

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_25

УДК 621.762

Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко, А. С. Оленцевич

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ОБЪЕКТА ПОСЛОЙНЫМ СИНТЕЗОМ НА СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА ИЗДЕЛИЯ И ПУТИ ЕЕ УЛУЧШЕНИЯ

F. G. Lovshenko, A. S. Fedosenko, A. S. Olientsevich

EFFECT OF THE TECHNIQUE FOR FORMING A THREE-DIMENSIONAL OBJECT BY LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS ON THE STRUCTURE OF PRODUCT MATERIAL AND TECHNIQUES TO IMPROVE IT

Аннотация

Изложены результаты исследований, направленных на изучение структуры и свойств стальных образцов, полученных послойным нанесением конструкционного материала в виде порошка и проволоки. Отмечены пути, позволяющие уменьшить размер зерна в изделии. Показано, что измельчения структурных составляющих в материалах, изготовленных методом селективного лазерного сплавления, можно достичь использованием порошков, полученных по технологии реакционного механического легирования, а в изделиях, сформированных дуговой наплавкой, путем оптимизации режимов технологического процесса.

Ключевые слова:

реакционное механическое легирование, аддитивное производство, порошок, послойный синтез, дендритная структура, размер зерна, твердость, дуговая наплавка.

Для цитирования:

Ловшенко, Ф. Г. Влияние способа формирования трехмерного объекта послойным синтезом на структуру материала изделия и пути ее улучшения / Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко, А. С. Оленцевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 25–34.

Abstract

The paper presents the results of studies aimed at studying the structure and properties of steel samples obtained by layer-by-layer deposition of a structural material in the form of a wire or as a powder. Techniques to reduce the grain size in the product are given. It is shown that the refinement of structural components in materials produced by selective laser melting can be achieved using powders obtained by reactive mechanical alloying, and in products formed by arc surfacing, it is achieved by optimizing the modes of the technological process.

Keywords:

reactive mechanical alloying, additive manufacturing, powder, layer-by-layer synthesis, dendritic structure, grain size, hardness, arc surfacing.

For citation:

Lovshenko, F. G. Effect of the technique for forming a three-dimensional object by layer-by-layer synthesis on the structure of product material and techniques to improve it / F. G. Lovshenko, A. S. Fedosenko, A. S. Olientsevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 25–34.

Введение

В настоящее время в различные отрасли промышленности активно

внедряются аддитивные технологии (АТ) [1–4], которые позволяют изготавливать детали любого уровня сложности в минимальные сроки. АТ нашли

применение в различных отраслях: от медицины до строительства. С их помощью получают элементы моделей для литья в песчано-глинистые формы, выжигаемые и выплавляемые модели любой сложности, изготавливают медицинские имплантаты и детали газотурбинных двигателей. Несомненно, что в ближайшем будущем аддитивные технологии станут незаменимы в ряде передовых отраслей промышленности.

Наиболее популярными способами производства изделий из металлов являются селективное лазерное сплавление (SLM), при котором исходный материал формируется в виде слоя толщиной не более 50 мкм, после чего оплавляется концентрированным лазерным лучом, а также способ послойной наплавки с подачей конструкционного материала непосредственно в зону плавления (DMD). Способы позволяют получать точные изделия сложной формы, однако применяемое оборудование имеет высокую стоимость и низкую производительность. На этом фоне активно развиваются способы изготовления деталей, базирующиеся на использовании классической роботизированной дуговой наплавки в среде защитных газов (технология WAAM). В качестве исходного конструкционного материала в данном случае используется проволока. Применение дуговой наплавки в среде защитных газов позволяет на порядок увеличить производительность процесса и размер получаемых изделий, а используемое оборудование отличается простотой и доступностью.

Стоит отметить, что используемые в области АТ материалы, а также технологические возможности оборудования не всегда позволяют получать детали требуемого качества. Частая причина неудовлетворительной прочности изделий связана с особенностями структуры и, в первую очередь, с образованием крупных зерен неправильной формы, что способствует сильной анизотропии механических свойств и снижает проч-

ность изделий. Улучшить структуру можно, используя исходные порошки, в составе которых присутствуют частицы тугоплавких стабильных соединений, выполняющих функцию модификаторов. К материалам такого типа можно отнести порошки, синтезируемые с применением технологии реакционного механического легирования (РМЛ). Если применение материалов, содержащих модификаторы, проблематично или невозможно, как в случае со способами дуговой наплавки, улучшения структуры и свойств изделий, получаемых послойным синтезом, можно достичь посредством подбора режимов наплавки.

Представленная работа направлена на выявление путей, позволяющих управлять структурой изделий, формируемых способами селективного лазерного сплавления и дуговой наплавкой, с целью улучшения их физико-механических свойств.

Оборудование и методика проведения эксперимента

Реакционное механическое легирование проводили в вибрационном механореакторе гирационного типа. Микротвердость измеряли по методу Виккерса с помощью микротвердомера Indentec ZHV (Германия).

Образцы изготавливали на принтере EP-M250 (Shining 3D) методом селективного лазерного сплавления. Процесс проводили в среде аргона. Печать осуществлялась на плите из нержавеющей стали, поверхность которой была предварительно прошлифована.

Дуговую наплавку осуществляли с помощью роботизированного комплекса Fanuc M-710IC/50, используя в качестве конструкционного материала низкоуглеродистую проволоку марки Св-08Г2С. В качестве защитного газа использовали смесь 80 % Ar + 20 % CO₂, диаметр проволоки 1,2 мм. Скорость наплавки варьировалась в интервале 30...60 см/мин.

Наплавку осуществляли на плиту из стали СтЗпс.

Плазменная наплавка порошковых материалов выполнялась на установке EuTronic GAP 2501 DC с горелкой GAP E150P, при силе тока 45 А, подаче порошка 5 г/мин и скорости наплавки 5 см/мин.

Травление образцов проводилось в 3-процентном спиртовом растворе азотной кислоты. Микроструктура исследовалась на оптическом микроскопе МКИ-2М.

Результаты экспериментов

В работе показаны результаты исследования структуры и свойств материалов, полученных послойным синтезом по технологии селективного лазерного сплавления серийно выпускаемого и разработанного механически легированного порошков аустенитной стали, а также многослойной дуговой наплавкой низкоуглеродистой стали в среде защитного газа. Результаты позволяют оценить особенности структурообразования изделий, получаемых многослойной лазерной наплавкой порошков, а также демонстрируют особенности формирования структуры объекта при многослойной дуговой наплавке в среде защитных газов.

Структура и свойства материала, полученного селективным лазерным сплавлением

Результаты изучения разработанных порошков, синтезированных РМЛ, показали, что по своим основным характеристикам, включая гранулометрический состав, сыпучесть, а также форму частиц, они принципиально не отличаются от промышленно выпускаемых аналогов, используемых для формирования трехмерных изделий. В то же время полученные порошки существенно отличаются по структуре и фазовому составу, заметно превосходят серийно

выпускаемые материалы по содержанию упрочняющих фаз. Это должно оказывать значительное влияние на структуру изделий, формируемых селективным лазерным сплавлением.

Стоит отметить, что процессы структурообразования, протекающие в результате послойного синтеза, в значительной степени аналогичны процессам, характерным для формирования плазменных газотермических покрытий. В данном случае, по аналогии с плазменными покрытиями, присутствие в исходном материале ультрадисперсных частиц, отличающихся высокой термодинамической стабильностью, заметно снижает склонность материалов к образованию крупнозернистой структуры, состоящей из сильно вытянутых дендритов, что свидетельствует о ярко выраженном модифицирующем эффекте разрабатываемых порошковых материалов.

Анализ образцов, изготовленных селективным лазерным сплавлением серийно выпускаемого порошка стали марки 316L, показал, что они отличаются типичным строением (рис. 1), характерным для изделий, получаемых послойным синтезом.

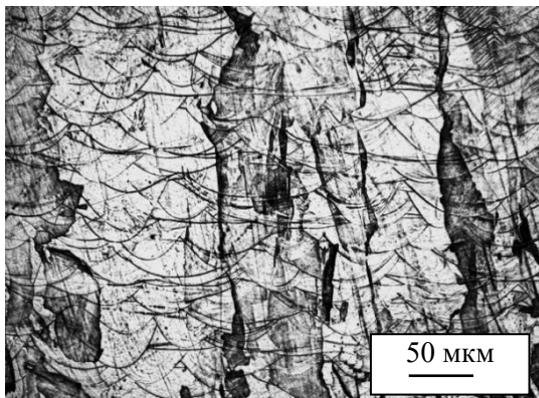
Поперечное сечение образцов, напечатанных из серийно выпускаемого порошка 316L, демонстрирует структуру, состоящую из крупных дендритов, зародившихся у модельной плиты и распространившихся на всю толщину напечатанного образца, равную порядка 0,5 см. В то же время в продольной плоскости, совпадающей с плоскостью перемещения лазерного луча, зерна имеют форму, близкую к правильной, а их поперечное сечение составляет 0,8...0,16 мм.

Формирование крупнозернистой структуры в изделиях, получаемых послойным синтезом, во многом сопряжено с отсутствием возможности управления технологическими параметрами процесса их изготовления, что является значительным недостатком существующего оборудования. В частности,

применяемые в настоящее время установки не позволяют регулировать тем-

пературу модельной плиты и теплоотвод от изделия.

а)



б)

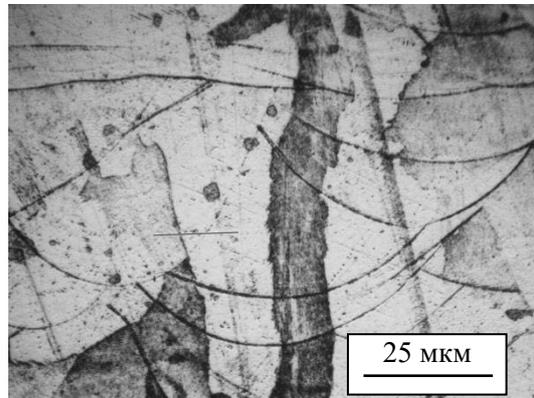


Рис. 1. Структура образца из порошка марки 316L в поперечном сечении

Как правило, отсутствует возможность управления алгоритмом движения лазерного луча, нет возможности регулировать его характеристики. Все это не позволяет оказывать влияние на структуру и, как следствие, на свойства получаемых изделий. В данном случае одним из немногих способов, позволяющих повлиять на формирование структуры, является применение специальных материалов, содержащих компоненты-модификаторы, присутствие которых способствует измельчению зерна и придает ему более правильную форму. Как показали результаты, представленные далее, такими материалами являются порошки, синтезируемые по технологии реакционного механического легирования.

Изучение образцов, полученных из механически легированных порошков, показало, что в их структуре отсутствуют крупные кристаллы, проходящие через все тело от подложки до поверхности, как это характерно для изделий из серийно выпускаемых материалов (рис. 2). В данном случае структура образцов состоит из отдельных неравноосных зерен, расположенных относительно друг друга под углами, превышающими 5 град, и ориентированных в

направлении, перпендикулярном плоскости модельной плиты. При этом они имеют границы раздела с соседними зернами со всех сторон (см. рис. 2). Наименьший и наибольший размеры в них достигают соотношения одного к трем. В поперечном сечении диаметр зерен в образцах из разработанного материала до двух раз меньше по сравнению с зернами в материале, полученном из порошка марки 316L.

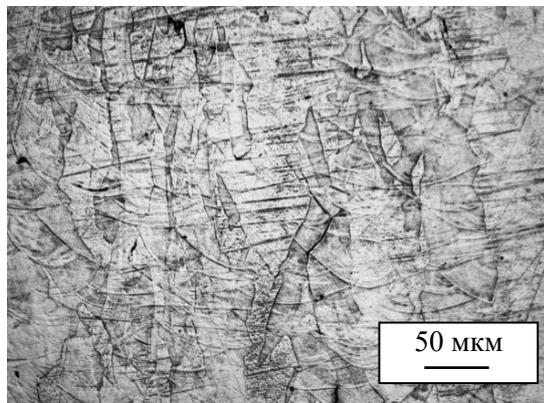
Отличительной характеристикой образцов, напечатанных как из разработанного материала, так и из серийно выпускаемого, является присутствие в их структуре зерен, состоящих из фрагментов небольшого размера, формирование которых обусловлено явлением двойникования в процессе кристаллизации сплавов (рис. 3).

Стоит отметить, что изготовленные на 3D-принтере экспериментальные образцы отличаются небольшим размером. Это исключает возможность всестороннего изучения их свойств. По этой причине на данном этапе исследований была изучена лишь микротвердость материалов из разработанного и серийно выпускаемого порошков как непосредственно после печати, так и после длительного отжига. В процессе

термообработки образцы выдерживали при заданной температуре, достигаю-

щей 900 °С, в течение 120 мин.

а)



б)

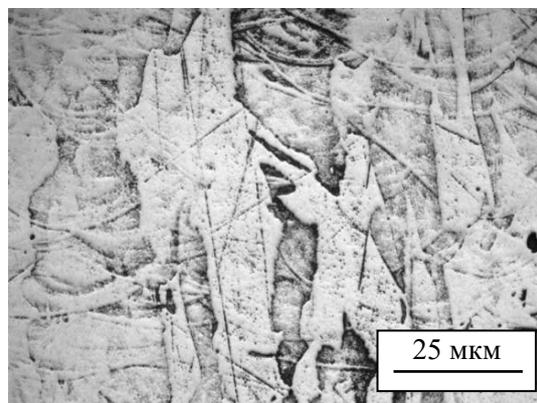
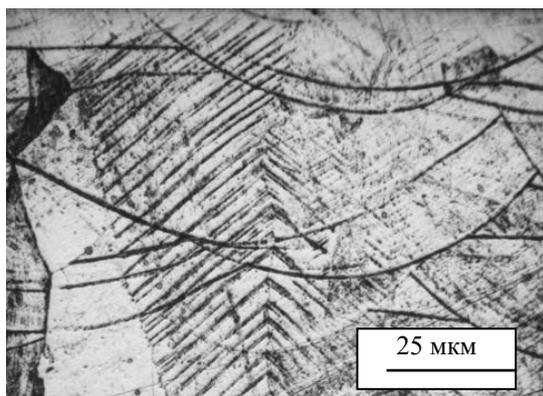


Рис. 2. Структура образца в поперечном сечении из порошка марки 12X18H10, полученного по технологии реакционного механического легирования

а)



б)

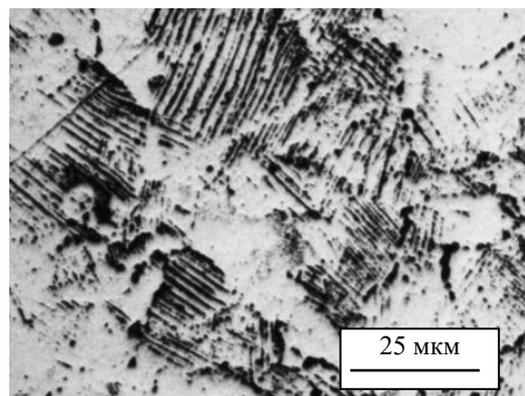


Рис. 3. Структура поперечного сечения кристаллов материалов из порошков стали 316L (а) и механически легированного (б)

Твердость образцов из разработанного и серийно выпускаемого порошков отличается как после печати, так и после отжига. Более высокое ее значение у микрошлифов из механически легированного материала, при этом образцы обладают более высокой жаропрочностью, сохраняющейся до значительных температур. Как следует из графика (рис. 4), исходная твердость напечатанных образцов из экспериментального материала 270 НВ практиче-

ски не изменяется после отжига при температуре 900 °С. Это подтверждает предположение о том, что в материале реализуются дисперсное и зернограничное виды упрочнения, обусловленные присутствием ультрадисперсных упрочняющих фаз в виде оксидов, карбидов и других соединений.

Нагрев образцов из серийно выпускаемого материала сопровождается заметным снижением их твердости. До термической обработки она состав-

ляет 240 HV, а после отжига при 900 °C снижается до 180 HV. При этом уже при 450 °C наблюдается резкое падение ее значения, что свидетельствует об отсутствии комплексного упрочнения, характерного материалам из разработанных порошков, и обусловлено уменьшением внутренних напряжений, образующихся в процессе послойной печати.

Таким образом, применение механически легированных порошков, содержащих ультрадисперсные упрочня-

ющие фазы, позволяет улучшить структуру и свойства изделий, получаемых послойным синтезом. В то же время, как ожидается, дополнительного измельчения структуры и повышения характеристик изготавливаемых деталей можно достичь подбором технологических приемов. Подтверждением этому может являться структура образцов, полученных послойным нанесением механически легированных порошков плазменной порошковой наплавкой (рис. 5).

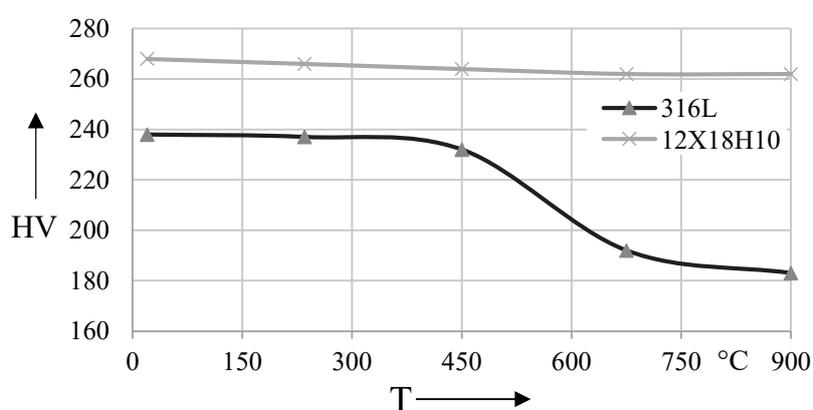


Рис. 4. Влияние температуры отжига на твердость сталей 12X18H10 и 316L

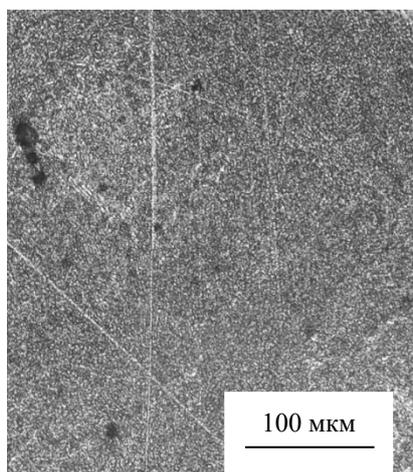


Рис. 5. Структура металла, полученного плазменной наплавкой механически легированного порошка

Как следует из представленного снимка (см. рис. 5), полученный материал характеризуется мелкозернистой структурой, форма и размер кристаллов

в которой не выявляются оптической микроскопией.

Формирование структуры материала в процессе роботизированной дуговой наплавки в защитном газе

Несмотря на положительный эффект, оказываемый механически легированным порошком на структуру изделий, получаемых послойным синтезом, способ селективного лазерного сплавления все же имеет ряд существенных недостатков, среди которых стоит отметить низкую производительность процесса и значительную ограниченность в размере получаемых изделий. Более перспективными в этом отношении являются способы дуговой наплавки в среде защитных газов. В настоящее время они лишь начинают внедряться в область аддитивных технологий, однако считаются одними из наиболее перспективных, поскольку обеспечивают высокую производительность и почти не ограничены по размерам выпускаемых изделий.

Как и в случае селективного лазерного сплавления с использованием серийно выпускаемых материалов, для дуговых способов наплавки также характерно формирование крупнозернистой структуры, состоящей из сильно вытянутых зерен, что, как уже отмечалось, негативно влияет на механические свойства материала. Однако положительной стороной использования дуговых способов наплавки является возможность управления технологическими параметрами процесса, что позволяет оказывать влияние на структуру синтезируемого изделия.

В данной части исследований основной задачей экспериментов являлся поиск технологических решений, позволяющих уменьшить средний размер зерна в формируемом изделии, способствуя повышению его физико-механических свойств.

В ходе экспериментов изучали структуру металла в зоне сплавления, основном объеме слоя, а также на периферии.

Изучение зоны, непосредственно прилегающей к основному материалу, позволило установить, что в данной части шва на удалении до 500 мкм от линии сплавления образуется область, состоящая из мелких зерен с размером до 25 мкм и формой, близкой к правильной (рис. 6, а). На данном участке величина зерна с удалением от зоны сплавления растет незначительно, однако на расстоянии более 0,5 см от подложки формируется область, состоящая из крупных, сильно вытянутых кристаллов (рис. 6, б). Их образование можно объяснить снижением интенсивности теплоотвода от формируемого слоя, что замедляет охлаждение наплавленного металла, способствуя образованию крупных неравноосных зерен, растущих в направлении, перпендикулярном плоскости теплоотвода.

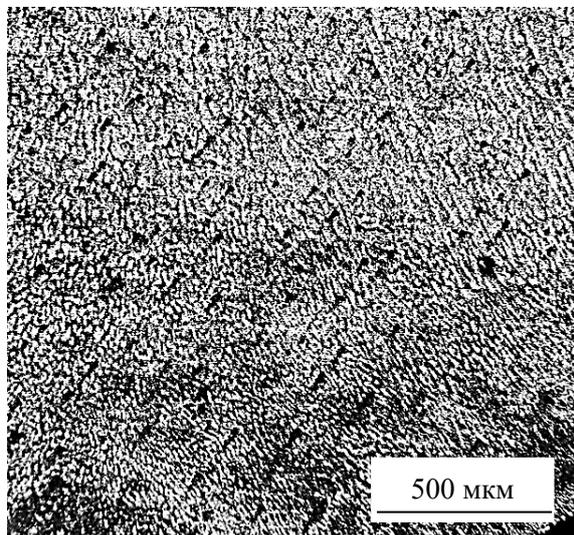
Полученные данные позволяют сделать вывод, что сформировать более мелкозернистую структуру в изделии можно путем увеличения интенсивности охлаждения наплаваемого слоя. Такой результат будет достигнут, например, при ускорении теплоотвода от наплаваемого материала либо уменьшении объема наплаваемого за один проход материала, что даст возможность снизить количество энергии, поступающей в область построения.

Изучение микроструктуры образцов, полученных многослойной дуговой наплавкой в среде защитных газов, позволило установить, что при изменении скорости наплавки в 2 раза (с 18 до 36 м/ч) размер зерна наплаваемого материала уменьшается. Минимальную величину оно имеет в зоне сплавления слоев, идущих друг за другом. Для данной области характерно образование мелкозернистой структуры. Также отсутствует зона перегрева, характерная для ЗТВ сварных швов. Каждый наплавленный слой имеет идентичную структуру – зона сплавления отличается минимальным размером зерна, размер которого увеличивается при

движении в направлении периферии (рис. 7). Немаловажным является тот факт, что при формировании многослойных материалов в исследуемых об-

разцах отсутствует эпитаксиальный рост зерен, характерный многослойным сварным швам.

а)



б)

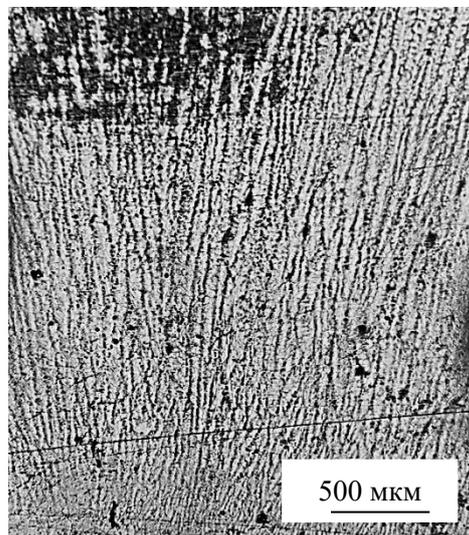
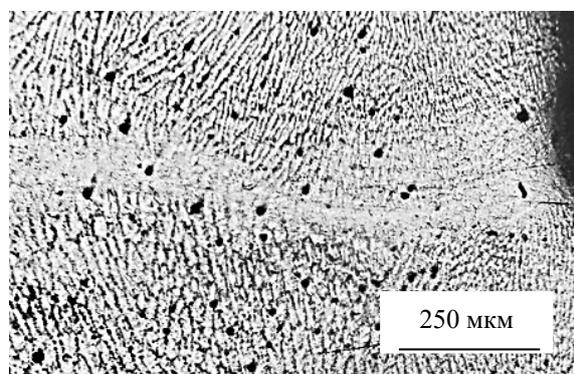


Рис. 6. Структура наплавленного металла на низкоуглеродистую сталь Ст3пс: а – область, прилегающая к основному металлу; б – дендритные зерна на максимальном удалении от зоны сплавления

а)



б)

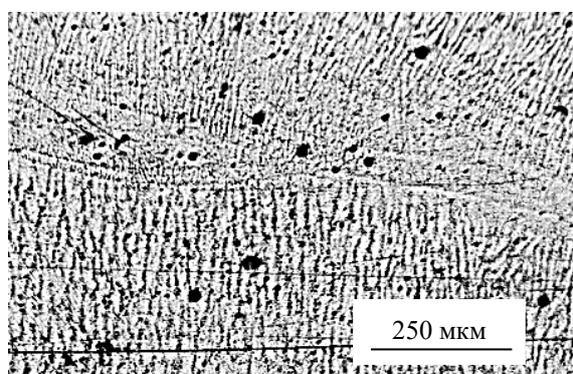


Рис. 7. Зона сплавления двух последовательно наложенных слоев: а – закаленная; б – отожженная

Изучение микроструктуры образцов, полученных многослойной наплавкой, показало, что сокращение интервала времени между наплавкой каждого последующего слоя сопровождается формированием более мелкозернистой структуры. Подобная закономерность,

вероятнее всего, связана с более полной переплавкой материала, наплавленного ранее. Это позволяет устранить область шва с крупными вытянутыми зернами и сохранить лишь относительно мелкое зерно корня шва.

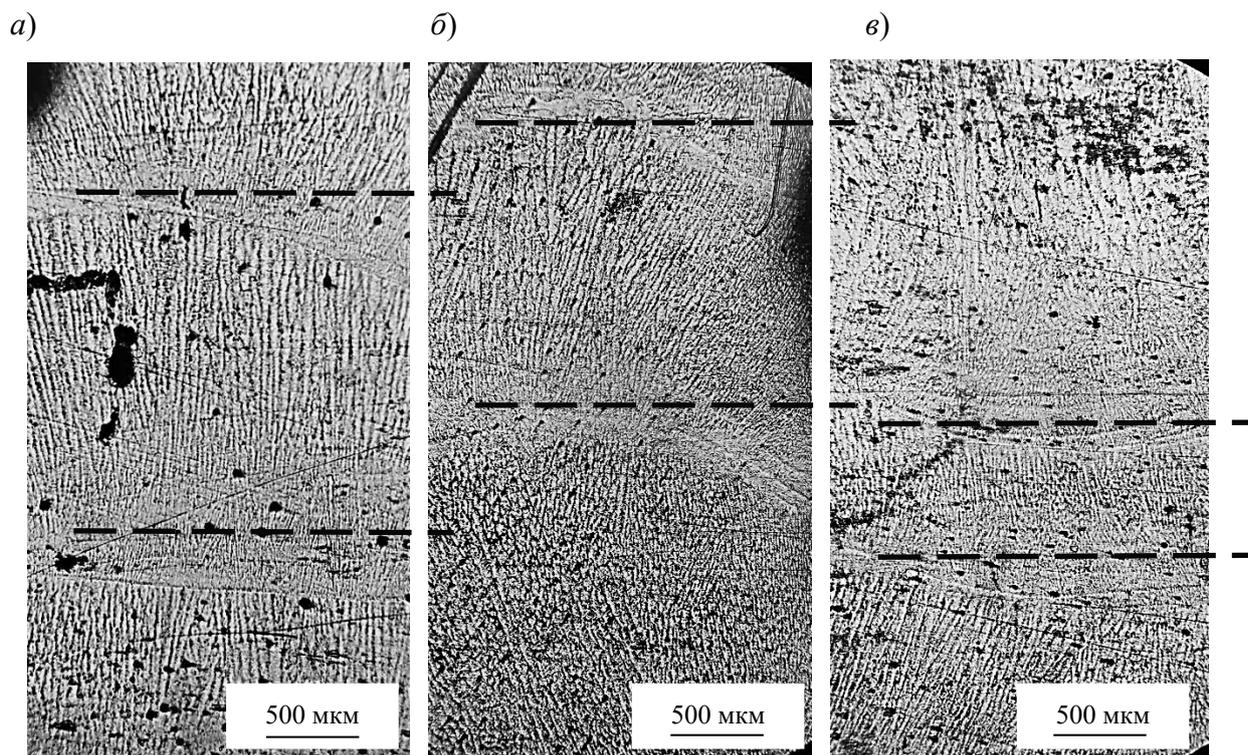


Рис. 8. Структура многослойных швов: а – интервал времени между наплавкой слоёв 30 с; б – интервал времени между наплавкой слоёв 15 с; в – интервал времени между наплавкой слоёв 0 с

Выводы

1. Применение порошковых материалов, синтезированных по технологии реакционного механического легирования, для получения изделий способом селективного лазерного сплавления позволяет уменьшить размер зерна в изделии по сравнению с изделиями, получаемыми из серийно выпускаемых порошков.

2. Синтезированные порошки являются композиционными материалами, обладающими модифицирующим эффектом, что способствует формированию в изделии более однородной мелкозернистой структуры, обеспечиваю-

щей изделиям более высокие физико-механические свойства.

3. Размер и форма зерна, формирующегося в процессе многослойной дуговой наплавки в среде защитных газов, существенно зависят от технологических параметров процесса. Измельчения структуры и, как следствие, улучшения физико-механических свойств изделий при многослойной дуговой наплавке можно достичь использованием более интенсивного охлаждения кристаллизующегося металла шва, уменьшением объема металла, наплавляемого за один проход, а также увеличением скорости наплавки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Additive manufacturing and foundry innovation / S. Yu-sheng [et al.] // China Foundry. – 2021. – Vol. 18. – P. 286–295.
2. Gebhardt, A. Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing / A. Gebhardt, J.-S. Hötter // Hanser Publications. – 2016. – 606 p.

3. **Thomas, D. J.** 3D Bioprinting for Reconstructive Surgery Techniques and Applications / D. J. Thomas, Z. M. Jessop, I. S. Whitaker // Elsevier. – 2018. – 451 p.

4. **Зленко, М. А.** Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2013. – 222 с.

Статья сдана в редакцию 6 октября 2022 года

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Алексей Сергеевич Федосенко, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-295-46-96-34.

Алексей Сергеевич Оленцевич, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Aleksei Sergeyeovich Fedosenko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-295-46-96-34.

Aleksei Sergeyeovich Olentsevich, PhD student, Belarusian-Russian University.