ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии»,

посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина

в рамках
Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»

5–9 октября 2020 года
Томск, Россия

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/351

ГРАДИЕНТНАЯ МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СПЛАВА СИСТЕМЫ Ni-Cr-Fe ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

[1]Рашковец М.В., [1]Никулина А.А., [2,3]Климова-Корсмик О.Г., [2,3]Кислов Н.Г., [1]Матц О.Э.

[1]Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

[2]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

[3]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Аддитивное производство с прямым подводом энергии и материала в виде порошка является быстроразвивающийся отраслью в течение последних 10 лет. Послойный процесс Высокоскоростного прямого лазерного выращивания позволяет производить изделия в одном производственном цикле за счет плавления и осаждения исходного порошка в ванне расплава предыдущего слоя [1]. Комбинирование перспективных аддитивных технологий и жаропрочных никелевых сплавов, обладающих высокими прочностными свойствами и коррозионной стойкостью при повышенных температурах, активно применяются в аэрокосмической промышленности.

Основным упрочняющим элементом рассматриваемого жаропрочного никелевого сплава системы Ni-Cr-Fe является фаза γ′ ($Ni_3(Al,Ti)$). Основной легирующий элемент Nb способствует формированию дополнительной упрочняющей фазы γ″ (Ni_3Nb). Дисперсионное выделение частиц упрочняющих фаз в γ-Ni матрице при стандартном производстве данного материала осуществляется в температурном интервале от 600 °C до 900 °C вследствие соответствующей термической обработки [2]. Нежелательными формообразованиями, снижающими усталостную прочность, являются фазы Лавеса, обладающие неравноосной геометрией, со стехиометрической формулой $(Ni, Fe, Cr)_2(Mo, Nb, Ti)$. Температура материала меняется во времени от одной зоны к другой, что значительно влияет на микроструктуру и фазовый состав, в частности на формирование и распределение фаз Лавеса.

В работе рассмотрено влияние различных комбинаций рабочих параметров на отдельные зоны выращенного слоя и материала в целом.

Установка Высокоскоростного прямого лазерного выращивания состоит из роботизированного комплекса LRM-200iD_7L Fanuc, лазерного источника LS-3 IPG Photonics, лазерной головки FLW D30 IPG Photonics со съемным соплом для наплавки SO12 Fraunhofer IWS и устройством подачи порошка в рабочую зону Sulzer Metco Twin 10C. Процесс проводился в атмосфере аргона. Комбинации параметров процесса, применяемые в эксперименте, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Рабочие параметры Высокоскоростного прямого лазерного выращивания.

Образец	Мощность лазера (Вт)	Скорость сканирования (мм/с)	Скорость подачи порошка (г/мин)	Диаметр лазерного луча (мм)
1	1250	25	30	2,2
2	1400	30	45	2,2

Как показали снимки световой микроскопии, рост направленных параллельно движению лазерной головки дендритных зерен в обоих случаях не превышает высоту одного слоя. Известным фактом является то, что каждый новый формирующийся слой влечет за собой переплав и нагрев части предыдущего осажденного материала.

При послойном производстве многократное интенсивное тепловое воздействие на материал может вызвать температуры, соответствующие фазовым превращениям [3]. Преобразование дендритных зерен в равноосную структуру в зоне «переплава» обычно происходит вследствие перекристаллизации при гомогенизирующей термообработке. В

теории фазовый состав зоны «переплава» может быть представлен матрицей твердого раствора, в то время как зона термического влияния будет соответствовать термически отпущенному материалу с выделившимися γ' и γ″ фазами. Таким образом, такие участки материала должны обладать повышенной твердостью [4]. Значения измеренной микротвердости различных зон образцов были использованы для оценки возможности формирования упрочняющих фаз.

Результаты общей микротвердости образцов не выявили значительной разницы между режимами. Микротвердость материала, полученного при меньшем тепловолжении, составила 345 ± $HV_{0.05}$, в то время как материал, сформированный при большем тепловложении, показал более высокое значение 378 ± $HV_{0.05}$. Микротвердость трех различных зон слоев представлена в Таблице 2.

Таблица 2. Микротвердость различных зон слоя.

Образец	Основная зона	Зона переплава	Зона термического влияния
1	332 ±	340 ±	355 ±
2	335 ±	357 ±	449 ±

Структура образцов двух типов содержала большое количество частиц фазы Лавеса, выделившейся в междендритном пространстве. Средний размер частиц в образцах, сформированных при меньшем тепловложении, составил 0.7 μм, в то время как при максимальном тепловложении выделились частицы со средним размером 1,1 μм. Размеры частиц в обоих случаях имеют незначительное расхождение и очень малы, что указывает на начало формирования данной фазы в материале [4], в то время как формы частиц различны. В образцах первого типа встречаются как отдельно выделившиеся частицы, так и сформированные в виде цепочки по границе зерна. Выявленные частицы образцов второго типа обладают дискретной морфологией. Разница в морфологии частиц объясняется особенностью сформированной структуры материала. В первом случае превалирует рост столбчатых кристаллов, инициирующий образование цепочек фаз Лавеса при эвтектической реакции за счет большой концентрации Nb в междендритном пространстве. Во втором случае с меньшей скоростью охлаждения преобладает равноосная структура, которая «блокирует» высокую сегрегацию Nb, вследствие чего образуются отдельные частицы.

Таким образом, увеличение тепловложения при формировании материала аддитивным методом Высокоскоростного прямого лазерного выращивания снижает образования фазы Лавеса с морфологией частиц в виде цепочки по границе зерен. С учетом разнородности по микроструктуре, наличию неблагоприятных фаз и незначительных показателях микротвердости, последующая термообработка все еще необходима для аддитивно сформированного жаропрочного никелевого сплава системы Ni-Cr-Fe.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90131.

1. Turichin G.A., Klimova O.G., Zemlyakov E.V., Babkin K.D., Kolodyazhnyy D.Y., Shamray F.A., Travyanov A.Y., Petrovskiy P.V. Technological Aspects of High Speed Direct Laser Deposition Based on Heterophase Powder Metallurgy. Physics Procedia 2015. №78. 397-406.

2. Sims Ch.T. Superalloys II: Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants. Book 1. – M: Metallurgy (1995). 384.

3. Zuo Li, Jing Chen, Shang Sui, Chongliang Zhong, Xufei Lu, Xin Lin. The microstructure evolution and tensile properties of Inconel 718 fabricated by high-deposition-rate laser directed energy deposition. Additive Manufacturing 2020. 31. 100941

4. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys. Textbook for Universities. Book 3. – M.: MISiS (1999). 416. (In Russian)