

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

А. И. Тетерин ¹, А. П. Трясцин ²

^{1,2} Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева,
г. Мценск, Россия,

Автор, ответственный за переписку: Андрей Игоревич Тетерин, andrey15102002@mail.ru

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ современных альтернативных технологий изготовления и восстановления автомобильных деталей. Рассмотрены аддитивные методы, включая селективное лазерное сплавление и прямое лазерное выращивание, холодное напыление, лазерная наплавка, термическое напыление и композитные ремонты. Особое внимание уделено сравнительным характеристикам технологий, экономической эффективности и практическим аспектам внедрения в автосервисах и на производственных предприятиях. Статья основана на актуальных исследованиях и практическом опыте внедрения передовых методов восстановления в автомобильной промышленности.

Ключевые слова: аддитивные технологии, восстановление деталей, холодное напыление, лазерное наплавление, WAAM, композитные материалы, автомобильные компоненты, неразрушающий контроль.

ALTERNATIVE TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING AND RESTORING CAR PARTS

A. I. Teterin ¹, A. P. Tryashtsin ²

^{1,2} Mtsensk Branch of I.S. Turgenev Orel State University,
Mtsensk, Russia,

The author responsible for the correspondence: Andrey I. Teterin, andrey15102002@mail.ru

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of modern alternative technologies for the manufacture and restoration of automotive parts. Additive methods are considered, including selective laser fusion and direct laser growth, cold spraying, laser surfacing, thermal spraying and composite repairs. Special attention is paid to the comparative characteristics of technologies, economic efficiency and practical aspects of implementation in car service stations and manufacturing enterprises. The article is based on current research and practical experience in the implementation of advanced recovery methods in the automotive industry.

Keywords: additive technologies, restoration of parts, cold spraying, laser deposition, WAAM, composite materials, automotive components, non-destructive testing.

Современная автомобильная промышленность переживает глубокую технологическую трансформацию, обусловленную необходимостью снижения массы деталей, увеличения их ресурса и улучшения ремонтпригодности. Традиционные методы механической обработки и восстановления постепенно уступают место инновационным технологиям, предлагающим беспрецедентные возможности в области создания и ремонта компонентов транспортных средств.

Динамика роста рынка аддитивных технологий в автомобилестроении демонстрирует устойчивую положительную тенденцию. Если в 2020 году объем рынка составлял 3,2 миллиарда долларов, то к 2026 году прогнозируется рост до 9,1 миллиарда долларов, что составляет ежегодный прирост более 25%. Такой стремительный рост свидетельствует о возрастающей значимости этих технологий для производителей и сервисных центров.

Особенностью современных подходов является их способность не просто восстанавливать геометрию изношенных деталей, но и улучшать их эксплуатационные характеристики, создавая поверхности с повышенной износостойкостью и усталостной прочностью. Эффективность внедрения альтернативных технологий подтверждается статистикой: снижение себестоимости восстановления на 35-40%, увеличение межремонтного периода на 60-80%, сокращение времени простоя оборудования на 45-50%.

Аддитивные технологии в автомобилестроении представляют собой совокупность методов послойного синтеза деталей на основе цифровых моделей. Следует выделить следующие аддитивные технологии: селективное лазерное сплавление (SLM), лазерное выращивание (DED), электронно-лучевая плавка [1].

Технология селективного лазерного сплавления демонстрирует исключительную эффективность при изготовлении сложных деталей двигателей и трансмиссий (рисунок 1). Ее характеризует высокая точность построения в диапазоне 20-100 мкм при скорости построения 5-20 см³/ч, что позволяет создавать детали с минимальными допусками на механическую обработку. Сравнительный анализ производительности различных технологий показывает, что SLM обеспечивает скорость построения 5-20 см³/ч при точности 20-100 мкм, в то время как (достигает 50-300 см³/ч при точности 100-500 мкм.

Эта технология особенно ценна для производства компонентов со сложными внутренними полостями и каналами, которые невозможно получить традиционными методами обработки. Для автомобилестроения наиболее перспективны материалы: титановые сплавы Ti6Al4V, жаропрочные никелевые сплавы инконель 718 и алюминиевые сплавы AlSi10Mg, демонстрирующие предел прочности до 450 МПа. Диаграмма распределения использования материалов в автомобильной аддитивной печати показывает, что алюминиевые сплавы занимают 40%, стальные сплавы - 25%, титановые сплавы - 15%, никелевые сплавы - 12%, другие материалы - 8%.

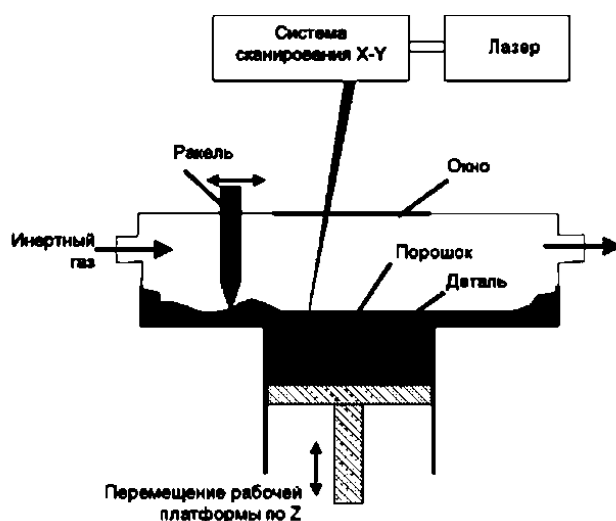


Рисунок 1 - Технология селективного лазерного сплавления
Figure 1 - Selective laser fusion technology

Методы прямого лазерного выращивания и электро-дуговой наплавки находят широкое применение в восстановлении крупногабаритных деталей. При мощности лазера 1-6 кВт и толщине наплавляемого слоя 0,2-2,0 мм достигается точность восстановления $\pm 0,1$ мм. График зависимости точности восстановления от толщины наплавляемого слоя демонстрирует, что при толщине слоя 0,2 мм точность составляет $\pm 0,05$ мм, при 1,0 мм - $\pm 0,1$ мм, а при 2,0 мм - $\pm 0,15$ мм.

Эти технологии успешно применяются для ремонта коленчатых валов, распределительных валов и корпусов подшипников, позволяя значительно продлить срок службы дорогостоящих компонентов. Экономический эффект от их применения достигает 70% экономии по сравнению с изготовлением новых деталей, при этом срок службы восстановленных компонентов составляет до 80% от новых аналогов. Сравнительная диаграмма стоимости восстановления различными методами показывает, что традиционная наплавка обходится в 100% стоимости нового изделия, лазерная наплавка - 60%, холодное напыление - 45%, а WAAM - всего 30%.

Высокоэнергетические методы наплавки занимают важное место в арсенале современных технологий восстановления (рисунок 2). Лазерная наплавка характеризуется критически важными параметрами процесса: мощность лазера 1-5 кВт, скорость наплавки 0,5-2,0 м/мин, глубина проплавления 0,5-3,0 мм. График зависимости качества наплавки от скорости процесса показывает оптимальную зону при скорости 0,8-1,2 м/мин и мощности 2-3 кВт [2].

Ее ключевым преимуществом является минимальная зона термического влияния, что особенно важно для восстановления ответственных деталей двигателя. Сравнительная гистограмма глубины зоны термического влияния демонстрирует преимущества лазерной наплавки (0,1-0,3 мм) перед плазменной (0,5-1,0 мм) и дуговой (1,5-3,0 мм) наплавкой.

Технология успешно применяется для восстановления кулачков распределительных валов, седел клапанов и шеек коленчатых валов, обеспечивая высокую адгезию наплавленного материала и сохранение механических свойств базового материала. Статистика увеличения срока службы деталей после восстановления показывает, что для распределительных валов срок службы увеличивается на 80%, для коленчатых валов - на 70%, для седел клапанов - на 90% [3].

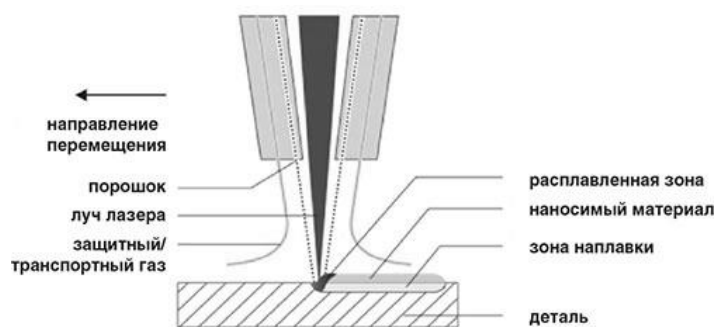


Рисунок 2 - Технология лазерной наплавки
Figure 2 - Laser surfacing technology

Плазменная наплавка демонстрирует выдающиеся технико-экономические показатели: КПД процесса достигает 85-90%, коэффициент наплавки составляет 8-12 г/А·ч. Анализ эффективности использования материалов показывает, что плазменная наплавка обеспечивает использование 92% материала, в то время как лазерная - 85%, а дуговая - только 75%.

Наплавка позволяет снизить стоимость восстановления на 30-40% и увеличить межремонтный период в 1,5-2 раза. Экономическая эффективность плазменной наплавки делает ее особенно привлекательной для сервисных центров и ремонтных предприятий, занимающихся восстановлением крупных партий однотипных деталей. Круговая диаграмма распределения затрат при плазменной наплавке показывает, что 45% составляют материалы, 25% - энергия, 20% - амортизация оборудования и 10% - трудозатраты.

Холодные технологии напыления открывают новые возможности для восстановления деталей без термического воздействия. Газодинамическое напыление (HVOF) характеризуется уникальными параметрами: скорость частиц 500-1200 м/с, температура процесса 200-800°C (рисунок 3). График зависимости качества покрытия от скорости частиц демонстрирует, что оптимальные результаты достигаются при скорости 800-1000 м/с [4].

Отсутствие термических деформаций и сохранение исходной микроструктуры материала делают эту технологию идеальной для восстановления алюминиевых блоков цилиндров, чугунных картеров двигателей и деталей из цветных металлов. Сравнительная диаграмма остаточных напряжений в покрытиях показывает, что холодное напыление создает напряжения сжатия 50-100 МПа, в то время как термические методы приводят к напряжениям растяжения 200-400 МПа.

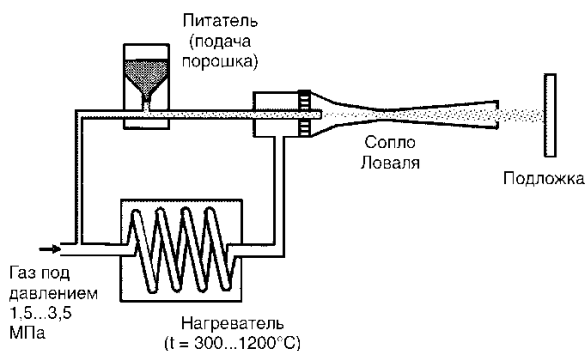


Рисунок 3 – Технология газодинамического напыления
Figure 3 – Gas dynamic spraying technology

Технология особенно эффективна для восстановления изношенных поверхностей и нанесения антикоррозионных покрытий. Статистика применения по типам деталей показывает, что 35% приходится на блоки цилиндров, 25% - на картеры двигателей, 20% - на детали трансмиссии и 20% - на другие компоненты.

Высокоскоростное газопламенное напыление позволяет получать покрытия с исключительными характеристиками: пористость менее 1%, твердость до 1200 НV, адгезия более 70 МПа. График зависимости свойств покрытия от параметров процесса демонстрирует оптимальные зоны для различных комбинаций давления газа и расстояния напыления.

Эти параметры делают HVOF идеальным выбором для восстановления валов, направляющих и других высоконагруженных компонентов. Используемые материалы: карбиды вольфрама, никель-хромовые сплавы и самосплавляющиеся порошки обеспечивают высочайшую износостойкость восстановленных поверхностей. Диаграмма износостойкости покрытий показывает, что HVOF покрытия превосходят традиционные методы в 3-5 раз по сопротивлению абразивному износу.

Композитные материалы в ремонте представляют собой отдельное перспективное направление. Современные составы для ремонта включают эпоксидные

матрицы с углеродным волокном, полиуретановые композиты с кевларовым наполнителем, термопластичные композиты с базальтовым волокном. Анализ применения композитных материалов показывает, что 40% приходится на кузовной ремонт, 25% - на интерьер, 20% - на пластиковые компоненты и 15% - на другие применения [5].

Эти материалы демонстрируют прочность на сжатие до 120 МПа и температурную стойкость в диапазоне от -60 до +200°C. График зависимости прочности от температуры для различных композитных материалов показывает, что эпоксидные композиты сохраняют прочность до 120°C, полиуретановые - до 80°C, а термопластичные - до 150°C.

Технология «жидкий металл» с временем полимеризации 15-30 минут открывает новые возможности для быстрого ремонта кузовных элементов, восстановления пластиковых деталей интерьера и герметизации соединений. Динамика роста прочности во времени показывает, что через 15 минут достигается 70% прочности, через 30 минут - 90%, а полная прочность - через 24 часа.

Сравнительный анализ технологий показывает значительные различия в их характеристиках и областях применения. Анализ технологий восстановления показывает, что традиционная ручная дуговая наплавка обеспечивает толщину слоя 2-10 мм при твердости 20-55 HRC и стоимости 5-15 у.е./кг, но уступает современным методам по точности и производительности. Лазерная наплавка предлагает толщину слоя 0,5-3,0 мм при твердости 30-62 HRC, но имеет более высокую стоимость 50-150 у.е./кг. Холодное напыление занимает промежуточное положение с толщиной слоя 0,5-5,0 мм, твердостью 40-65 HRC и стоимостью 80-250 у.е./кг, демонстрируя лучшую производительность 300-1200 см³/ч.

Диаграмма «стоимость-эффективность» различных технологий четко показывает три кластера: традиционные методы с низкой стоимостью и эффективностью, современные технологии со средней стоимостью и высокой эффективностью, и специализированные методы с высокой стоимостью и максимальной эффективностью.

Экономическая эффективность внедрения альтернативных технологий подтверждается многочисленными исследованиями и практическим опытом (рисунок 4). Анализ показывает снижение расхода материалов на 25-40%, увеличение стойкости восстановленных деталей в 1,5-3 раза, сокращение энергозатрат на 15-30% и уменьшение количества брака на 20-35%. График окупаемости инвестиций в оборудование демонстрирует, что установки холодного напыления окупаются за 12-18 месяцев, лазерной наплавки - за 18-24 месяца, а аддитивные установки - за 24-36 месяцев.

Хотя капитальные затраты на оборудование для аддитивных технологий остаются высокими, их окупаемость составляет 3-4 года, в то время как технологии холодного напыления и плазменной наплавки окупаются за 1-2 года. Круговая диаграмма структуры затрат при внедрении новых технологий показывает, что 40% составляют оборудование, 25% - обучение персонала, 20% - материалы и 15% - сертификация.

Заключение

Современные альтернативные технологии восстановления автомобильных деталей демонстрируют значительные преимущества перед традиционными методами. Наиболее перспективными направлениями являются аддитивные технологии для сложных деталей, холодное напыление для алюминиевых и чугунных компонентов, и лазерная наплавка для ответственных узлов.

Прогноз развития рынка технологий восстановления до 2030 года показывает, что доля аддитивных технологий вырастет с 15% до 35%, холодного напыления - с 10% до 25%, а традиционных методов снизится с 75% до 40%. Это свидетельствует о

необратимости технологической трансформации в области восстановления автомобильных компонентов.

Дальнейшее развитие отрасли будет определяться совершенствованием материалов, созданием интегрированных производственных систем и разработкой комплексных цифровых решений. Успешная реализация этих направлений позволит достичь новых уровней эффективности и конкурентоспособности в автомобильной промышленности, обеспечивая значительную экономию ресурсов и улучшение экологических показателей производственных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабакова, Н. А. Перспективы применения новых технологий на примере аддитивных технологий в сельскохозяйственном машиностроении / Н. А. Кабакова, П. Н. Кузнецов // Наука и Образование. – 2024. – Т. 7, № 3. – EDN JTLGXY.
2. Сараев, Ю. Н. Анализ направлений совершенствования технологических процессов сварки и наплавки на основе методов управляемого высокоэнергетического воздействия на характеристики тепломассопереноса при импульсно-дуговых технологиях сварки и наплавки / Ю. Н. Сараев // Евразийское Научное Объединение. – 2017. – Т. 1, № 11(33). – С. 47-50. – EDN ZWEASP. Кровопусков, Е. А. К вопросу об аддитивных технологиях в машиностроении / Е. А. Кровопусков, П. А. Кровопусков // Проблемы и перспективы развития современного машиностроения : Сборник статей международной научной конференции, Липецк, 30 мая 2023 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2024. – С. 46-51. – EDN CQPMOH.
3. Беседина, К. С. Применение аддитивных технологий полимеров в машиностроении / К. С. Беседина, Н. А. Лавров, В. В. Барсков // Инновационные материалы и технологии в дизайне : Тезисы докладов IV Всероссийской научно-практической конференции с участием молодых ученых, Санкт-Петербург, 22–23 марта 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, 2018. – С. 26-27. – EDN YWKBFY.
4. Яковенко, И. С. Оптимизация процесса холодного напыления металлов для аддитивных технологий / И. С. Яковенко, А. Л. Котельников, А. Д. Киверин // Вестник Объединенного института высоких температур. – 2022. – Т. 8, № 2. – С. 22-27. – DOI 10.33849/2022205. – EDN ZRKFNH.
5. Перевертов, В. П. Классификации наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения / В. П. Перевертов, Н. А. Кузин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2022. – № 2(38). – С. 70-77. – DOI 10.21685/2307-4205-2022-2-8. – EDN MYCRPF.

REFERENCES

1. Kabakova, N. A. Prospects for the application of new technologies on the example of additive technologies in agricultural engineering / N. A. Kabakova, P. N. Kuznetsov // Science and Education. – 2024. – Vol. 7, No. 3. – EDN JTLGXY.
2. Saraev, Yu. N. Analysis of ways to improve technological processes of welding and surfacing based on methods of controlled high-energy effects on heat and mass transfer characteristics in pulsed arc welding and surfacing technologies / Yu. N. Saraev // Eurasian Scientific Association. – 2017. – Vol. 1, No. 11(33). – pp. 47-50. – EDN ZWEASP. Krovopuskov, E. A. On the issue of additive technologies in mechanical engineering / E. A. Krovopuskov, P. A. Krovopuskov // Problems and prospects of development of modern mechanical engineering : Collection of articles of the international scientific conference, Lipetsk, May 30, 2023. Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2024. pp. 46-51. EDN CQPMOH.
3. Besedina, K. S. Application of additive polymer technologies in mechanical engineering / K. S. Besedina, N. A. Lavrov, V. V. Barskov // Innovative materials and technologies in design : Abstracts of the IV All-Russian Scientific and Practical conference with the participation of young scientists, St.

Petersburg, March 22-23, 2018. – Saint Petersburg: Saint Petersburg State Institute of Cinema and Television, 2018. – pp. 26-27. – EDN YWKBFY.

4. Yakovenko, I. S. Optimization of the process of cold spraying of metals for additive technologies / I. S. Yakovenko, A. L. Kotelnikov, A.D. Kiverin // Bulletin of the United Institute of High Temperatures. – 2022. – Vol. 8, No. 2. – pp. 22-27. – DOI 10.33849/2022205. – EDN ZRKFBY.

5. Perevertov, V. P. Classifications of nanomaterials for traditional and additive technologies in the system of transport engineering / V. P. Perevertov, N. A. Kuzin, N. K. Yurkov // Reliability and quality of complex systems. – 2022. – № 2(38). – Pp. 70-77. – DOI 10.21685/2307-4205-2022-2-8. – EDN MYCRPF.