

Особенности применения лазерного коаксиального плавления порошковых материалов для создания объектов из сплавов на основе меди

© А.Ю. Шишов^{1,2}, М.А. Мельникова^{1,2}, А.А. Холопов¹,
А.И. Мисюров¹, А.В. Пересторонин^{1,2}, А.Р. Смирнов²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² НОЦ «ЦАТ» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Среди методов аддитивных технологий широкое распространение получил метод коаксиального лазерного плавления. В качестве материалов для данной технологии применяют различные порошки, подбираемые в зависимости от поставленных задач и конечных характеристик. Одним из перспективных направлений для внедрения является создание сложных конструкций из медных сплавов для авиастроения. Ввиду ограниченного количества опубликованных сведений об использовании медных сплавов, в частности бронз, в этой технологии, в работе проведено исследование с целью понимания процесса формирования материала при выращивании методом коаксиального лазерного плавления. В результате исследования сплавления бронз со стальной подложкой выявлены характерные особенности, которые позволили поставить вторую задачу — изучение сплавления бронз с медной подложкой. Выявлены причины образования дефектов. Рассмотрена микроструктура образцов и измерена их микротвердость в различных зонах.

Ключевые слова: лазер, коаксиальное лазерное плавление, лазерная наплавка, порошковая металлургия, лазерная обработка, прямая лазерная наплавка

Введение. Аддитивные технологии — это современные процессы создания конструктивно сложных деталей, которые невозможно или экономически нецелесообразно изготавливать традиционными методами. Одной из таких технологий является прямое коаксиальное лазерное плавление (КЛП). Этот процесс заключается в создании объектов путем последовательного нанесения слоев порошка и их расплавления от нижнего к верхнему слою при одновременной подаче порошка и лазерного луча через сопло с фокусировкой излучения лазера в заданный диаметр пятна и направлением потока подачи порошка непосредственно в зону обработки.

Технология лазерного аддитивного выращивания стала одним из наиболее актуальных направлений современной промышленности благодаря существенному сокращению сроков изготовления и снижению себестоимости при единичном и мелкосерийном производстве. Применение этой технологии позволяет изготавливать изделия высокой сложности и геометрии [1–3]. Процесс КЛП отличается высокой производительностью, а также возможностью выращивания деталей из разных, в том числе градиентных, композитных материалов. Именно

такие особенности аддитивных технологий обеспечивают возможность создания различных объектов для ракето- и авиастроения.

В качестве материалов для лазерного коаксиального выращивания в настоящее время применяются порошки любых видов — от стальных до композиционных [2]. Одними из наиболее многообещающих материалов являются меди и медные сплавы, область применения которых разнообразна, что обусловлено их высокими электропроводностью и теплопроводностью, способностью подвергаться пластическому деформированию, хорошей сопротивляемостью коррозии. Медные сплавы, легированные хромом (бронзы), получили широкое распространение благодаря тому, что их твердость повышается даже при незначительном уменьшении электропроводности.

Коаксиальное лазерное плавление медных порошковых материалов является перспективным направлением исследования. Так, известно [3–6], что водород влияет на качество сварных соединений: при сварке бронз выгорание легирующих примесей может стать причиной появления пористости вследствие диффузии водорода к пористости и трещинам, возникновение горячих трещин обуславливает взаимодействием меди и кислорода. Использование таких материалов достаточно широко распространено, в том числе и в ракетостроении, в связи с чем повышается важность разработки нового метода, позволяющего создавать или восстанавливать детали из меди марки БрХ.

В качестве источника излучения для коаксиального лазерного плавления применяют газовые лазеры, лазеры видимого диапазона, твердотельные или волоконные лазеры [7]. Проанализировав параметры, которые используются для выращивания [8], можно оценить диапазон плотности мощности для обработки методом КЛП: для 1,064 мкм — $2 \cdot 10^8$ Вт/см², для 515 мкм — 10^4 и 10^5 Вт/см² в зависимости от диаметра пятна.

Медные сплавы, а также порошки из них имеют высокую теплопроводность, что усложняет создание и обработку объектов из них. Эти и иные особенности приводят к усложнению процесса наплавки, к необходимости подбора специальных режимов и стратегий обработки, чтобы избежать образования дефектов в изделиях. Требуется также учитывать осложняющие процесс большие значения теплоты и температуропроводности меди, которые создают высокие градиенты температуры и скорости охлаждения, определяя малое время существования ванны расплава, для чего требуется повышенная погонная энергия или предварительный подогрев.

Цель настоящей работы — исследовать особенности формирования однослойных объектов для выявления влияния параметров обработки и материала подложки, а также для изучения характеристик

полученного образца. С этой целью проведена оценка возможности сплавления порошка БрХ со стальной и медной подложкой.

Материалы и оборудование. В качестве исходных порошковых материалов был использован порошок БрХ с размерами частиц 63...125 мкм, химический состав которой представлен в таблице. Температура плавления: солидус — 1076 °С, ликвидус — 1081 °С. Плотность материала в твердом состоянии составляет 8,92 г/см³. В качестве подложки использовали Ст3 и медь.

Химический состав ПР-БрХ, фракция 63...125 мкм

Химический состав, %						
Cu	Cr	Ni	Fe	S	P	O ₂
Основа	0,82	0,05	0,1	0,0021	0,01	0,015
Основа	0,7	0,05	0,05	0,0043	0,01	0,011

В работе использовался разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана уникальный комплекс прямого лазерного выращивания КЛП-400 с максимальными габаритными ограничениями на изделия 800 × 800 × 800 мм (рис. 1).



Рис. 1. Лазерный комплекс КЛП-400

В комплексе КЛП-400 принята стандартная пятиосевая схема, состоящая из порталных трехлинейных координат и наклонно-поворотного стола с двумя вращательными координатами [9]. В качестве источника излучения используется волоконный лазер мощно-

стью 3 кВт с длиной волны излучения 1,07 мкм. Характеристики комплекса КЛП-400 приведены ниже:

Мощность лазерного источника, Вт	3000
Длина волны излучения, мкм	1,07
Диаметра пятна, min, мкм	1200
Вес обрабатываемой детали, max, кг	500
Габариты установки, м	2,0 × 2,0 × 3,0

Порошок подается соосно лазерному лучу в зону обработки, где излучение фокусируется. Скорость подачи порошка может варьироваться. Скорость перемещения в совокупности с мощностью излучения определяет погонную энергию, направленную на расплавление порошка. Варьирование фокусного расстояния и диаметра пятна позволяет добиваться более точных геометрических параметров и обеспечивать необходимую точность форм изделий. Благодаря использованию нескольких питателей есть возможность наплавлять порошковые материалы различных типов.

Подготовку шлифов проводили стандартным методом полировки и травления. В качестве травителя было использовано хлорное железо и смесь 3 % персульфата аммония с 10 %-ном водным раствором аммиака. Исследование проведено на оптическом микроскопе Olympus и электронном микроскопе EVO 50 (Carl Zeiss) с ЭДС Bruker. Микротвердость измеряли по методу Виккерса с нагрузкой HV 0,05 на твердомере Durascan.

Экспериментальное исследование. На формирование структуры и геометрии наплавляемых слоев влияют параметры скорости, плотности мощности, расхода подачи порошка и защитного газа [10], а также стратегии обработки контура и основного слоя [11–14]. Особенность метода коаксиального лазерного плавления заключается в том, что существует возможность варьировать параметры обработки непосредственно в процессе наплавки. Так, при изготовлении объектов со сложным контуром с использованием специальных материалов можно вносить изменения и учитывать отклонения от формы непосредственно в процессе выращивания.

Было проведено исследование по выявлению оптимальных параметров для создания единичных валиков. Использовались параметры мощности, варьируемые от 15 % до 100 %, и скорости обработки, изменяющиеся от 400 до 800 мм/мин. С учетом полученной геометрии валиков, были оценены требуемые параметры перекрытия валиков в слое и определена высота слоя для прогнозирования размеров деталей и наносимых слоев.

Первоначальная задача сводилась к проработке различных параметров для получения определенной формы единичных валиков:

высоты, глубины и угла (рис. 2). На этом этапе использовали стальную подложку для упрощения сплавления. Необходима была такая форма, чтобы обеспечивались минимальное переплавление с подложкой и максимальная высота валика с близким к 90° углом смачивания. Пример валика, полученный с параметрами, близкими к таким значениям, представлен на рис. 3.

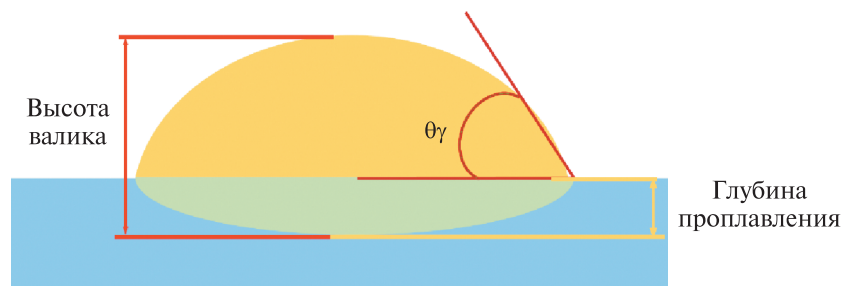


Рис. 2. Основные параметры наплаваемых валиков

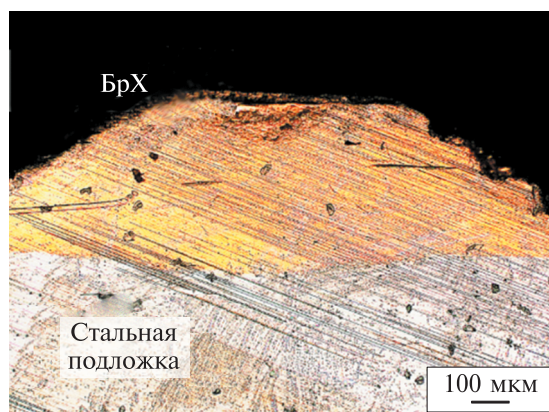


Рис. 3. Валик из БрХ, наплавленный на стальную подложку

В результате проведенных исследований установлены режимы, на которых проходит формирование единичных векторов хорошего качества. Выявлено, что при наплавке медных сплавов на стальную подложку сплавление с ней происходит на незначительных мощностях — около 16 %, которые являются достаточными для достижения переплавления с подложкой наплаваемого материала. Несмотря на особенности медных сплавов, очевидно, что возможность использования столь малых значений мощности обусловлена высокой степенью смешивания материалов между собой. Отмечено, что с увеличением мощности размеры валиков возрастают, а при повышении скорости воздействия их величина уменьшается.

Второй задачей исследования было изучение возможности выращивания нескольких слоев порошка, для того чтобы исследовать

процесс формирования последовательности слоев. При этом важно для оценки учитывать наряду с размерами валика, стратегию выращивания, варьирование параметров в процессе наплавки и т.п. На первоначальном этапе выполняется визуальная оценка получаемых объектов, а также их проверяют на наличие пористости, несплавлений и трещин.

При получении элементарных объектов из бронзы отмечена проблема порообразования, природа которой заключается в малой адгезии верхних валиков с подложкой (рис. 4). Следует учитывать, что при выращивании материалов происходит перемешивание порошка и подложки во время плавления, а значит и процесс переплавления, смешивания и затвердевания в каждом слое будет различным. Сначала требуется незначительная мощность излучения лазера, которую необходимо повышать с каждым последующим слоем ввиду физических свойств бронз.

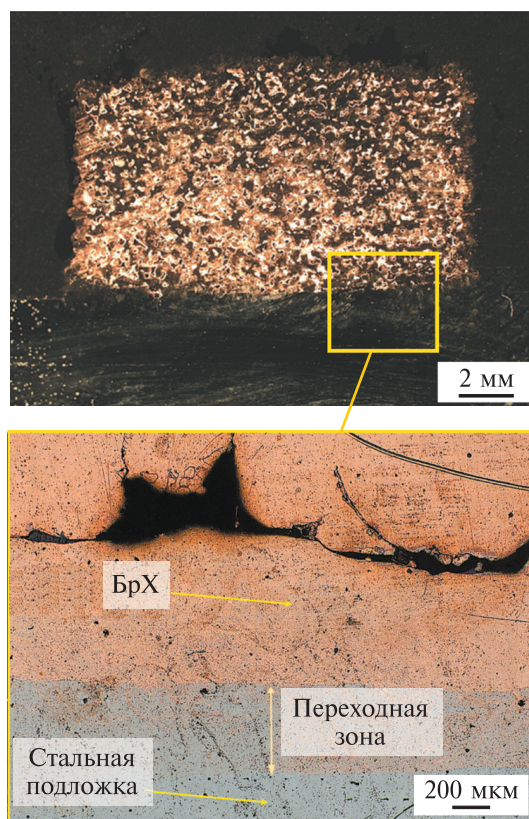


Рис. 4. Формирование переходных слоев в процессе выращивания деталей на стальной подложке

По результатам эксперимента была проанализирована макроструктура образцов, были обнаружены явные несплошности и несплавления (см. рис. 4), причина образования которых заключается в

существенно возрастающей по мере формирования детали теплопроводности низлежащих слоев. Также происходит постоянное окисление поверхности, приводящее к существенному увеличению угла смачиваемости. В результате этого образуются локальные центры кристаллизации, оттягивающие на себя с каждым новым слоем большее количество материала.

Решить первую проблему можно посредством изменения и варьирования параметров в процессе перехода от слоя к слою. Внедрение специализированной защитной атмосферы в качестве раскисляющего способа защиты позволяет повысить жидкотекучесть расплава.

Основываясь на близких по параметрам режимах, которые позволяют сплавить медный порошок с подложкой, было установлено, что существуют факторы, ограничивающие как эффективное выращивание, так и параметры обработки. Было выявлено, что первичное переплавление с подложкой проходит достаточно эффективно за счет активного перемешивания металлов в зоне ванны расплава [13]. Согласно работе [15], требуется изменить параметры обработки по сравнению с параметрами нижних слоев в сторону увеличения мощности, чтобы обеспечивать необходимые для выращивания условия.

В результате проведенного исследования установлено, что существует возможность выращивания объектов из медного сплава на стальной подложке, но для создания слоев из бронзы требуются другие параметры обработки, т. е. нижние слои имеют хорошее переплавление. Однако при переходе к зоне сплавления чистой бронзы без перемешивания со сталью используемые режимы не позволяют достигнуть необходимых результатов: не соблюдается геометрия изделия, а также наблюдаются несплошности и несплавления, которые приводят к растрескиванию и образованию пор по всей площади изделия.

Выращивание бронзы на медной подложке. Для того чтобы определить параметры, необходимые для создания качественных объемных компонентов, было проведено исследование по определению режимов выращивания бронзы на медной подложке. Интерес к такому способу выращивания также обусловлен возможностью восстановления деталей из медных сплавов.

Как известно из опубликованных данных [5, 16, 17], при нагреве медных сплавов происходит окисление, а также может иметь место негативное влияние кислорода и водорода. Для исследования данной проблемы и выявления особенностей процесса были изготовлены четыре образца. Эксперименты проводили с варьированием мощности от 75 до 100 %, изменением скорости от 300 до 800 мм/мин и с расходом порошка 4 г/мин.

Чистая медь имеет более высокую теплопроводность, поэтому при наплавке первых слоев бронзовых порошков на подложку необ-

ходимо использовать мощность, значения которой заметно выше, чем для дальнейшего нанесения слоев. В связи с этим были выбраны значения, близкие к максимальным (от 80 до 100 %).

Для обеспечения равномерного прогрева по подложке и близлежащим зонам, а также для установления стабильного режима следует выращивать образцы определенной высоты. Исследование по выращиванию примитивных трехмерных объектов подтвердило необходимость предварительного подогрева или повышения погонной энергии в процессе создания первичных слоев. Было изготовлено четыре образца с крайними значениями параметров. Установлено, что в некоторых образцах имеются вертикальные области несплавления, а также обнаружена значительная зона пористости вблизи зоны сплавления с подложкой (рис. 5).

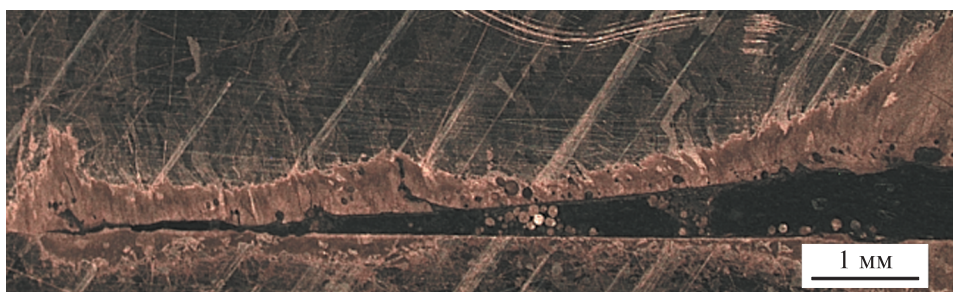


Рис. 5. Сплавление БрХ с медной подложкой

Пористость и несплошность получаемых образцов — достаточно часто встречающиеся явления, которые негативно отражаются на свойствах готового изделия. При выборе режимов обработки следует руководствоваться такими параметрами, которые помогут избежать подобного нежелательного эффекта.

Известно, что хромовые бронзы относятся к термически упрочняемым. При термической обработке структура хромовых бронз после старения представлена медью и небольшим количеством (по объему) выделений хрома. Исследование микроструктуры и химического состава на электронном микроскопе (рис. 6) позволило определить причины несплавления с подложкой: формирование специфических зон с повышенным содержанием хрома по краям зерен. Именно наличие локальных выделений хрома в конечном итоге приводит к возникновению трещин.

Следует отметить, что в полученных образцах микроструктура значительно различается по объему: с более точной геометрией или ярко выраженными крайними эффектами, изменениями и отклонениями по геометрии. При исследовании микроструктуры можно выделить три основные зоны, которые различаются визуально: темно-

серые, серые и светлые (рис. 7). Темно-серая и серая зоны концентрируются по нижним и краевым слоям. Для центра характерна светлая зона. При изучении всех образцов стало понятно, что серые зоны характеризуют затвердевание по краям, где отвод теплоты значительно выше. Центральная светлая зона занимает большую часть изделия, поэтому очевидно, что при выращивании более громоздких объектов будет характерна в основном именно такая микроструктура.

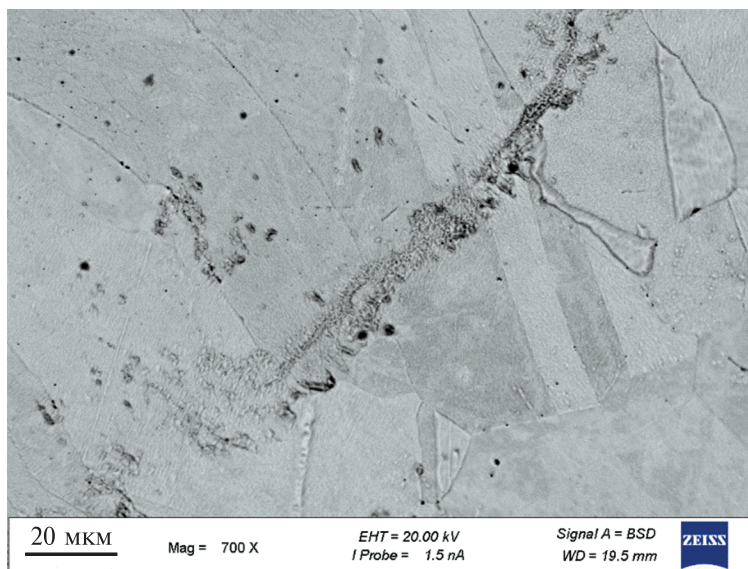


Рис. 6. Фотографии микроструктуры, полученные с помощью электронного микроскопа

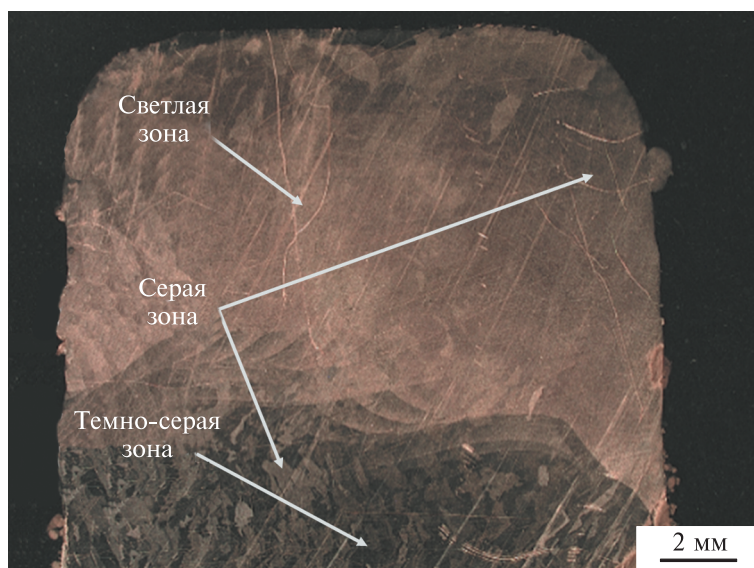
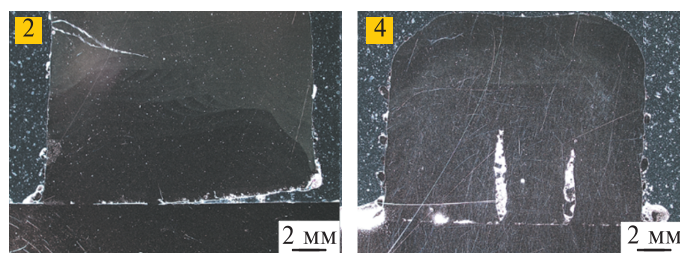
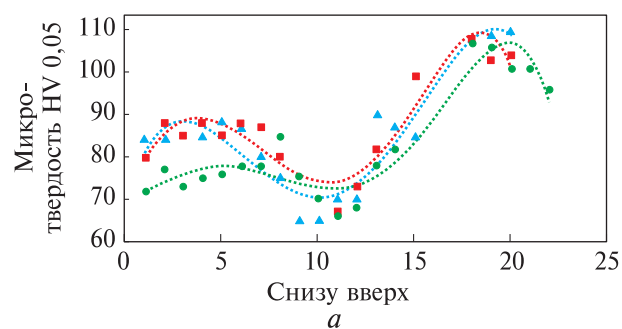
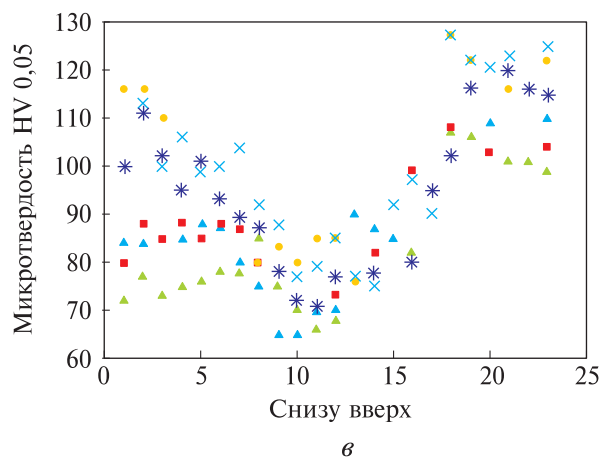


Рис. 7. Микроструктура образцов, наплавленных на медную подложку



б



в

Рис. 8. Микротвердость образца по глубине выращенного объекта:

a — образец № 2 (— середина; — вдоль края; — по перпендикулярной плоскости шлифа);
б — внешний вид образцов № 2 и № 4; *в* — микротвердость для образцов № 2 (▲) и № 4 (*)
 (■ — образец № 2 в бок; × — образец № 2 продольно; ▲ — образец № 4 повторно;
 ● — образец № 4 вдоль края)

Для конкретизации и определения различий между структурами сформированных слоев проведен анализ микротвердости образцов. Для этого в качестве наиболее адекватных и лучших по качеству выбраны два образца с одинаковой скоростью обработки 800 мм/мин и с разной мощностью: 85 % для образца № 2 и 100 % для образца № 4. Было установлено, что более темная структура соответствует более высоким значениям твердости. Повышение твердости определяется в верхней части объекта, эти значения коррелируют со значениями термической обработки — старения и закалки. В средней части, где переплавление происходит неоднократно, наблюдаются существенно меньшие значения микротвердости по сравнению со значениями в верхней части образца. Результаты исследования микротвердости для образца № 2 вдоль края, по центру и по перпендикулярной (ответной) плоскости образца представлены на рис. 8, а. На рис. 8, б и в показана общая закономерность для двух выбранных образцов — № 2 и № 4, на которых измерения проведены в различных зонах снизу вверх: по центру, вдоль края, вдоль поперечного разреза.

Наибольшее значение микротвердости соответствует области темного цвета и достигает значений более 100 HV, а характерные значения микротвердости для бронз составляют примерно 65...70 HV. Такие высокие значения коррелируют со значениями до 155 HV, характерными для термообработки, в частности до 130 HV после закалки и старения. Таким образом, становится понятно, что темные зоны, которые расположены по краям образцов, имеют термическое упрочнение.

При сравнении образцов № 2 и № 4 было выявлено, что по распределению микротвердости достаточно четко проявляется тенденция по уменьшению значений в сторону центральной части изделия и по их повышению в сторону верхней области. Следует отметить, что возле подложки микротвердость образцов различается. Для образца № 4 характерна более высокая микротвердость в области подложки, что, вероятно, связано с лучшим, чем у образца № 2 сплавлением с подложкой в результате более интенсивного нагрева и большей мощности. Данные предположения коррелируют с микроструктурой, различия которой можно наблюдать также визуально.

Заключение. Подводя итоги проведенной работы, можно отметить, что полученные результаты по наплавке на медную подложку представляют значительный интерес для восстановления различных материалов из бронз, а также их выращивания методом КЛП. Установлено, что при лазерном коаксиальном плавлении хромистой бронзы часто имеют место такие дефекты, как поры и несплавления. Образование первых связано с избыточной погонной энергией, вторых — с недостаточной.

При использовании медных подложек связь изделия с ней слабее, однако теплоотвод интенсивнее, что приводит к формированию несплавлений в нижней части деталей, в то время как при наплавке на сталь, напротив, нижние слои имеют меньше дефектов. Для коррекции дефектов необходимо изменение мощности излучения при выращивании изделий значительной высоты, чтобы обеспечить схожие условия теплоотвода.

В результате исследования микротвердости были выделены несколько зон сплавления, которые имеют различные значения микротвердости. В центральной части изделия наблюдается понижение микротвердости, что обусловлено многочисленным переплавлением слоев. Чем ближе к поверхности изделия, тем выше микротвердость.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Панченко В.Я., Васильцов В.В., Грезев А.Н., Галушкин М.Г., Егоров Э.Н., Ильичев И.Н., Павлов М.Н., Соловьев А.В., Мисюров А.И. Лазерное спекание металлических порошков для изготовления изделий машиностроения с градиентными свойствами. *Технология машиностроения*, 2011, № 11, с. 10–14.
- [3] Новиченко Д.Ю., Григорьянц А.Г., Смуров И.Ю. Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 7, с. 12–24.
- [4] Григорьянц А.Г., Кошлаков В.В., Ризаханов Р.Н., Шиганов И.Н., Мисюров А.И., Фунтиков В.А. Формирование биметаллических структур методом коаксиального лазерного плавления. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2019, № 3 (93), с. 32–38.
- [5] Зленко М.А., Попович А.А., Мутьелина И.Н. *Аддитивные технологии в машиностроении*. Санкт-Петербург, Издательство Политехнического университета, 2013, 223 с.
- [6] Солодовников А.В., Акиншин И.А., Голубятник В.В., Кривоногов А.В. Оценка концепции создания жидкостного ракетного двигателя на основе инновационных технологий. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2017, т. 16, № 2, с. 127–134. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-127-134
- [7] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. *Лазерные аддитивные технологии в машиностроении*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 280 с.
- [8] Земляков Е.В., Туоминен Я., Поздеева Е.Ю., Туричин Г.А., Комарова Е.А. Формирование поверхностных слоев при лазерной наплавке с использованием мощных волоконных лазеров. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*, 2013, № 1 (166), с. 231–236.
- [9] Григорьянц А.Г., Ставертий А.Я., Третьяков Р.С. Пятикоординатный комплекс для выращивания деталей методом коаксиального лазерного плавления.

- ния порошковых материалов. *Технология машиностроения*, 2015, № 10, с. 22–29.
- [10] Асютин Р.Д., Самарин П.Е. Экспериментальное исследование газопорошкового потока при лазерной наплавке композиционных покрытий системы Al—SiC. *Новые материалы и технологии в машиностроении*, 2014, № 19, с. 3–12.
- [11] Caiazza F. Laser-aided Directed Metal Deposition of Ni-based superalloy powder. *Optics & Laser Technology*, 2018, vol. 2018, no. 103, pp. 193–198.
- [12] Dutta B., Palaniswamy S., Choi J., Song L., Mazumder J. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition. *Advanced Materials and Processes*, 2011, vol. 169 (5), pp. 33–36.
- [13] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Ставертий А.Я., Третьяков Р.С. Оптимизация формы сопел для лазерной коаксиальной наплавки. *Сварочное производство*, 2014, № 8, с. 24–27.
- [14] Александрова А.А., Базалева К.О., Балакирев Э.В., Брыков А.А., Григорьянц А.Г. Прямое лазерное выращивание композиционного материала инконель 625/ТИС: влияние структурного состояния исходного порошка. *Физика металлов и металловедение*, 2019, т. 120, № 5, с. 498–504.
- [15] Григорьянц А.Г., Третьяков Р.С., Фунтиков В.А. Повышение качества поверхностных слоев деталей, полученных лазерной аддитивной технологией. *Технология машиностроения*, 2015, № 10, с. 68–73.
- [16] Григорьянц А.Г., Фунтиков В.А. Улучшение качества поверхности деталей, полученных из порошковых материалов технологией коаксиального лазерного плавления. *Приборы*, 2016, № 6, с. 33–39.
- [17] Akbari M. An investigation on mechanical and microstructural properties of 316LSi parts fabricated by a robotized laser/wire direct metal deposition system. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 23, pp. 487–497.

Статья поступила в редакцию 23.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шишов А.Ю., Мельникова М.А., Холопов А.А., Мисюров А.И., Пересторонин А.В., Смирнов А.Р. Особенности применения лазерного коаксиального плавления порошковых материалов для создания объектов из сплавов на основе меди. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 12.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-12-2042>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства «Королёвские чтения — 2020», Москва, 29–31 января 2020 г.

Шишов Алексей Юрьевич — канд. техн. наук, ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор НОЦ «Центр аддитивных технологий» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ashi@bmstu.ru

Мельникова Мария Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер 2-й категории НОЦ «ЦАТ» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: maria.melnikova@bmstu.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6971-3322>

Scopus Author ID 57212145470

SPIN-кода РИНЦ 6828-5870

Холопов Андрей Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: xol@bmstu.ru

Scopus Author ID 55956135800

SPIN-кода РИНЦ 4828-9780

Мисюров Александр Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

e-mail: misiurov1950@bmstu.ru

SPIN-код: 5152-6031

Scopus Author ID 6504311861

Пересторонин Александр Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер 2-й категории НОЦ «ЦАТ» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: a.v.perestoronin@bmstu.ru

SPIN-код: 1038-5165

Scopus Author ID 57192278225

Смирнов Артем Романович — инженер 2-й категории НОЦ «ЦАТ» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Special aspects of the use of laser coaxial melting of powder materials for creating objects from copper-base alloys

© A.Yu. Shishov, M.A. Melnikova, A.A. Kholopov, A.I. Misyurov,
A.V. Perestoronin, A.R. Smirnov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Among the methods of additive technologies, coaxial laser melting, i.e. direct metal deposition (DMD), is quite widespread. Essentially, this process is about creating objects by sequentially depositing layers of powder and melting them due to their simultaneous supply through a nozzle with focusing of laser radiation into the processing zone. Various powders are used as materials for this technology, the powders being selected depending on the tasks and final characteristics. One of the promising directions for implementation is the creation of complex structures from copper alloys for aircraft construction. Despite the fairly widespread use of this technology in relation to copper alloys, in particular bronzes, there is a small amount of data and research for this technology. The purpose of this study was to understand the process of forming the materials when grown by the DMD method. For this purpose, the fusion of bronzes with a steel substrate was investigated; special aspects were revealed, which made it possible to pose the second task - the study of fusion of bronzes with a copper substrate. As a result, the microstructure of the samples was considered and their micro-hardness was measured.

Keywords: laser, coaxial laser melting, laser surfacing, powder metallurgy, laser processing, direct laser surfacing

REFERENCES

- [1] Kuznetsov P.A., Vasileva O.V., Telenkov A.I., Savin V.I., Bobyr V.V. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika — Material Science and Technology News*, 2015, no. 2, pp. 4–10.
- [2] Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Grezev A.N., Galushkin M.G., Egorov E.N., Ilichev I.N., Pavlov M.N., Solovlev A.V., Misyurov A.I. *Tekhnologiya mashinostroeniya (Mechanical engineering technology)*, 2011, no. 11, pp. 10–14.
- [3] Novichenko, D.Yu., Grigoryants, A.G., Smurov, I.Yu. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2011, no. 7, pp. 12–24.
- [4] Grigoryants A.G., Koshlakov V.V., Rizakhanov R.N., Shiganov I.N., Misyurov A.I., Funtikov V.A. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii — Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2019, no. 3 (93), pp. 32–38.
- [5] Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutyulina I.N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. St. Petersburg, SPbSTU Publ., 2013, 223 p.
- [6] Solodovnikov A.V., Akinshin I.A., Golubyatnik V.V., Krivonogov A.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 127–134.
DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-127-134
- [7] Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I., Tretyakov R.S. *Lazernye additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Laser additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, BMSTU Publ., 2018, 280 p.
- [8] Zemlyakov E.V., Tuominen Ya., Pozdeeva E.Yu., Turichin G.A., Komarova E.A. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstven-*

- nogo politekhnicheskogo universiteta — St. Petersburg State Polytechnical University Journal, 2013, no. 1 (166), pp. 231–236.
- [9] Grigoryants A.G., Staverty A.Ya., Tretyakov R.S. *Tekhnologiya mashinostroeniya (Mechanical engineering technology)*, 2015, no. 10, pp. 22–29.
- [10] Asyutin R.D., Samarin P.E. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii (New materials and technologies in mechanical engineering)*, 2014, no. 19, pp. 3–12.
- [11] Caiazza F. Laser-aided Directed Metal Deposition of Ni-based superalloy powder. *Optics & Laser Technology*, 2018, vol. 2018, no. 103, pp. 193–198.
- [12] Dutta B., Palaniswamy S., Choi J., Song L., Mazumder J. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition. *Advanced materials & processes*, 2011, vol. 169 (5), pp. 33–36.
- [13] Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Stavertiy A.Ya., Tretyakov R.S. *Svarochnoe proizvodstvo (Welding Production)*, 2014, no. 8, pp. 24–27.
- [14] Aleksandrova A.A., Bazaleeva K.O., Balakirev E.V., Brykov A.A., Grigoryants A.G. *Fizika metallov i metallovedenie — The Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, no. 5, pp. 498–504.
- [15] Grigoryants A.G., Tretyakov R.S., Funtikov V.A. *Tekhnologiya mashinostroeniya (Mechanical engineering technology)*, 2015, no. 10, pp. 68–73.
- [16] Grigoryants A. G., Funtikov V.A. *Pribory — Instruments*, 2016, no. 6, pp. 33–39.
- [17] Akbari M. An investigation on mechanical and microstructural properties of 316LSi parts fabricated by a robotized laser/wire direct metal deposition system. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 23, pp. 487–497.

Shishov A.Uu., Cand. Sc. (Eng.), Assistant, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Head of the Scientific and Educational Center “Center for Additive Technologies”, BMSTU.
e-mail: ashi@bmstu.ru

Melnikova M.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, engineer of the 2nd category, Scientific and Educational Center “Center for Additive Technologies”, BMSTU. e-mail: maria.melnikova@bmstu.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6971-3322>
Scopus Author ID 57212145470
RSCI SPIN-code 6828-5870

Kholopov A.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: xol@bmstu.ru
Scopus Author ID 55956135800
RSCI SPIN-code 4828-9780

Misyurov A.I., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: misiurov1950@bmstu.ru
Scopus Author ID 6504311861
SPIN-code: 5152-6031

Perestoronin A.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, engineer

of the 2nd category, Scientific and Educational Center “Center for Additive Technologies”, BMSTU. e-mail: a.v.perestoronin@bmstu.ru
Scopus Author ID 57192278225
SPIN-code: 1038-5165

Smirnov A.R., engineer of the 2nd category, Scientific and Educational Center “Center for Additive Technologies”, Bauman Moscow State Technical University.