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9506-2540; E-mail: denisrazintv@gmail.com

Печников Илья Сергеевич, аспирант кафедры тепловых двигателей и энергетических установок, Институт машиностроения и автомобильного транспорта, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0009-0003-6727-8525; E-mail: pechnikov@laser33.ru

Фролов Кирилл Андреевич, аспирант кафедры функционального анализа и его приложения, Институт прикладной математики, физики и информатики, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8691-8151; E-mail: golegoga33rus@gmail.com

Люхтер Александр Борисович, кандидат технических наук, советник при ректорате, директор Научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1523-0637; E-mail: 3699137@mail.ru

About the authors

Denis A. Razin, Postgraduate student of the Department of Physical Materials Science, Institute of New Materials and Nanotechnologies, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9506-2540; E-mail: denisrazintv@gmail.com

Iliya S. Pechnikov, Postgraduate student of the Department of Thermal Engines and Power Plants, Institute of Mechanical Engineering and Automobile Transport, Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-6727-8525; E-mail: pechnikov@laser33.ru

Kirill A. Frolov, Postgraduate student of the Department of Functional Analysis and Its Applications, Institute of Applied Mathematics, Physics and Informatics, Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8691-8151; E-mail: golegoga33rus@gmail.com

Alexander B. Lyukhter, Candidate of Technical Sciences, Adviser to the Rector's Office, Director of the Scientific and Educational Center for the Implementation of Laser Technologies, Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1523-0637; E-mail: 3699137@mail.ru