

**Received:** 11.12.2025

**Revised:** 19.05.2026

**Accepted:** 05.06.2026

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2026.3.064-077

## APPLICATION OF DIRECT LASER DEPOSITION TO THE REPAIR OF HIGHLY LOADED TRANSPORT ENGINEERING PARTS

R. V. Kuznetsov<sup>1, a, \*</sup> and O. P. Pinkhasov<sup>2, b</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
29 Politekhnikeskaya St., Saint Petersburg, 195251, Russia

<sup>2</sup>National University of Science and Technology MISIS,  
4/1 Leninskiy Ave., Moscow, 119049, Russia

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0009-0008-5670-8784>  kuznetsovrv@zvezda.spb.ru;

<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0009-0000-3889-6314>  PinhasovOP@sinara-group.com

\*Corresponding author. Email: kuznetsovrv@zvezda.spb.ru

Address for correspondence: ul. Politekhnikeskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russia

Tel.: +7 (921) 795-7472

The paper examines the applicability of direct laser deposition as a repair technology for restoring worn highly loaded parts in transport engineering, using the bearing shield of a traction electric motor as a case study. The relevance of the study is determined by the need to extend the service life of critical components, reduce repair costs, and minimize the thermal impact on the base material in comparison with applying conventional surfacing methods. Metal powder compositions of 12Kh18N10T and 20Kh13 steels produced by plasma atomization were selected as repair materials. Incoming inspection of the powders included the analysis of chemical composition, particle size distribution, particle morphology, and flowability. In order to determine rational processing conditions, technological samples were manufactured, and metallographic examination was used to assess the influence of laser power on clad layer formation and defect occurrence. It was found that the deposition of the 12Kh18N10T steel on the 25L steel led to crack formation in the transition zone, whereas the use of the 20Kh13 steel ensured the formation of a defect-free layer with higher hardness than that of the base material. Based on the obtained results, a repair route for the bearing shield surface was developed, including surface preparation, inspection of the initial geometry, toolpath generation, and layer-by-layer material deposition. It is shown that the proposed approach ensures the formation of a high-quality restored layer with sufficient allowance for subsequent machining and that it can be applied in the industrial repair of railway engineering components.

**Keywords:** direct laser deposition, repair technology, bearing shield, surface restoration

### References

1. Dubrovina, N.A. Innovative development of domestic engineering in the context of international sanctions: regional aspect. *Vestnik SamGU. Ekonomika i Upravlenie*, 2022, 13 (4), 7–15. (In Russian). DOI: 10.18287/2542-0461-2022-13-4-7-15.
2. Kuznetsov, R.V. Some unification issues of ship reduction gears. *Trudy KGNTs*, 2023, 4 (406), 101–108. (In Russian).
3. Kuznetsov, R.V. and Kuznetsov, P.A. Investigation of the influence of gas-dynamic spraying of an intermediate layer on the strength of bimetallic materials joints. *Sovremennoe Mashinostroyeniye. Nauka i Obrazovanie*, 2024, 1, 737–748. (In Russian). DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-134.

4. Lobachevskiy, Ya.P., Mironov, D.A., and Mironova, A.V. Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Selskokhozyaystvennyye Mashiny i Tekhnologii*, 2023, 17 (1), 41–50. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
5. Galimov, V.R. and Mansurov, D.I. Possibility of using modern additive technologies for growing products from heat-resistant nickel alloys. *Materials. Technologies. Design*, 2022, 4 (2), 14–21. (In Russian). DOI: 10.54708/26587572\_2022\_42814.
6. Bazaleeva, K.O., Safarova, D.E., Ponkratova, Yu.Yu., Lugovoi, M.E., Tsvetkova, E.V., Alekseev, A.V., Zhelezni, M.V., Logachev, I.A., and Baskov, F.A. The influence of technological parameters of the laser engineered net shaping process on the quality of the formed object from titanium alloy VT23. *Obrabotka Metallov (Tekhnologiya, Oborudovanie, Instrumenty)*, 2024, 26 (2), 186–198. (In Russian). DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-186-198.
7. Mukin, D., Valdaytseva, E., Turichin, G., and Vildanov, A. An extended analytical solution of the non-stationary heat conduction problem in multi-track thick-walled products during the additive manufacturing process. *Materials*, 2021, 14 (23), 7291. DOI: 10.3390/ma14237291.
8. Vildanov, A., Babkin, K., Mendagaliyev, R., Arkhipov, A., and Turichin, G. Using a trial sample on stainless steel 316L in a direct laser deposition process. *Metals*, 2021, 11 (10), 1550. DOI: 10.3390/met11101550.
9. Dzyunin, G.R., Rusanovskiy, S.A., Khudyakov, M.P., and Desnev, D.L. The method of indirect control of the shape of underwater shipbuilding hulls with the use of modern measuring instruments. *Morskie Intellektualnye Tekhnologii*, 2022, 2, part 1, 42–50. (In Russian). DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.005.
10. Shkryabin, A.A., Shushkov, D.A., Anshukova S.A., and Khudyakov, M.P. Studying the technology of manufacturing propellers for light unmanned underwater vehicles. In: *Aktualnye voprosy innovatsionnogo razvitiya Arkticheskogo regiona RF* [Current Issues of the Innovative Development of the Russian Arctic Region: Proceedings of the 4<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Practical Conference]. SAFU Publ., Arkhangelsk, 2023, pp. 57–60. (In Russian).
11. Promakhov, V., Shulz, N., Vorozhtsov, A., Savinykh, A., Garkushin, G., Razorenov, S., and Klimova-Korsmik, O. Strength of Inconel 625 alloy manufactured by direct laser deposition under submicrosecond load duration. *Metals*, 2021, 11 (11), 1796. DOI: 10.3390/met11111796.

Подана в журнал: 11.12.2025

УДК 621.791.92:620.1

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.3.064-077

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ  
ПРИ РЕМОНТЕ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО  
МАШИНОСТРОЕНИЯ**Р. В. Кузнецов<sup>1, а, \*</sup>, О. П. Пинхасов<sup>2, б</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Националь-  
ный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, г. Москва, 119049, Россия<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0009-0008-5670-8784>  [kuznetsovrv@zvezda.spb.ru](mailto:kuznetsovrv@zvezda.spb.ru);<sup>б</sup>  <https://orcid.org/0009-0000-3889-6314>  [PinhasovOP@sinara-group.com](mailto:PinhasovOP@sinara-group.com)\*Ответственный автор. Email: [kuznetsovrv@zvezda.spb.ru](mailto:kuznetsovrv@zvezda.spb.ru)

Адрес для переписки: ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия

Тел.: +7 (921) 795-74-72

В работе рассмотрена возможность применения прямого лазерного выращивания в качестве ремонтной технологии для восстановления изношенных высоконагруженных деталей транспортного машиностроения на примере подшипникового щита тягового электродвигателя. Актуальность исследования обусловлена необходимостью продления срока службы ответственных деталей, снижения затрат на восстановление и уменьшения термического воздействия на материал основы по сравнению с применением традиционных способов наплавки. В качестве ремонтных материалов исследованы металлопорошковые композиции сталей 12Х18Н10Т и 20Х13, полученные методом плазменной атомизации. Проведен входной контроль порошков, включавший анализ химического состава, гранулометрических характеристик, морфологии частиц и текучести. Для выбора рациональных режимов изготовлены технологические пробы, по результатам металлографических исследований которых оценено влияние мощности лазерного излучения на формирование наплавленного слоя и образование дефектов. Установлено, что при наплавке стали 12Х18Н10Т на сталь 25Л в переходной зоне формируются трещины, тогда как применение стали 20Х13 обеспечивает получение бездефектного слоя с более высокой твердостью по сравнению с материалом основы. На основании полученных результатов разработана технологическая последовательность восстановления поверхностей подшипникового щита, включающая подготовку ремонтной зоны, контроль исходной геометрии, построение траекторий наплавки и послойное нанесение материала. Показано, что предложенный подход обеспечивает формирование качественного восстановленного слоя с достаточным припуском под последующую механическую обработку и может быть использован при промышленном ремонте деталей железнодорожного машиностроения.

**Ключевые слова:** прямое лазерное выращивание, лазерная наплавка, подшипниковый щит, восстановление поверхности

**1. Введение**

Восстановление ресурса ответственных деталей транспортного машиностроения в настоящее время рассматривается как самостоятельный резерв повышения надежности и

технологической устойчивости отрасли [1, 2]. Особенно это актуально для крупногабаритных и дорогостоящих деталей, замена которых приводит к простоям оборудования и заметному росту эксплуатационных затрат.

Одним из характерных примеров таких деталей являются подшипниковые щиты тяговых электродвигателей железнодорожного подвижного состава. Износ их посадочных поверхностей сопровождается ухудшением соосности, увеличением вибраций и снижением долговечности опорных узлов. Традиционная электродуговая наплавка широко применяется для ремонта, однако сопровождается значительным тепловложением, развитием деформаций и необходимостью увеличенного припуска под последующую механическую обработку [3, 4].

Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) является более локальным по тепловому воздействию процессом. Послойная подача порошка в зону лазерного воздействия позволяет формировать покрытие с контролируемой геометрией и уменьшать объем последующей механообработки [5, 6]. В то же время выбор ремонтного материала и технологических параметров для литых сталей типа 25Л требует отдельной отработки, поскольку именно на этапе наплавки определяются склонность к дефектообразованию, качество сплавления и итоговые эксплуатационные свойства покрытия.

Объектом исследования является подшипниковый щит тягового электродвигателя, изготовленный из стали 25Л. Цель работы — оценить применимость ПЛВ для его ремонта и разработать технологический маршрут восстановления изношенных поверхностей. Для достижения цели решались следующие задачи: входной контроль металлопорошковых композиций, отработка режимов на технологических пробах, сравнительная наплавка на модельном сегменте щита, контроль микротвердости и проверка восстановления полномасштабной детали.

## 2. Материалы и методы исследований

### 2.1. Материалы исследования

Материалом основы служил подшипниковый щит тягового электродвигателя из стали 25Л – нелегированной литой углеродистой стали, применяемой для деталей, работающих при сочетании механических и температурных нагрузок. С учетом ограниченной свариваемости литых углеродистых сталей подбор ремонтного порошкового материала выполняли по совокупности следующих критериев: технологическая совместимость с основой, склонность к бездефектному формированию слоев, потенциальная износостойкость и доступность материала на рынке металлопорошковой продукции.

Для сравнительной оценки были выбраны две металлопорошковые композиции: 12X18H10T и 20X13. Сталь 12X18H10T рассматривалась как технологически распространенный коррозионностойкий материал с высокой пластичностью, что позволяло оценить возможность применения аустенитной системы в качестве ремонтного слоя. Сталь 20X13 рассматривалась как более твердый и потенциально более износостойкий материал для восстановления посадочных поверхностей. Окончательный выбор должен был быть сделан по результатам технологической проработки.

### 2.2. Входной контроль порошковых материалов

Порошки сталей 12X18H10T и 20X13 были изготовлены методом плазменной атомизации на предприятии АО «ОЗ «Микрон». Отбор проб выполняли в соответствии с ГОСТ 23148-98. Для каждой партии определяли химический состав, морфологию частиц, гранулометрическое распределение и текучесть.

Морфологию и характер поверхности частиц оценивали по изображениям, полученным в сканирующем электронном микроскопе. Размер частиц определяли по результатам анализа этих изображений с построением распределения по эквивалентному диаметру. Теку-

чество оценивали по времени истечения порошка через воронку диаметром 2,5 мм. Такой набор характеристик достаточен для предварительного заключения о пригодности порошка к использованию в процессе ПЛВ.

В табл. 1 приведено содержание элементов в металлпорошковой композиции (МПК) стали 12X18H10T. Содержание всех элементов находится в пределах требования ГОСТ 5632-2014.

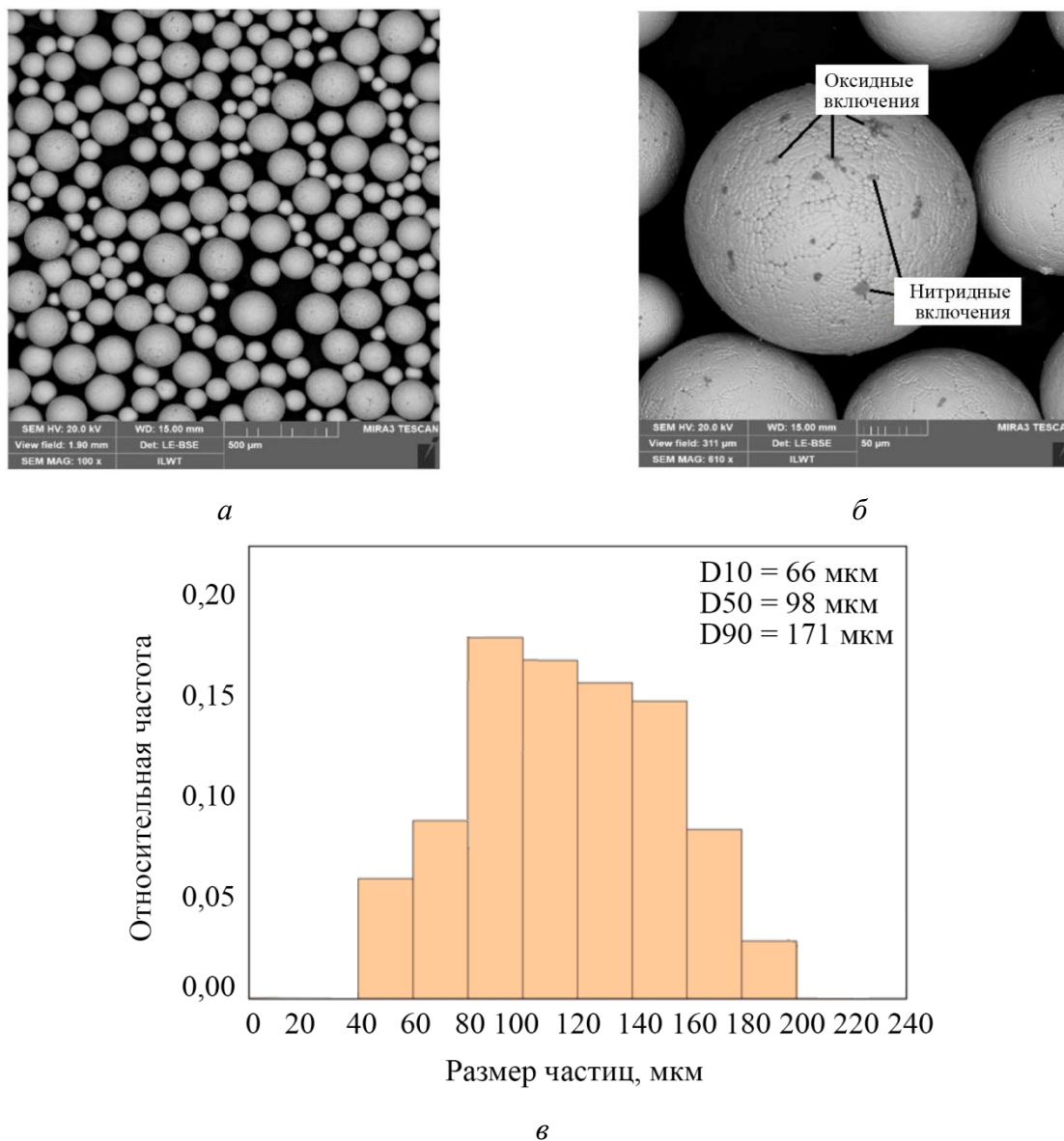


Рис. 1. Порошок стали 12X18H10T: общий вид частиц (а); неметаллические включения на поверхности отдельных частиц (б); распределение частиц по размерам (в)

Порошок стали 12X18H10T характеризуется сферической формой частиц и диапазоном размеров 40÷200 мкм. На поверхности отдельных частиц наблюдались единичные неметаллические включения. Текучесть порошка при истечении через воронку диаметром 2,5 мм составила 14 с.

Таблица 1

Содержание элементов в МПК стали 12X18H10T, масс. %

|                | Si   | Ti   | Cr        | Mn   | Fe     | Ni       | Cu   | C     | S     |
|----------------|------|------|-----------|------|--------|----------|------|-------|-------|
| МПК 12X18H10T  | 0,73 | 0,42 | 18,54     | 1,05 | 69,49  | 9,77     | 0,10 | 0,062 | 0,003 |
| ГОСТ 5632-2014 | ≤0,8 | ≤0,8 | 17,0–19,0 | ≤2,0 | основа | 9,0–11,0 | ≤0,3 | ≤0,12 | ≤0,02 |

На рис. 1 показаны изображения порошков, полученные в сканирующем электронном микроскопе, и гистограммы распределения частиц по размерам.

Содержание элементов в МПК стали 20X13 приведено в табл. 2. Состав используемого порошка соответствует требованиям ГОСТ 5632-2014.

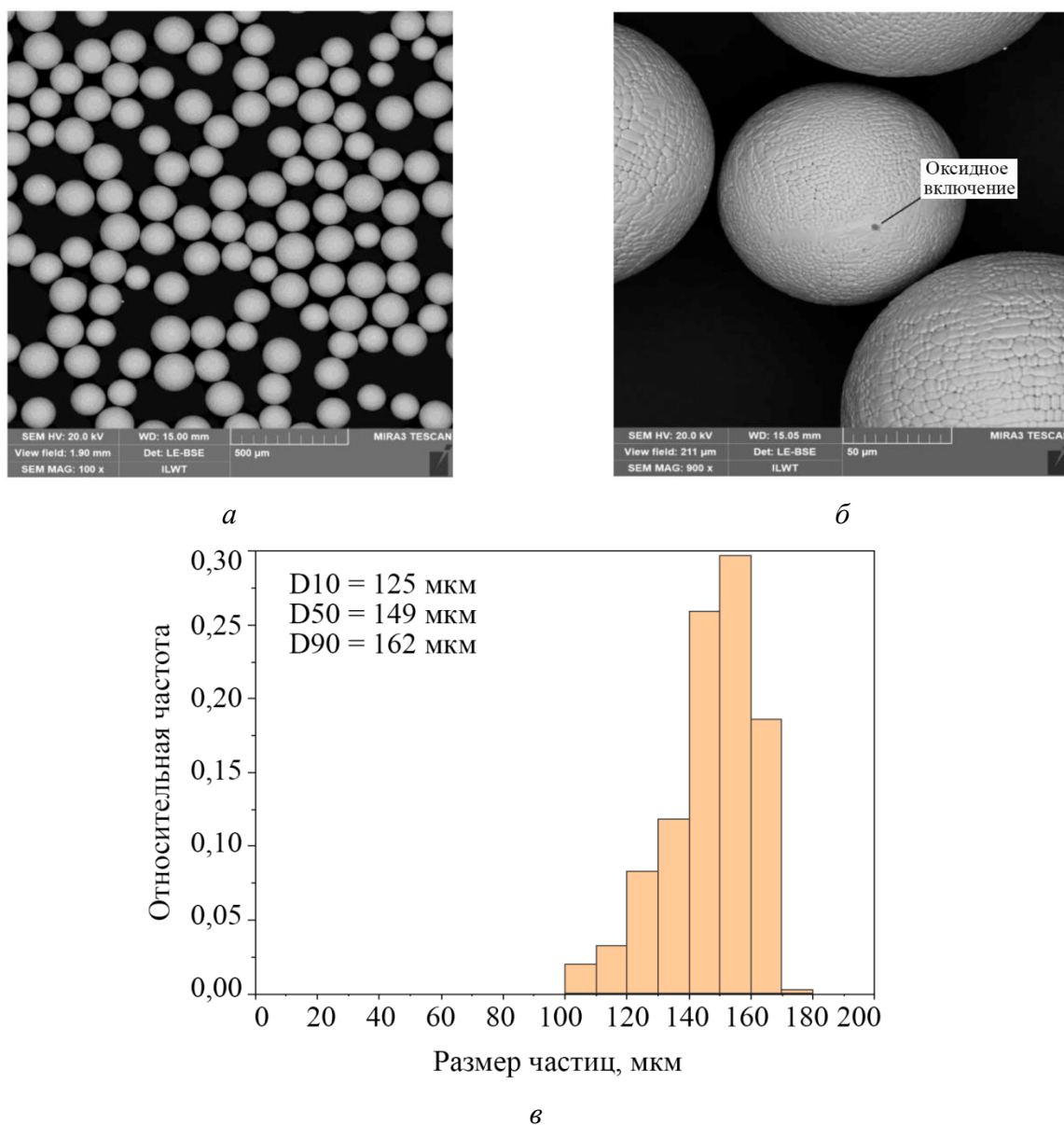


Рис. 2. Порошок стали 20X13: общий вид частиц (а); неметаллическое включение на поверхности отдельной частицы (б); распределение частиц по размерам (в)

Таблица 2

Содержание элементов в МПК стали 20X13, масс. %

|                | Si   | Cr        | Mn   | Fe     | Ni   | C         | S      |
|----------------|------|-----------|------|--------|------|-----------|--------|
| МПК 20X13      | 0,34 | 13,23     | 0,21 | 85,99  | 0,23 | 0,184     | 0,003  |
| ГОСТ 5632-2014 | ≤0,8 | 12,0–14,0 | ≤0,8 | основа | ≤0,6 | 0,16–0,25 | ≤0,025 |

В партии МПК 20X13 размеры частиц находились в интервале 104÷175 мкм; частицы имеют преимущественно сферическую форму. На поверхности отдельных частиц обнаружены единичные неметаллические включения. Открытая и внутренняя пористость частиц не выявлена. Текучесть МПК 20X13 при истечении через воронку диаметром 2,5 мм составила 16 с.

На рис. 2 показаны морфология частиц и гистограмма распределения частиц по размерам.

Технологические пробы выращивали отдельными валиками с паузой 40 с между соседними проходами. Такая стратегия имитировала по тепловому циклу изготовление более массивной заготовки и позволяла проверить режимы на склонность к образованию несплавов, пор и трещин. Металлографические шлифы вырезали на электроэрозионном станке DK7745; шлифование и полирование выполняли на станке Saphir 250 A1-ECO.

### 2.3. Изготовление технологических проб и методы контроля

Технологические пробы из порошков сталей 12X18H10T и 20X13 изготавливали на роботизированном комплексе ИЛИСТ-L. Комплекс включает волоконный иттербиевый лазер мощностью до 3 кВт, лазерную головку с четырехструйным соплом подачи порошка, систему охлаждения, шестиосевой робот-манипулятор и двухосевой наклонно-поворотный позиционер. Режимы выращивания выбирали с учетом ранее опубликованных рекомендаций по многоходовой и многослойной лазерной наплавке [7, 8]. Численные значения параметров эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технологические параметры выращивания технологических проб

| Номер образца                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| Мощность, Вт                 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 | 2600 |
| Пауза между валиками, с      | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   |
| Скорость, мм/с               | 25   | 25   | 25   | 25   | 25   |
| Ширина валика, мм            | 2,5  | 2,5  | 2,5  | 2,5  | 2,5  |
| Смещение по высоте $dz$ , мм | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  |
| Смещение по ширине $dx$ , мм | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 |
| Количество слоев, шт.        | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    |

Микротвердость измеряли методом Виккерса (HV0,1) при нагрузке на индентор 0,98 Н (100 гс) по линии, пересекающей наплавленный слой, переходную зону и материал

основы. Поскольку система «12X18H10T – 25Л» была отбракована на стадии сравнительной наплавки из-за трещинообразования, профиль микротвердости строили только для технологически пригодной системы «20X13 – 25Л».

#### *2.4. Наплавка на модельном сегменте и ремонт полноразмерного щита*

Для проверки совместимости материалов с основой предварительно выполняли наплавку на модельном сегменте щита из стали 25Л. Для стали 12X18H10T использовали минимальную «дефект-свободную» мощность, установленную на технологических пробах,  $P = 2200$  Вт; для стали 20X13 –  $P = 2400$  Вт. Далее из полученных участков изготавливали макрошлифы и проводили сравнительный анализ структуры.

Перед ремонтом полноразмерной детали выполняли контроль исходной геометрии с помощью контрольно-измерительного комплекса и 3D-сканирования. Полученное облако точек сопоставляли с САД-моделью в программном обеспечении Geomagic Control X [9]. По результатам сопоставления определяли требуемую толщину наплавки: для поверхностей первого установка – 2 слоя (1,6 мм на сторону), для поверхностей второго установка – 5 слоев (4,0 мм на сторону). Траектории наплавки создавали и проверяли в Autodesk PowerMill [10] с последующей симуляцией перемещения инструмента и контролем возможных столкновений.

Подготовка ремонтируемых поверхностей включала механическую очистку и химическое обезжиривание. После наплавки выполняли визуальный контроль и контроль полученного припуска под механическую обработку.

### **3. Результаты исследований и обсуждение**

#### *3.1. Характеристики порошков*

Химический состав обеих металлопорошковых композиций соответствует требованиям ГОСТ 5632-2014. По морфологии и гранулометрическому составу порошки также отвечают типовым требованиям к материалам для ПЛВ: частицы имеют преимущественно сферическую форму, размер находится в рабочем диапазоне 40÷200 мкм, а текучесть не превышает 25 с.

Таким образом, уже на стадии входного контроля обе партии порошков могли быть признаны пригодными для дальнейшей технологической проработки. Отдельные неметаллические включения, наблюдавшиеся на поверхности частиц, не исключали применения данных порошков, однако требовали проверки качества сформированного материала на макрошлифах.

#### *3.2. Влияние мощности лазерного излучения на качество многослойных проб*

Для обеих исследованных сталей установлено пороговое влияние мощности лазерного излучения на образование несплавлений. Для стали 12X18H10T при 1800 и 2000 Вт в основаниях между соседними валиками формируются несплавления, тогда как при  $P \geq 2200$  Вт видимые дефекты сплавления не обнаружены. Для стали 20X13 бездефектная структура достигается при мощности не ниже 2400 Вт; в диапазоне 1800÷2200 Вт также фиксируются несплавления между валиками. По макрошлифам качественно наблюдается рост глубины проплавления материала основы с увеличением мощности, что согласуется с общими закономерностями ПЛВ [7, 8].

На рис. 3 представлены металлографические шлифы нержавеющей стали 12X18H10T.

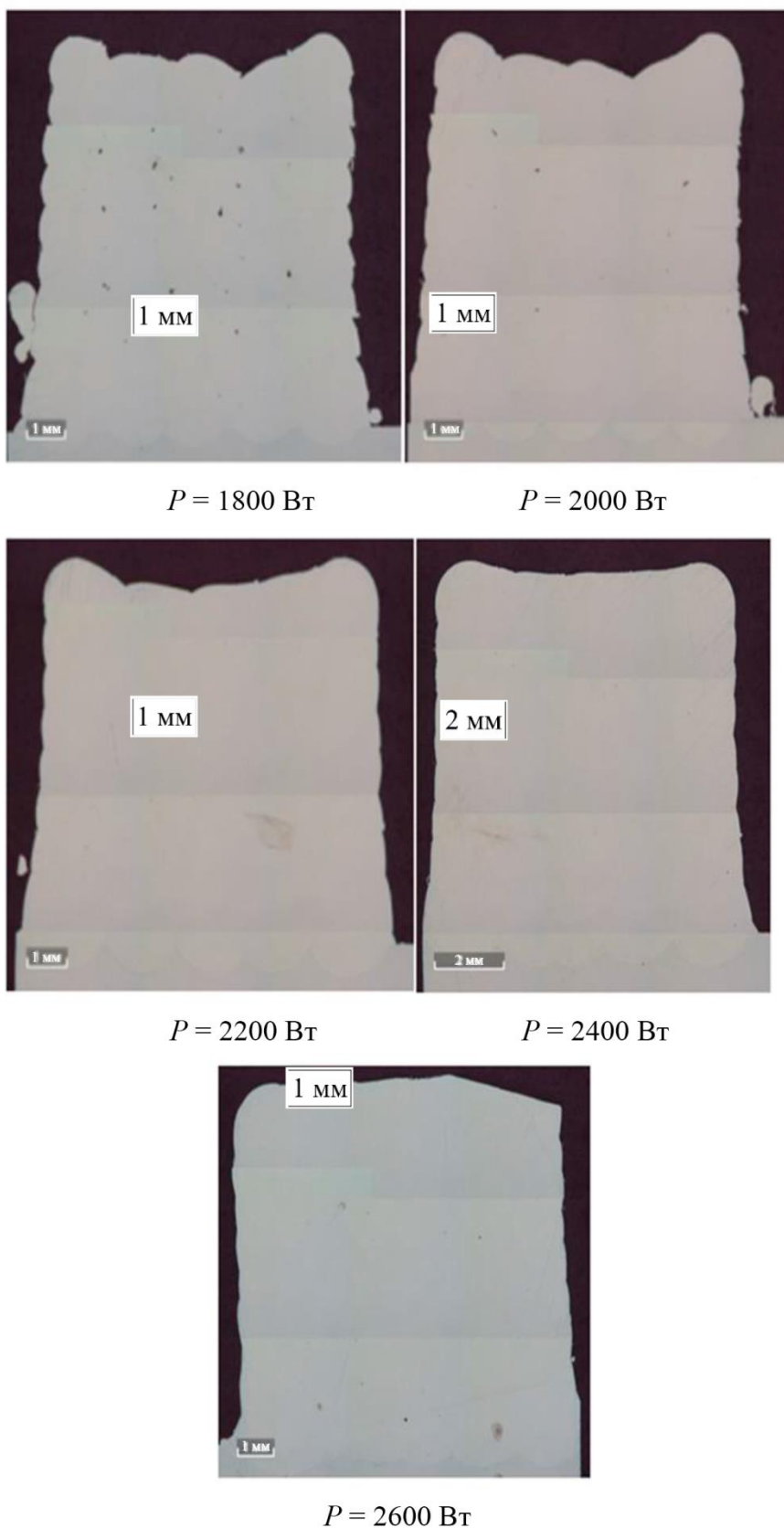


Рис. 3. Макрошлифы технологических проб из стали 12Х18Н10Т при мощности 1800, 2000, 2200, 2400 и 2600 Вт

На рис. 4 представлены металлографические шлифы выращенных образцов.

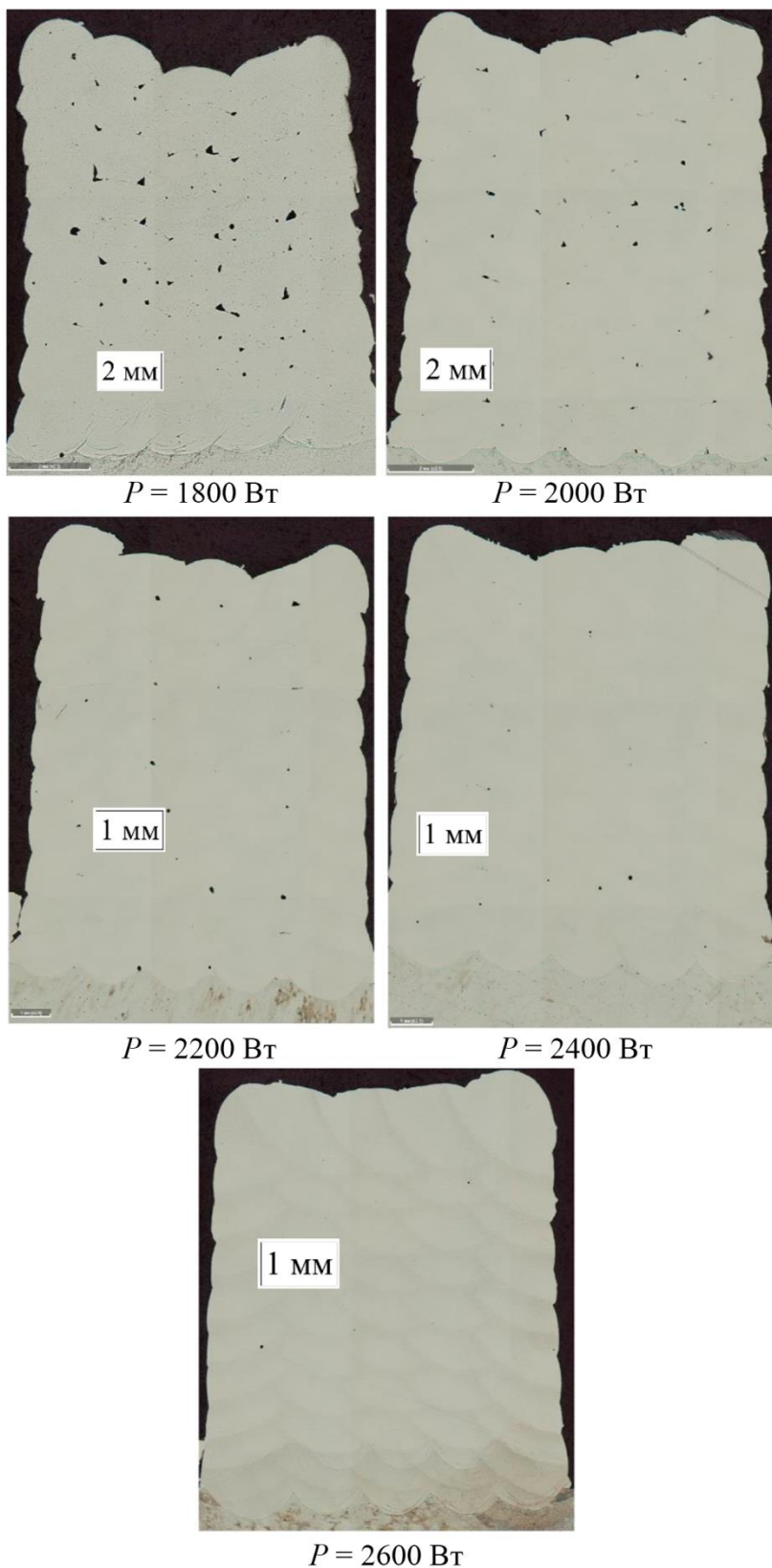


Рис. 4. Макрошлифы технологических проб из стали 20X13 при мощности 1800, 2000, 2200, 2400 и 2600 Вт

### 3.3. Сравнительная наплавка на сегмент щита и выбор ремонтного материала

При переходе от выращивания автономных проб к наплавке на материал основы выявилось существенное различие в поведении исследуемых систем. Для системы «12X18H10T – 25Л» на макрошлифах зафиксированы трещины в переходной зоне и наплавленном слое. Для системы «20X13 – 25Л» на аналогичных шлифах трещин и несплавлений не обнаружено. Следовательно, именно МПК стали 20X13 обеспечивает более устойчивое формирование ремонтного слоя на детали из стали 25Л в рамках выбранного технологического окна.

На рис. 5 представлены металлографические шлифы выращенных образцов.

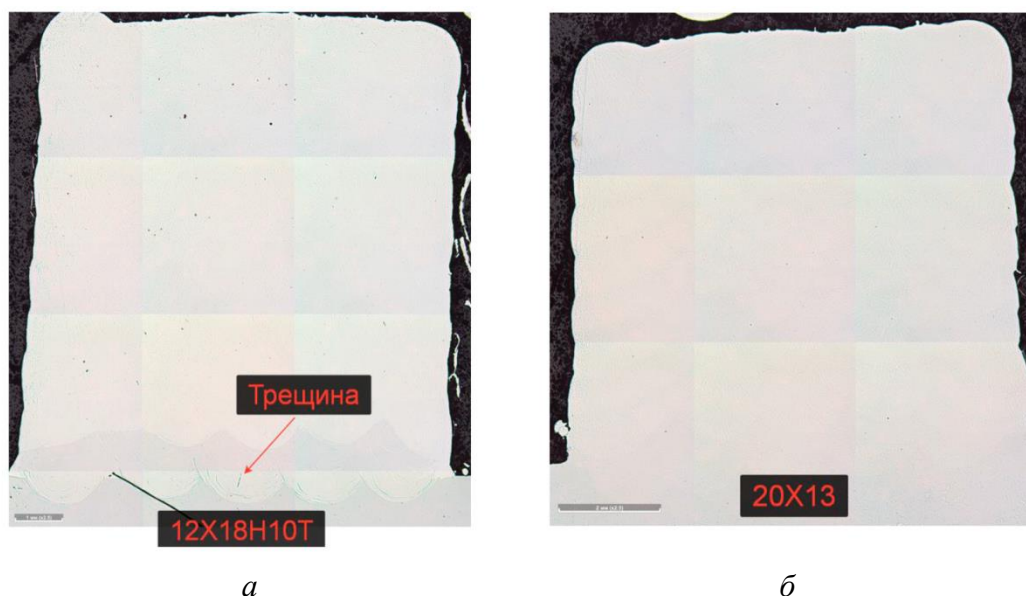


Рис. 5. Макрошлифы технологических проб на сегменте щита из стали 25Л: наплавка 12X18H10T при  $P = 2200$  Вт (а); наплавка 20X13 при  $P = 2400$  Вт (б)

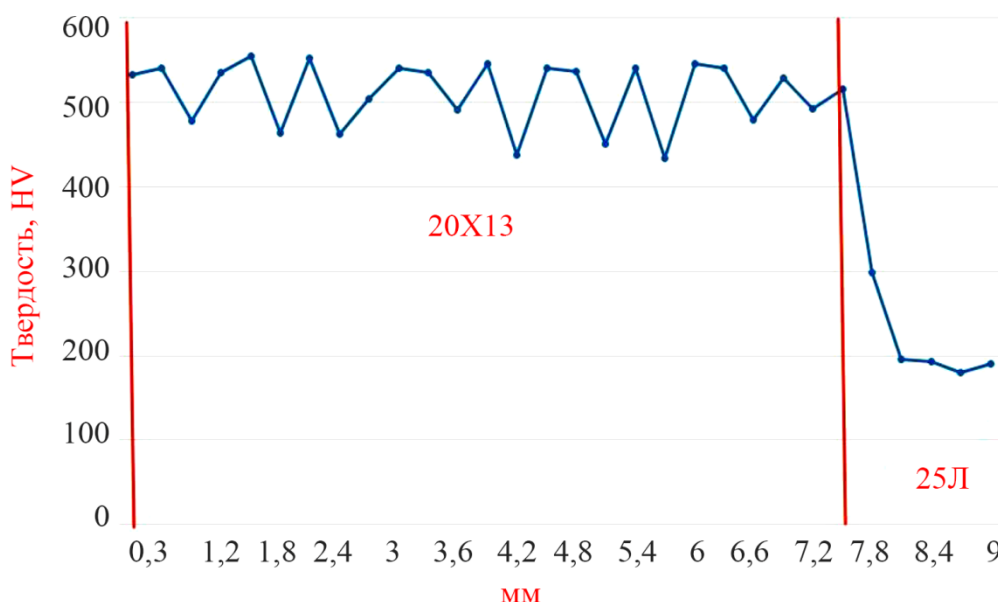


Рис. 6. График измерения твердости на шлифе для системы «20X13 – 25Л» при  $P = 2400$  Вт, HV

Профиль микротвердости подтверждает преимущество выбранного ремонтного материала. В области наплавленного слоя значения HV для стали 20X13 примерно в 2,5 раза пре-

вышают значения, характерные для стали 25Л. После перехода через зону сплавления твердость закономерно снижается до уровня материала основы. Такое распределение позволяет рассчитывать на повышение износостойкости восстановленной поверхности при сохранении удовлетворительной металлургической связи с подложкой.

Результаты замера твердости представлены на рис. 6.

### 3.4. Ремонт полноразмерной детали и практическая оценка технологии

На основании результатов предварительной отработки для ремонта полноразмерного подшипникового щита был выбран порошок стали 20Х13 и режим наплавки, обеспечивающий бездефектную структуру. После сканирования детали и цифровой подготовки траекторий восстановление выполняли последовательно в два установа [11]. Общая толщина наплавки составляла 1,6 мм на сторону для поверхностей первого установа и 4,0 мм на сторону для поверхностей второго установа.

Результат восстановления поверхностей детали представлен на рис. 7.



Рис. 7. Восстановленные поверхности подшипникового щита после наплавки

Таблица 4

Оценка трудоемкости восстановления подшипникового щита

| Этап работ                               | Продолжительность |
|------------------------------------------|-------------------|
| Подготовка поверхностей под наплавку     | ≈ 30 мин          |
| Подготовка управляющих программ          | ≈ 4 ч             |
| Крепление и выставление первого установа | ≈ 2 ч             |
| Наплавка первого установа                | ≈ 45 мин          |
| Крепление и выставление второго установа | ≈ 2 ч             |
| Наплавка второго установа                | ≈ 2 ч 30 мин      |
| Контроль геометрии                       | ≈ 1 ч             |

Визуальный контроль не выявил поверхностных дефектов наплавленного слоя. Контроль геометрии показал наличие достаточного припуска под механическую обработку на всех восстановленных поверхностях; величина припуска составляла 2–3 мм. Тем самым была подтверждена технологическая реализуемость ремонта щита методом ПЛВ на промышленном роботизированном комплексе.

В табл. 4 приведена оценка трудоемкости восстановления подшипникового щита.

Суммарная трудоемкость опытного восстановления составила около 12 ч 45 мин. При серийном ремонте изделий одного типоразмера трудоемкость может быть снижена за счет повторного использования управляющих программ и применения специализированной оснастки для базирования. В этом случае расчетный цикл восстановления одного щита сокращается примерно до 8 ч.

#### 4. Заключение

Входной контроль показал, что порошки сталей 12X18H10T и 20X13 соответствуют требованиям ГОСТ 5632-2014 по химическому составу и обладают характеристиками, достаточными для применения в процессе прямого лазерного выращивания.

На технологических пробах установлено пороговое влияние мощности лазерного излучения на формирование несплавов: для стали 12X18H10T бездефектная структура достигается при  $P \geq 2200$  Вт, для стали 20X13 – при  $P \geq 2400$  Вт.

Наплавка на сегмент щита из стали 25Л показала, что система «12X18H10T – 25Л» склонна к трещинообразованию, тогда как система «20X13 – 25Л» обеспечивает бездефектное формирование покрытия в пределах исследованного технологического окна.

Наплавленный слой из стали 20X13 имеет микротвердость примерно в 2,5 раза выше, чем материал основы 25Л, что делает данную систему перспективной для восстановления изношенных посадочных поверхностей подшипниковых щитов.

Разработанная технология ремонта подшипникового щита тягового электродвигателя, основанная на 3D-сканировании, цифровой подготовке траекторий и наплавке порошком стали 20X13, обеспечивает получение припуска 2–3 мм под последующую механическую обработку и может быть рекомендована для промышленного применения.

#### Литература

1. Дубровина Н. А. Инновационное развитие отечественного машиностроения в условиях международных санкций: региональный аспект // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2022. – Т. 13 (4). – С. 7–15. – DOI: 10.18287/2542-0461-2022-13-4-7-15.
2. Кузнецов Р. В. Некоторые проблемы унификации судовых редукторных передач // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2023. – № 4 (406). – С. 101–108.
3. Кузнецов Р. В., Кузнецов П. А. Исследование влияния газодинамического напыления промежуточного слоя на прочность соединения биметаллических материалов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2024. – № 13. – С. 737–748. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-134.
4. Лобачевский Я. П., Миронов Д. А., Миронова А. В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17 (1). – С. 41–50.
5. Галимов В. Р., Мансуров Д. И. Возможность применения современных аддитивных технологий для выращивания изделий из жаропрочных никелевых сплавов // Materials. Technologies. Design. – 2022. – Т. 4, № 2 (8). – С. 14–21.
6. Влияние технологических параметров процесса прямого лазерного выращивания на качество формируемого объекта из титанового сплава BT23 / К. О. Базалева, Д. Э. Сафарова, Ю. Ю. Понкратова, М. Е. Луговой, Е. В. Цветкова, А. В. Алексеев, М. В. Железный, И. А. Логачев, Ф. А. Басков // Обработка металлов (технология,

оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26 (2). – С. 186–198. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-186-198.

7. An extended analytical solution of the non-stationary heat conduction problem in multi-track thick-walled products during the additive manufacturing process / D. Mukin, E. Valdaytseva, G. Turichin, A. Vildanov // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (23). – P. 7291. – DOI: 10.3390/ma14237291.

8. Using a trial sample on stainless steel 316L in a direct laser deposition process / A. Vildanov, K. Babkin, R. Mendagaliyev, A. Arkhipov, G. Turichin // *Metals*. – 2021. – Vol. 11 (10). – Art. 1550. – DOI: 10.3390/met11101550.

9. Метод косвенного контроля формы оболочечных конструкций глубоководных аппаратов с применением современных средств измерений / Г. Р. Дзюнин, С. А. Русановский, М. П. Худяков, Д. Л. Деснев // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2022. – С. 42–50. – DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.005.

10. Исследование вопросов технологии изготовления гребных винтов для необитаемых подводных аппаратов легкого класса / А. А. Шкрябин, Д. А. Шушков, С. А. Аншукова, М. П. Худяков // *Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ : сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции*. – Архангельск : САФУ им. М. В. Ломоносова, 2023. – С. 57–60.

The strength of Inconel 625, manufactured by the method of direct laser deposition under sub-microsecond load duration / V. Promakhov, N. Schulz, A. Vorozhtsov, A. Savinykh, G. Garkushin, S. Razorenov, O. Klimova-Korsmik // *Metals*. – 2021. – Vol. 11 (11). – P. 1796. – DOI: 10.3390/met11111796.