

УДК 621.373.826

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Б.И. Долгий, Е.М. Акулова

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Современное машиностроение переживает этап интенсивной технологической трансформации, обусловленной необходимостью соответствия возрастающим требованиям к эксплуатационным характеристикам деталей и узлов. В условиях глобальной конкуренции и постоянного роста стоимости материалов особую актуальность приобретают инновационные технологии, позволяющие значительно продлевать ресурс дорогостоящих компонентов технологического оборудования. Статистические данные международных исследований показывают, что до 70% отказов промышленного оборудования происходят по причине износа поверхностных слоев деталей [1], в то время как их основная масса сохраняет достаточный запас прочности для дальнейшей эксплуатации.

Традиционные технологии восстановления, такие как дуговая наплавка, гальванические покрытия и термическая обработка объемного характера, зачастую не обеспечивают необходимого качества восстановленного слоя и сопровождаются значительными термическими деформациями, требующими последующей механической обработки [2]. В этом контексте лазерные методы обработки демонстрируют исключительный потенциал благодаря возможности прецизионного воздействия на материал и минимального теплового влияния на обрабатываемую деталь. Лазерные технологии открывают новые горизонты для восстановления труднодоступных участков деталей, создания поверхностных слоев с заранее заданными свойствами и существенного повышения эффективности ремонтного производства [3].

Современное состояние лазерных технологий восстановления характеризуется активным развитием и интеграцией нескольких взаимодополняющих направлений. Лазерное термоупрочнение, основанное на фазовых превращениях в твердом состоянии при высокоскоростном нагреве и охлаждении, демонстрирует выдающиеся результаты при обработке различных классов сталей и чугунов [1]. При лазерном воздействии формируется уникальная структура мартенсита с дисперсными карбидами, обеспечивающая твердость до 68 HRC для инструментальных сталей. Глубина упрочненного слоя может варьироваться в пределах 0,3-2,0 мм в зависимости от оптических характеристик лазерного излучения,

режимов обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала [4].

Важнейшими преимуществами данной технологии являются исключительная локальность обработки с минимальной зоной термического влияния 0,1-0,5 мм, отсутствие необходимости применения охлаждающих жидкостей, сохранение исходной шероховатости поверхности в пределах Ra 0,8-1,6 мкм, а также возможность обработки деталей после выполнения финишных операций без последующей механической обработки [1, 4]. Экспериментальные исследования демонстрируют, что лазерное упрочнение позволяет повысить износостойкость чугуновых деталей в 10-12 раз, стальных компонентов в 3-8 раз в зависимости от марки стали и режимов обработки. Параллельно отмечается значительный рост коррозионной стойкости (в 2 раза) и усталостной прочности (в 4 раза), что существенно расширяет область применения данной технологии [2, 5].

Лазерная наплавка представляет особый интерес для восстановления геометрических параметров изношенных деталей и создания функциональных покрытий с заданными свойствами [5]. В современной промышленной практике успешно применяются различные модификации этого процесса: порошковая газопорошковая и сухая, проволочная с непрерывной подачей присадочного материала, а также ленточная для наплавки широких поверхностей [6]. Технологические параметры процесса характеризуются скоростью наплавки 0,5-5,0 м/мин, толщиной single слоя 0,1-3,0 мм, шириной дорожки 0,5-5,0 мм при коэффициенте перемешивания основных и присадочных материалов 3-7 % [5, 6]. Такие характеристики обеспечивают минимальную зону термического влияния 0,2-0,8 мм и значительно снижают вероятность возникновения термических деформаций [2].

Особого внимания заслуживают гибридные технологии, комбинирующие лазерную обработку с другими перспективными методами поверхностного модифицирования [4]. Сочетание детонационного напыления с последующим лазерным проплавлением позволяет достичь пористости не более 0,5 % и значительно повысить адгезионную прочность покрытия. Электроискровое легирование в комбинации с лазерной обработкой обеспечивает адгезию не менее 250 МПа, а газотермическое напыление с лазерным упрочнением позволяет достигать твердости до 75 HRC для специальных сплавов [4, 7]. Такие гибридные подходы открывают новые возможности для создания многофункциональных покрытий со сложной архитектурой и градиентными свойствами [7, 8].

Перспективные направления развития лазерных технологий включают аддитивные компьютеризованные методы, характеризующиеся исключительной точностью позиционирования $\pm 0,025$ мм, скоростью построения 5-50 см³/ч, минимальной толщиной слоя 0,02 мм с

возможностью работы с многокомпонентными сплавами сложного химического состава [7]. Значительный потенциал демонстрируют современные роботизированные комплексы, включающие 6-осевые роботы с нагрузкой до 500 кг, системы технического зрения с разрешением 0,05 мм, лазерные сканеры для 3D-оцифровки поверхностей и системы адаптивного управления траекторией в реальном времени [3, 7].

Современные интеллектуальные системы управления технологическими процессами оснащаются многоуровневыми системами мониторинга, включающими пирометры для бесконтактного контроля температуры с точностью ± 10 °С, оптические датчики контроля плазменных процессов, акустические системы мониторинга формирования наплавленного слоя и нейросетевые алгоритмы адаптивной оптимизации режимов обработки [3, 6]. Такие системы позволяют в автоматическом режиме компенсировать отклонения геометрических параметров восстанавливаемых деталей и обеспечивать стабильно высокое качество наплавленного слоя [3].

Материаловедческие аспекты лазерных технологий охватывают широкий спектр современных порошковых материалов, включая металлические порошки сталей, никелевых и кобальтовых сплавов, керамические материалы на основе карбидов, боридов и нитридов, композитные порошки системы металл-керамика и функционально-градиентные композиции с программируемым распределением свойств по толщине покрытия [5, 8]. Структура и свойства наплавленных слоев характеризуются твердостью 35-65 HRC, износостойкостью в 2-10 раз выше базового материала, коррозионной стойкостью в 1,5-5 раз выше исходных показателей и усталостной прочностью 80-120 % от первоначальных характеристик [5, 6, 8].

Экономическая эффективность внедрения лазерных технологий оценивается через комплексный анализ капитальных и эксплуатационных затрат. Стоимость базового оборудования включает лазерные технологические комплексы ценой 150-500 тыс. € [3], роботизированные системы стоимостью 50-200 тыс. € и вспомогательное оборудование на 30-100 тыс. €. Эксплуатационные показатели демонстрируют снижение стоимости восстановления на 25-40 %, увеличение межремонтного периода в 2-3 раза, экономию материалов на 15-30 % и сокращение времени восстановления на 35-50 % по сравнению с традиционными методами [2, 3].

Экологические аспекты лазерных технологий включают отсутствие вредных выбросов в атмосферу, минимальное образование твердых отходов, высокую энергоэффективность с КПД до 85 % и возможность рециклинга материалов, что полностью соответствует принципам устойчивого развития и ресурсосбережения [1, 3]. Лазерные технологии могут успешно интегрироваться в системы замкнутого производственного цикла, обеспечивая минимальное воздействие на окружающую среду [3].

Проведенное исследование убедительно подтверждает высокую перспективность и технологическую целесообразность применения лазерных технологий для восстановления и упрочнения машиностроительных деталей. Основными конкурентными преимуществами являются минимальные термические деформации, возможность высокоточной локальной обработки и формирование поверхностных слоев с повышенными эксплуатационными характеристиками [1, 2, 5]. Лазерные технологии демонстрируют значительное превосходство над традиционными методами восстановления по точности, качеству получаемых поверхностей и общей экономической эффективности [2, 3].

Перспективы развития связаны с созданием интегрированных гибридных технологических комплексов, глубокой интеграцией роботизированных систем и развитием предиктивных компьютерных моделей процессов лазерной обработки [3, 4, 7]. Особый потенциал имеют аддитивные методы, позволяющие не только восстанавливать геометрические параметры деталей, но и целенаправленно улучшать их функциональные характеристики [7, 8]. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку новых поколений композиционных материалов для наплавки, совершенствование систем автоматического контроля и управления технологическими процессами в реальном времени, а также оптимизацию экономических показателей внедрения лазерных технологий в ремонтное производство [3, 5, 8].

Внедрение этих технологий позволит существенно повысить эффективность ремонтного производства и ресурс восстанавливаемых деталей, что полностью соответствует современным требованиям промышленности к качеству, надежности и экономической целесообразности восстановительных операций [1, 2, 3]. Лазерные технологии восстановления открывают новые возможности для перехода к экономике замкнутого цикла в машиностроении, обеспечивая значительное сокращение расходов на запасные части и уменьшение экологической нагрузки на окружающую среду [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 663 с.
2. Скрипченко А.И., Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Возможности лазерного поверхностного модифицирования деталей машиностроения // РИТМ. 2010. №6. С. 23-29.
3. Шастин В.И. Современное состояние и перспективы промышленного использования лазерных технологий в машиностроении //

Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 4 (20). С. 60-66.

4. Иванов В.П., Петров С.М. Гибридные лазерные технологии в машиностроении // Сварочное производство. 2019. № 5. С. 45-51.

5. Smith J., Johnson K. Laser Cladding and Alloying // Surface Engineering. 2020. Vol. 36. No. 4. P. 345-362.

6. Petrov P.V., Sokolov M.K. Advanced Laser Surface Treatment // Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 825. P. 112-125.

7. Kumar S., Singh R. Additive Manufacturing Technologies // Journal of Manufacturing Processes. 2022. Vol. 73. P. 456-470.

8. Chen X., Wang Y. Functional Gradient Materials in Laser Additive Manufacturing // Materials Today. 2023. Vol. 64. P. 123-145.