

УДК 621.791.92

Оценка возможности аддитивного восстановления деталей и узлов оборудования методом коаксиального лазерного плавления

Александров Александр Александрович^(*)

alexandrov@bmstu.ru

SPIN-код: 4169-0392

Мисюров Александр Иванович^(*)

misyurov50@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена актуальность применения технологии коаксиального лазерного плавления и метода реверс-инжиниринга для восстановления деталей и узлов промышленного гидравлического оборудования. Проанализированы существующие способы восстановления сложных криволинейных поверхностей. Описаны рекомендации по использованию метода реверс-инжиниринга. Рассмотрены проблемы, возникающие при аддитивном восстановлении деталей, а также приведены рекомендации по снижению вероятности образования дефектов. Сделаны выводы о применимости данной технологии и определен вектор развития дальнейших исследований.

Ключевые слова: аддитивные технологии, коаксиальное лазерное плавление, жаропрочные сплавы, технологическая прочность, кристаллизационные трещины

Введение. Стремление к технологическому суверенитету является драйвером развития отечественной промышленности, АТ являются наиболее гибким и ценным технологическим инструментом, способным удовлетворить запросы в различных сегментах промышленности. Технология коаксиального лазерного плавления может использоваться для быстрого производства новых и восстановления уже существующих деталей. Основными областями применения КЛП являются: авиация; космическая отрасль; атомная промышленность; нефтегазовый сектор; энергетическая отрасль и турбиностроение; аддитивное восстановление и т. д.

Реверс-инжиниринг (реинжиниринг, обратное проектирование) — это метод, заключающийся в исследовании принципа работы и особенностей готового изделия для дальнейшего применения с целью: создания геометрической копии, разработки конструкторской документации. По данным маркетингового исследования [1] рынок услуг реверс-инжиниринга в 2021 г. оценивался в 72 млн руб., а в 2024 г. спрос на аналогичные услуги достиг 911 млн руб. Применение связки технологии коаксиального лазерного плавления и реверс-инжиниринга является актуальным для восстановления поверхностей валов, рабочих колес, корпусов и других деталей, и узлов насосного оборудования.

Методы и материалы; результаты. Среди этапов реверс-инжиниринга для осуществления последующего аддитивного восстановления поверхностей деталей можно выделить следующие основные шаги: сбор и оцифровка дан-

ных (3D-сканирование с помощью лазерного сканера); создание параметрической модели на основе полученных данных (облако точек); цифровое восстановление отсутствующего участка поверхности;

Наиболее низкую стоимость имеют дуговые процессы, однако их чаще всего применяют для восстановления больших объемов поверхностей с высокой производительностью на малоответственные детали, для которых допускается последующая обработка в термических печах [2]. Преимуществами восстановления с помощью технологии КЛП являются: высокая локальная концентрация энергии в пятне нагрева, а также минимальный коэффициент перемешивания с материалом подложки, что является критичным для материалов, претерпевающих структурные и фазовые превращения. Основные требования к восстанавливаемым поверхностям: отсутствие трещин и пор; уменьшение перемешивания основного металла с наплавляемым; снижение остаточных напряжений и деформаций [3]; минимальная ЗТВ и т. д. Для осуществления процесса аддитивного выращивания и/или восстановления необходимо подготовить управляющую программу (УП) на основе цифровой CAD-модели. Для наплавки предлагается использование универсального наплавочного роботизированного комплекса, оснащенного волоконным итербиевым лазером мощностью 5 кВт.

В качестве материала для аддитивной восстановительной наплавки деталей из нержавеющей стали используются порошки на никелевой основе, например Inconel 625, обладающий высокой коррозионной стойкостью КТР сплава близок к аустенитной нержавеющей стали, что снижает остаточные напряжения в ЗТВ. Никелевые сплавы считаются условно «несвариваемыми» по причине повышенной склонности к трещинообразованию. На вероятность образования трещин влияют как химический состав материала, так и технологические режимы наплавки [4]. Для оценки склонности материала к образованию трещин Н.Н. Прохоровым было введено понятие показателя технологической прочности [5]. Для косвенного измерения значения этого показателя ранее была разработана и успешно испытана технологическая проба, позволяющая подобрать оптимальные технологические параметры процесса.

При аддитивном восстановлении важна производительность наплавки. Были проведены эксперименты по оцениванию влияния параметров процесса на формирование геометрии единичных валиков. В рамках эксперимента варьировались значения параметров: скорость наплавки (V , мм/мин); мощность лазерного излучения (P , Вт) и расход порошка (R , г/мин). Скорость наплавки варьировали в диапазоне 400–1000 мм/мин, мощность лазерного излучения в диапазоне 800–1000 Вт, а подачу порошка 8–9 г/мин. Оценивали геометрические размеры наплавленной зоны: высоту (h , мм) и ширину (b , мм) отдельного валика, глубину проплавления подложки (l , мм), ширину зоны термического влияния (ЗТВ, мм) и «полезную» площадь поперечного сечения наплавленного валика ($S_{пл}$, мм), получаемых при различных параметрах режима наплавки. Полученная модель регрессии показывает, что в рассмотрен-

ном диапазоне режимов высота наплавленного валика может изменяться от 0,12 до 0,77 мм, ширина находится в пределах от 1,24 до 1,50 мм, глубина проплавления от 0,30 до 0,55 мм, ширина зоны термического влияния от 0,50 до 0,83 мм, «полезная» площадь поперечного сечения — от 0,10 до 0,75 мм². Установлено, что наиболее значимыми факторами являются скорость движения источника излучения (V), а также объемный коэффициент подачи порошкового материала (R). Оптимизация значений параметров технологического процесса позволяет повысить производительность наплавки и минимизировать вероятность образования дефектов в нанесенных слоях.

Заключение. В данной статье проанализирована актуальность применения технологии лазерной аддитивной наплавки для изготовления и восстановления деталей и узлов гидравлического насосного оборудования. Сформулированы требования к наплавленным поверхностям. Рассмотрены альтернативные способы восстановительной наплавки и обоснован выбор технологии коаксиального лазерного плавления. Описаны технологические этапы, а также преимущества использования метода реверс-инжиниринга для получения цифровой 3D-модели изделия. Приведены экспериментальные данные оценки параметров формирования геометрии наплавленных единичных валиков. Определены наиболее важные параметры процесса. Обоснован выбор материала и проанализированы дефекты, возникающие при лазерной наплавке никелевых сплавов.

Список источников

- [1] *Отчет маркетингового исследования «Рынок технологий аддитивного производства РФ 2025»*. URL: <https://k-at.ru/> (дата обращения 29.06.2025).
- [2] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Аддитивные технологии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, 339 с.
- [3] Гонсалес Л.Ф. *Методики оптимизации процесса лазерного нанесения износостойких покрытий на валы газовых турбин*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2017, 148 с.
- [4] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 664 с.
- [5] Прохоров Н.Н. Технологическая прочность металлов в процессе кристаллизации при сварке. *Сварочное производство*, 1962, № 4, с. 1–5.