

УДК 621.373.826

## СОЗДАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДНО-НИКЕЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ КОАКСИАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Алина Владиславовна Гебеш<sup>(1)</sup>, Ольга Алексеевна Лютикова<sup>(2)</sup>, Ширин Уктамжон кизи Якубова<sup>(3)</sup>

*Студенты 5 курса,  
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»  
Московский государственный технический университет*

*Научные руководители: А.А. Холопов, М.А. Мельникова,  
кандидаты технических наук, доценты кафедры «Лазерные технологии в  
машиностроении»*

Данная работа посвящена изучению особенностей создания медно-никелевых структур, получаемых коаксиальным лазерным плавлением (КЛП) – методом наплавки, более известным как «прямое осаждение металла». Исследовалось влияние мощности лазерного излучения и скорости обработки на геометрические и качественные характеристики наплавляемого валика. Изучалась структура переходного медно-никелевого слоя и особенности сплавления разнородных материалов. Отдельное внимание уделялось изучению исходного наплавочного материала.

Применение аддитивных технологий, в частности, КЛП, по сравнению с традиционным производством в ракетно-космической отрасли очень привлекательно, потому как аддитивное производство (АП) может значительно уменьшить стоимость производства, сократить сроки изготовления, повысить надёжность за счёт уменьшения количества деталей в агрегатах и улучшить работу отдельных компонентов, позволив применить в конструкции новые элементы, изготовление которых обычными средствами невозможно. В связи с этим наплавка жаропрочного никелевого порошка Inconel 625 на медный субстрат и изучение её свойств является крайне актуальной, так как может найти применение при изготовлении элементов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).

Были выявлены проблемы, с которыми можно столкнуться при осуществлении лазерной наплавки разнородных материалов: образование межкристаллитных и холодных трещин, пор, появление больших растягивающих и сжимающих напряжений, а также пластических деформаций. Составился ряд мероприятий, необходимых для преодоления или снижения влияния вышеперечисленных сложностей. К примеру, предварительный подогрев подложки помогает избежать появления холодных трещин, а последующая термическая обработка – растягивающих напряжений.

Была установлена взаимосвязь между предварительным прокаливанием In625 и отсутствием или минимизацией пор в наплавляемых треках. Для уменьшения шероховатости в дальнейшем можно проводить выглаживание каждого валика после укладки лазерным излучением без порошка, однако это снизит общую производительность.

Как уже отмечалось ранее, анализ и подготовка порошкового материала к обработке являются неотъемлемой частью проведенного исследования. К наплавляемому никелевому сплаву предъявлялся ряд требований, соответствие которым было выявлено путем гранулометрического анализа, изучения отдельных частиц порошка под микроскопом, проведения химического анализа состава, а также томографии. Путём данных исследований подтвердилось соответствие выбранного

порошка заданному диапазону размеров частиц и так необходимой для равномерной наплавки сферической форме без внутренней пористости и наростов-сателлитов.

По завершении исследовательской части была составлена сетка из  $4^2=16$  экспериментов с двумя регулируемые параметрами обработки: мощностью излучения  $P$  [Вт], которую изменяли в диапазоне от 400 до 490 Вт с шагом 30 Вт, и скоростью наплавки  $v$  [мм/мин] в диапазоне от 650 до 800 мм/мин с шагом 50 мм/мин, от которой зависит величина подачи порошка  $q$ , [г/с]. Также был рассчитан наиболее оптимальный режим обработки, который должен соответствовать наибольшей производительности процесса наплавки:

Таблица 1. Оптимальный режим наплавки

№ п/п	Параметр	Значение
1	Мощность излучения	$P=430$ Вт
2	Фокусное расстояние линзы	$f=425$ мм
3	Диаметр луча в зоне обработки	$d=2$ мм
4	Скорость наплавки	$v = 750 \left[ \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \right]$
5	Угол подачи порошка	$\alpha=90^\circ$
6	Коэффициент перекрытия валиков	$k=0,7$

Выявились закономерности выращивания треков в зависимости от исходных данных и влияние каждого отдельного изменяемого параметра на характеристики валиков. Следующим этапом стало изучение полученной микроструктуры переходного медно-никелевого слоя: оценка качества сцепления никелевого порошка с медной подложкой и степень их переплавления, которые оказали влияние на сплавление нижних слоёв выращиваемой детали сопла. Размер зоны термического влияния и непрерывность формирования валиков также представляют интерес для исследования.

Результатом данной работы стал анализ и подготовка никелевого сплава к аддитивному процессу. Были рассмотрены проблемы, с которыми можно столкнуться при создании разнородной структуры и методы их решения, была изучена получаемая при КЛП Inconel 625 на медный субстрат изделия биметаллическая композиция, а также предложены способы улучшения её характеристик.

## Литература

1. Dutta B., Palaniswamy S., Choi J., Song L.J., Mazumber J. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition. //Advanced materials & processes / Michigan, University of Michigan, 2011. – С. 33-36.
2. Григорьянц А.Г., Кошлаков В. В., Ризаханов Р. Н., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И., Фунтиков В.А. Формирование биметаллических структур методом коаксиального лазерного плавления // Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 3 (93). С. 32 – 38.
3. Кузнецов П.А., Васильева О.В., Теленков А.И., Савин В.И., Бобырь В.В. Аддитивные технологии на базе металлических порошковых материалов для российской промышленности // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – №2. – с.4-10.