

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-54-10-18>

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЛИННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО СВЕТОДИОДНОГО ЛАЗЕРА

Голицын Д.Д.¹, Горюнов Н.А.²

¹*Костромской государственной университет, Кострома, Россия;*

²*Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия*

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, SLM, светодиодный лазер, диодный лазер, аддитивное восстановление, ремонт металлических изделий, интерфейс наплавки, цилиндрические детали, механические свойства.

Аннотация. В статье рассматривается применение технологии селективного лазерного плавления для восстановления повреждённых металлических изделий. Показано принципиальное отличие аддитивного восстановления от изготовления деталей: при ремонте критическим становится не воспроизведение геометрии как таковой, а обеспечение надёжной связи наплавленного объёма с базовым металлом и сохранение эксплуатационных свойств в зоне интерфейса. Предложена классификация дефектов по пригодности к ремонту методом селективного лазерного плавления и критерий оценки степени восстановления механических характеристик *K rest*. Особое внимание уделено восстановлению длинных цилиндрических деталей (валы, гильзы, сопловые элементы), для которых традиционные методы ремонта сопряжены с риском термической деформации. Обосновано применение высокоточного светодиодного (диодного) лазера в качестве единственного источника энергии в процессе селективного лазерного плавления: компактность установки, низкий тепловой вклад и возможность мобильного ремонта непосредственно на детали рассматриваются как ключевые преимущества для практического использования. По данным литературы и аналитических оценок показано, что восстановленные зоны способны обеспечить 85-98% исходной прочности при соблюдении технологических требований. Сформулированы направления дальнейших исследований.

RESTORATION OF LONG CYLINDRICAL METAL PARTS BY SELECTIVE LASER MELTING USING A HIGH-PRECISION LED LASER

Golitsyn D.D.¹, Goryunov N.A.²

¹*Kostroma State University, Kostroma, Russia;*

²*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia*

Keywords: selective laser melting, SLM, light emitting diode laser, diode laser, additive restoration, metal product repair, surfacing interface, cylindrical parts, mechanical properties.

Abstract. The article discusses the application of selective laser melting technology for the restoration of damaged metal products. It shows the fundamental difference between additive restoration and part manufacturing: during repair, it is not the reproduction of geometry that is critical, but rather ensuring a reliable connection between the deposited volume and the base metal and preserving the operational properties in the interface area. The article proposes a classification of defects based on their suitability for selective laser melting repair and a criterion for assessing the degree of restoration of mechanical characteristics, *K rest*. Special attention is paid to the restoration of long cylindrical parts (shafts, sleeves, nozzle elements), for which traditional repair methods are associated with the risk of thermal deformation. The use of a high-precision light emitting diode (diode) laser as the only source of energy in the selective laser melting process is justified: the compactness of the installation, the low thermal contribution, and the possibility of

Одна из наиболее острых инженерных проблем современного машиностроения, влияющая на срок эксплуатации машин и комплексов - износ и повреждение металлических деталей, таких как валы, гильзы, корпусные цилиндры, сопловые элементы и другие ответственные компоненты. По причине, что большинство элементов рассчитаны на тяжелые условия эксплуатации, а также длительный срок, в качестве материала применяются дорогостоящие легированные стали, жаропрочные стали, титановые и никелевые сплавов. При выходе такого элемента из строя требуется замена элемента, что влечет существенные материальные затраты. В качестве решения проблемы рассматриваются различные методы восстановления. Одним из методов является восстановление металлических изделий методом селективного лазерного плавления. Для оценки его необходимо систематизировать возможности, оценить степень сохранения механических свойств восстановленных зон и обосновать применение высокоточного светодиодного лазера как единственного источника энергии в данном процессе, в том числе для длинных цилиндрических деталей.

Для восстановления изношенных деталей на предприятиях в основном применяются традиционные методы ремонта – дуговая сварка, плазменная и лазерная наплавка, гальванические покрытия. Однако приведенные методы обладают рядом ограничений. Зона термического влияния (Heat Affected Zone, HAZ) при сварочных процессах может достигать нескольких миллиметров, вызывая структурные превращения, остаточные напряжения и коробление тонкостенных и протяжённых деталей. Точность восстановления сложных профилей при ручной наплавке, как правило, недостаточна и требует значительного объема механической доводки [1].

Технология селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting, SLM) – один из методов аддитивного производства, в котором металлический порошок послойно сплавляется сфокусированным лазерным пятном в контролируемой защитной атмосфере [1, 2]. Каждый слой толщиной 20-50 мкм формируется путём сканирования лазерного луча по заданной траектории в соответствии с CAD-моделью детали. Рабочая камера заполняется инертным газом (аргон, азот) для предотвращения окисления расплава. В отличие от лазерного наплавления с подачей порошка (Laser Metal Deposition / Directed Energy Deposition, LMD/DED), при SLM порошок предварительно разравнивается в контролируемом ложе – либо на всей площади платформы, либо локально в зоне дефекта при восстановлении. Это обеспечивает высокую точность геометрии (до $\pm 0,05$ мм) и воспроизводимость микроструктуры. Для проведения восстановительных работ изделий из различных материалов применяются порошки из нержавеющей сталей (316L, 17-4PH), инструментальных и жаропрочных сплавов (Inconel 718), титанового сплава Ti-6Al-4V, а также цветных металлов – меди и алюминия (при использовании синих диодных лазеров с длиной волны 450 нм) [2].

По сравнению с традиционными методами ремонта SLM-восстановление обеспечивает высокую точность геометрии, минимальный объем вторичной

механической обработки и возможность воспроизведения сложных профилей, включая внутренние каналы и фасонные поверхности.

До недавнего времени SLM рассматривалась преимущественно как способ изготовления деталей, однако в процессе использования было выявлено, что SLM применима и для локального восстановления повреждённых зон на готовых изделиях, при условии правильного выбора режимов, материала порошка и стратегии формирования зоны интерфейса. Сравнение параметров при изготовлении и восстановлении деталей методом SLM представлено в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение SLM-изготовления и SLM-восстановления

Параметр	Изготовление изделия	Восстановление дефекта
Основание	Платформа/опора	Готовая деталь (базовый металл)
Критичный фактор	Поддержки, усадка	Связка с базовым металлом, HAZ
Контроль качества	Плотность слоя	Адгезия, отсутствие непроваров
Типичный риск	Поры, микротрещины	Различие свойств на границе шва
Источник энергии	Лазер (в т.ч. диодный)	Светодиодный лазер (единственный)

Технология SLM позволяет реализовать два принципиально различных сценария аддитивного восстановления. Полная реконструкция фрагмента применяется при значительных повреждениях, когда восстановить исходную геометрию традиционными методами невозможно или экономически нецелесообразно. На подготовленную поверхность базовой детали послойно наплавляется восстановительный объём, воспроизводящий утраченный фрагмент по данным 3D-сканирования или конструкторской документации. Локальное восстановление используется при поверхностном износе, выкрашивании, коррозионных повреждениях, усталостных трещинах (после их механического удаления), а также при локальных вмятинах и выбоинах. В этом случае наплавляется только дефектная зона, что существенно сокращает объём добавляемого материала и тепловое воздействие на деталь.

Технологическая цепочка SLM-восстановления (рис. 1) включает следующие этапы:

1. Трёхмерное сканирование повреждённой зоны и построение CAD-модели восстановительного объёма.
2. Механическая подготовка поверхности: удаление дефектного слоя, шлифовка, обезжиривание.
3. Фиксация детали и нанесение металлического порошка в зону ремонта (локальное порошковое ложе или дозированная подача).

4. Послойное SLM-сплавление восстановительного объема светодиодным лазером с применением порошка, совместимого по химическому составу с базовым металлом.

5. При необходимости – термообработка (отпуск, снятие напряжений), механическая обработка и неразрушающий контроль (ультразвуковой, рентгеновский, капиллярный) [3, 4].

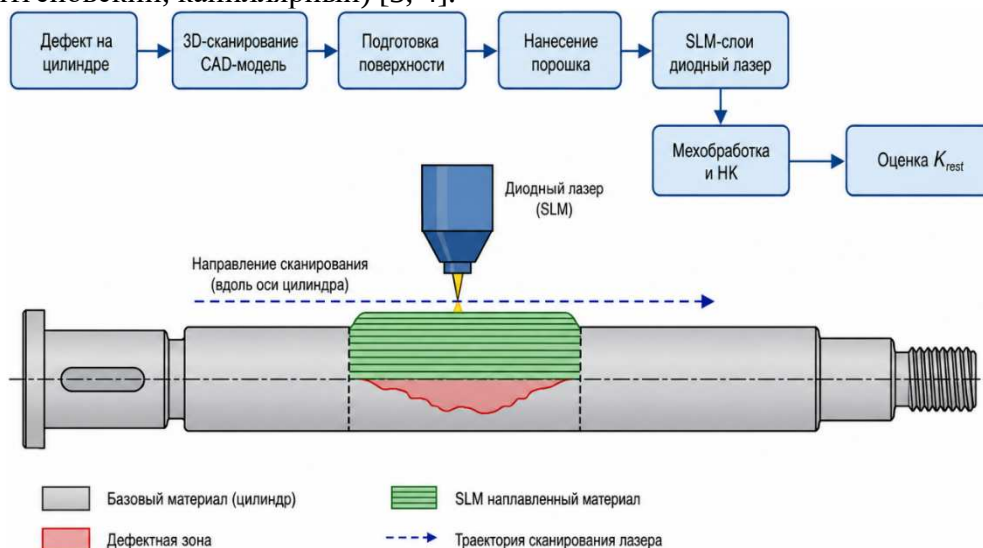


Рис. 1. Схема восстановления цилиндрической детали методом светодиодного SLM

Для анализа дефектов по пригодности к SLM-ремонту предлагается классификация:

- Класс А – поверхностный или объемный дефект на массивной зоне цилиндрической детали. Высокая пригодность к SLM-восстановлению; риск деформации минимален.

- Класс В - дефект на тонкостенном или протяжённом участке детали с соотношением длины к диаметру $\frac{L}{D} > 10$. Требуется контроль термической деформации, сегментированный ремонт, применение режимов с пониженной удельной энергией.

- Класс С – дефект в зоне функциональной посадочной или уплотнительной поверхности. Необходима повышенная точность светодиодного SLM (пятно ≤ 80 мкм) и обязательная механическая доводка до требуемых допусков шероховатости и формы.

Рассмотрим подробно восстановление длинных цилиндрических деталей. К ним относятся валы, штоки, гильзы, обечайки, представляющие собой особую группу изделий, для которых SLM-восстановление одновременно наиболее востребовано и наиболее технологически сложно.

Основные проблемы, возникающие при ремонте данной группы деталей:

- большое соотношение длины к диаметру, приводящее к риску прогиба под действием термических напряжений;
- неравномерный отвод тепла вдоль оси цилиндра;

– невозможность разместить деталь целиком в стационарной SLM-камере ограниченного рабочего объёма.

Для обеспечения технологии с применением светодиодного SLM применяются следующие технические решения:

– сегментированный ремонт, заключающийся в восстановлении по детали по секторам длиной 50-150 мм. Необходимо производить промежуточный контроль геометрии;

– использование мобильного или роботизированного SLM-модуля с диодной лазерной головкой, имеющего возможность перемещаться вдоль оси цилиндра. Данное оборудование позволяет выполнять ремонт непосредственно на установленной в оборудовании детали, без её полного демонтажа;

– для формирования равномерных слоёв на цилиндрической поверхности необходимо применять вращатели с жестким закреплением патрона и небольшой индексацией угла поворота;

– применение режимов с пониженной удельной энергией светодиодного источника снижает температурный градиент и риск термической деформации и коробления длинных валов [4].

Для оценки допустимости ремонта длинного цилиндра (рис. 1) без превышения геометрических допусков может быть использован упрощённый критерий остаточного прогиба:

$$f_{max} \leq [f], \quad (1)$$

где f_{max} – максимальный прогиб после остывания наплавленной зоны; $[f]$ – допускаемый прогиб по конструкторской документации.

Число ремонтных сегментов n при длине дефектной зоны L и диаметре детали D рекомендуется определять из условия:

$$n \geq \frac{L}{L_{seg}}, \quad (2)$$

где L_{seg} – длина одного ремонтного сегмента:

$$L_{seg} = (3 \dots 5) \cdot D. \quad (3)$$

При $\frac{L}{D} > 15$ целесообразно применять сегментированный ремонт с промежуточным снятием напряжений [3].

Таким образом, длинные цилиндрические детали восстанавливаемы методом светодиодного SLM, однако это требует специальной оснастки, сегментированной стратегии и строгого контроля деформаций на каждом этапе.

Один из центральных вопросов SLM-восстановления: сохранение восстановленными изделиями своих механических и эксплуатационных свойств. Для этого проведем анализ свойств материала после проведения восстановления.

На границе «базовый металл – SLM-наплавка» формируется переходная микроструктурная зона (dilution zone) шириной 50-300 мкм, в которой происходит частичное перемешивание расплавов и эпитаксиальный рост зёрен от поверхности базового металла (рис. 2). Свойства в этой зоне, как правило,

отличаются как от наплавленного металла, так и от исходной детали. Абсолютное совпадение характеристик по всему сечению в общем случае недостижимо – и это необходимо учитывать при проектировании ремонта [1, 5].

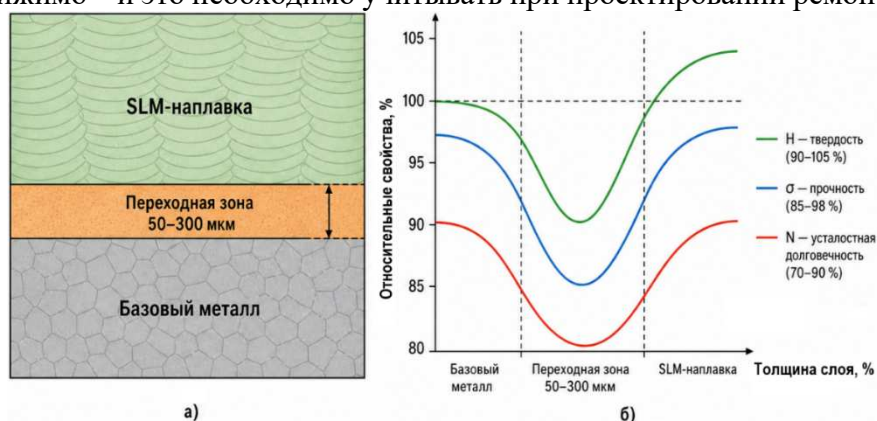


Рис. 2. Зона интерфейса «базовый металл – наплавка» с распределением свойств по глубине: а) Микроструктура схемы сечения; б) распределение относительных свойств по толщине, %

Обобщение данных по восстановлению металлических изделий аддитивными методами позволяет оценить соотношения свойств восстановленной зоны к характеристикам базового металла (табл. 2).

Табл. 2. Соотношения свойств восстановленной зоны к базовому металлу

Свойство	Диапазон, %	Комментарий
Предел прочности	85-98	Зависит от материала и режима наплавки
Твёрдость	90-105	Возможен локальный перегрев
Относительное удлинение	80-95	Чувствительно к остаточным напряжениям
Усталостная прочность	70-90	Критично для валов и штоков

Для приближения свойств к исходным должны соблюдаться следующие условия:

- химическая совместимость порошка и базового металла (разница по основным легирующим элементам $\leq 2-3\%$);
- плотность наплавленного металла не менее 99,5% (отсутствие непроваров и пор);
- применение режимов с пониженной удельной энергией (для светодиодного SLM: 40-80 Дж/мм³);
- термообработка после ремонта (отпуск, при необходимости – горячая изостатическая прессовка);
- комплексный контроль: металлография, микротвёрдость, испытания на растяжение или изгиб, ультразвуковая и рентгеновская дефектоскопия [1, 5].

После выполнения восстановительных работ изделие необходимо проконтролировать. В качестве инженерной оценки степени восстановления предлагается критерий K_{rest} , зависящий от параметров восстановленного (repair) и исходного (base) изделий:

$$K_{rest} = \min\left(\frac{\sigma_{repair}}{\sigma_{base}}; \frac{H_{repair}}{H_{base}}; \frac{N_{repair}}{N_{base}}\right) \geq K_{adm}, \quad (4)$$

где σ – предел прочности; H – твёрдость; N – усталостная долговечность (или предел выносливости); K_{adm} – допустимый коэффициент восстановления, для ответственных деталей принимаемый в диапазоне 0,85-0,95.

Если $K_{rest} \geq K_{adm}$, восстановленная деталь допускается к эксплуатации в соответствии с исходным назначением. При $K_{rest} < K_{adm}$ необходима корректировка режимов, повторный ремонт или снижение допустимой нагрузки [5].

В рамках настоящей статьи в качестве источника энергии рассматривается исключительно высокоточный светодиодный (диодный) лазер. Волоконные, дисковые и иные лазерные источники в процессе восстановления не применяются. Полупроводниковый излучатель с микро-оптикой формирует лазерное пятно диаметром 50-200 мкм, обеспечивая избирательное плавление порошка непосредственно на поверхности восстанавливаемой детали. Толщина одного слоя составляет 20-50 мкм; скорость сканирования – 200-800 мм/с; мощность источника – 200-1000 Вт в зависимости от материала и геометрии дефекта; защитная среда – аргон.

Рассмотрим преимущества светодиодного SLM лазера касательно восстановления изношенных деталей (табл. 3):

- возможность точного управления размером и профилем лазерного пятна, данный пункт критичен для локального ремонта без термического влияния (перегрева) на прилегающие зоны;
- лазерная головка имеет небольшие размеры, чем обусловлена его компактность и мобильность;
- пониженное тепловое вложение позволяет обрабатывать тонкостенные и длинные детали без значительных деформаций, в том числе коробления;
- высокий КПД и сравнительно низкая стоимость полупроводникового источника.

Также имеется ряд ограничений для данного подхода. Мощность диодных лазеров (200-1000 Вт) и плотность мощности в пятне ниже, чем у волоконных систем промышленного SLM. При выполнении обработки требуется тщательный подбор длины волны излучения (инфракрасные диоды – для сталей, синие – для Cu и Al); необходима оптимизация режимов для зоны интерфейса «базовый металл – наплавка».

Таким образом, можно сделать вывод, что, технология селективного лазерного плавления является перспективным методом восстановления металлических изделий и может применяться для обработки длинных цилиндрических деталей, но для этого требуется применение метода сегментированной наплавки, в ходе которого необходим контроль термических

деформаций детали. Высокоточный светодиодный лазер SLM, обеспечивает локальность воздействия, и контролируемый тепловой вклад при восстановлении ответственных деталей. Применения мобильного светодиодного SLM-модуля позволяет выполнять такой ремонт непосредственно на детали, снижая затраты на разборку узла и логистику деталей. При использовании данного метода возможно достичь восстановление свойств исходного материала в пределах 85-98% по ключевым механическим характеристикам при аттестации по критерию *K rest*.

Табл. 3. Сравнение волоконного и светодиодного SLM при восстановлении

Параметр	Волоконный SLM	Светодиодный SLM
Источник энергии	Волоконный лазер	Диодный (светодиодный) лазер
Мобильность	Стационарная камера	Роботизированная головка
Тепловой вклад	Высокий	Умеренный
Применимость к длинным цилиндрам	Ограничена габаритом камеры	Высокая (ремонт на детали)
Точность пятна	Высокая	Высокая (при качественной оптике)
КПД источника	25-35%	40-50%

Дальнейший вектор исследований включает экспериментальную отработку режимов светодиодного SLM для отечественных марок сталей, численное моделирование остаточных напряжений при ремонте длинных валов, а также подтверждение значений на практике.

Список литературы

1. Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.
2. Федорова П.С. Перспективы применения аддитивных технологий в машиностроении (аналитический обзор) // Аллея науки. – 2017. – Т. 1, №8. – С. 447-454.
3. Разносчиков А.С., Жданов А.В., Беляев Л.В. Конструкторско-технологическая подготовка процесса селективного лазерного плавления корпусных деталей // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – №12. – С. 246-250.
4. Квашнина С.А., Салхаб М., Михайлов И.И. Лазерная постобработка деталей, изготовленных методом селективного лазерного плавления // Лазеры в науке, технике, медицине: Сборник научных трудов XXXVI Международной конференции, Москва, 22-24 октября 2025 года. Том 36. – М.: Манускрипт, 2026. – С. 183-187.
5. Бужакова С.П., Зенин Б.С., Ваулина О.Ю., Васильева И.Э. Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения: Сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции, Томск, 11-15 декабря 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – 377 с.

References

1. Molodyk N.V., Zenkin A.S. Restoration of Machine Parts. Handbook. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – 480 p.
2. Fedorova P.S. Prospects for the Application of Additive Technologies in Mechanical Engineering (Analytical Review) // Alley of Science. 2017, vol. 1, no. 8, pp. 447-454.
3. Raznochikov A.S., Zhdanov A.V., Belyaev L.V. Design and Technological Preparation of the Selective Laser Melting Process for Body Parts // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2024, no. 12, pp. 246-250.
4. Kvashnina S.A., Salhab M., Mikhailov I.I. Laser Post-Processing of Parts Made by Selective Laser Melting // Lasers in Science, Technology, and Medicine: Proceedings of the XXXVI International Conference, Moscow, October 22-24, 2025. Volume 36. – M.: Manuscript, 2026. – P. 183-187.
5. Buyakova S.P., Zenin B.S., Vaulina O.Yu., Vasilyeva I.E. Promising Materials for Structural and Functional Purposes: Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Technical Youth Conference, Tomsk, December 11-15, 2023. – Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2023. – 377 p.

Голицын Данил Дмитриевич – аспирант	Golitsyn Danil Dmitrievich – postgraduate student
Горюнов Николай Алексеевич – аспирант	Goryunov Nikolai Alekseevich – postgraduate student
danil.2000.44@mail.ru	

Received 23.06.2026