

УДК 539:41, 620.178.1

Гаврилова Т.О.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация. В настоящее время в металлургии происходят значительные качественные изменения: расширяется сортамент металлопродукции и увеличивается доля производства специальных сталей, повышаются требования к их качеству и эксплуатационным свойствам. Эти изменения обусловлены растущими потребностями различных отраслей промышленности, таких как автомобилестроение, авиация, станкостроение, строительная индустрия и энергетика, где высокие эксплуатационные свойства стали становятся ключевыми факторами для обеспечения надежности и безопасности конечной продукции. Современные технологии обработки и производства стали позволяют добиться исключительных свойств, включая повышенную прочность, коррозионную стойкость и износостойкость. В свою очередь, применение таких спецсталей в критически важных компонентах машин и оборудования способствует увеличению их срока службы и снижению затрат на обслуживание. Кроме того, активное внедрение инновационных методов, таких как аддитивные технологии и автоматизация процессов, открывает новые возможности в создании металлопродукции. Это не только сокращает время производства, но и обеспечивает высочайшее качество на всех стадиях – от получения сырья до финальной обработки изделия. Таким образом, металлургия стремительно трансформируется, отвечая вызовам времени и высоким требованиям современного рынка. В результате проведенных исследований определены основные параметры технологии получения азотированных хромистых СВС-лигатур для специальных сталей и сплавов, применяемых в аддитивном производстве и выплавке азотистых сталей и сплавов. Управление структурообразованием азотсодержащих спецсталей может быть достигнуто при помощи совершенствования технологии спутного горения при СВС-синтезе хромистых лигатур, а также строгого нормирования как химического, так и гранулометрического состава азотсодержащих металлических порошков для производства спецсталей с применением аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, металлпорошки, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, прямое лазерное сплавление, азотированный никель-хромовый сплав

Аддитивные технологии (АМ-технологии) подразумевают послойное добавление материалов по цифровой модели, главным образом используя металлпорошковые композиции с диаметром частиц $10\div 100$ мкм. В 2021 году введен ГОСТ Р 59035-2020, который устанавливает требования к таким порошкам, включая сферическую форму частиц, текучесть, влажность, насыпную плотность после утряски, уплотняемость.

В России лидирует производитель АО «Полема». Наиболее распространенным методом производства порошков для АМ является атомизация (распыление), включая газовую, вакуумную и центробежную. Газовая атомизация использует VIGA-технологию, где металл плавится в вакууме. Технология EIGA применяется для реактивных металлов, а Plasma Atomization обеспечивает особую чистоту порошков.

Основные виды аддитивных технологий – Bed Deposition и Direct Deposition. Первый слой порошка формируется на платформе, затем нагревается лазером (например, SLS и DMLS). DMLS требует меньшей энергии, но готовая деталь обладает менее высокими прочностными характеристиками по сравнению с SLM [1].

Задача эксперимента состояла в доказательстве возможности получения металлоизделий высокой чистоты и качества с использованием азотированного хрома, что осуществляется в три последовательных этапа. Также некоторые сложнопрофильные детали невозможно в некоторых случаях получить традиционными методами [2].

Первый этап проходил на базе ООО «НТПФ «Эталон» (г. Магнитогорск). Основной целью является разработка технологии получения азотированного хрома особой чистоты с помощью СВС технологии и его апробация в производственных условиях. На этом этапе был получен порошок высокой чистоты с составом: азот – 15,1%, кремний – 0,08%, углерод – 0,011%, сера – 0,014%, фосфор – 0,026%, алюминий – 0,18%, хром – 82,7%, железо – 1,27% и кислород – 0,2%. Общий объем составил 20 кг, фракция – 0-63 мкм.

Второй этап прошел на базе АО «Полема» (г. Тула), где в задачу входило получение металлического порошка азотистого никель-хромового сплава марки ПР-АН55Х45, обладающего жаростойкостью [3-6] и высокой стойкостью к окислению [7]. Было изготовлено 200 кг порошка сферической формы, разделенного на две партии по гранулометрическому составу.

Третий этап состоял в создании 9 образцов для оценки качества на базе Института лазерных и сварочных технологий (г. Санкт-Петербург).

Для создания металлического порошка марки ПР-АН55Х45 применялась установка газового распыления расплавов в вакуумной камере, изображенная на рис. 1.

Этот аппарат выпускает сферические металлические порошки, подходящие для селективного лазерного сплавления, с частицами диаметром от 40 до 200 мкм. Рис. 2 демонстрирует технологическую схему производства данного порошка.



Рис. 1. Установка распыления с вакуумной камерой

Первая партия порошка никель-хромового сплава с азотом была распылена в инертной газовой среде азота с фракцией частиц 40-160 мкм. Химический состав порошка ПР-АН55Х45 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав опытного порошка ПР-АН55Х45

Массовая доля, %						
Ni	Cr	N	C	Fe	Al	Другие
Основа	43-47	0,5-0,7	<0,1	<0,2	<0,3	S < 0,01 P < 0,01 O < 0,5 Si < 0,2

Современная технология лазерного выращивания металлических деталей является авангардным направлением аддитивных технологий, позволяющим создавать компоненты для сложных систем аэрокосмической и оборонной техники. На рис. 3 показана установка лазерного выращивания.

Процесс начинается с формирования равномерного слоя металлического порошка на подложке и его последующего сплавления лазером. Выращивание образцов осуществлялось на установке прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-А3 по технологии Bed Deposition и SLM (Selective Laser Melting, селективное лазерное плавление). В процессе применялся аргон высокой чистоты для локальной защиты обрабатываемой зоны. Лазерный луч фокусировался в точку диаметром 0,9 мм. В ходе эксперимента варьировались энергия и скорость перемещения рабочего инструмента, а также расход присадочного материала для достижения определённых толщин слоёв: 0,15 мм; 0,3 мм и 0,45 мм. Расход порошка был подобран соответственно этим параметрам. Мощность лазера оставалась постоянной. Параметры эксперимента представлены в табл. 2. Типовая форма выращенного образца показана на рис. 4.

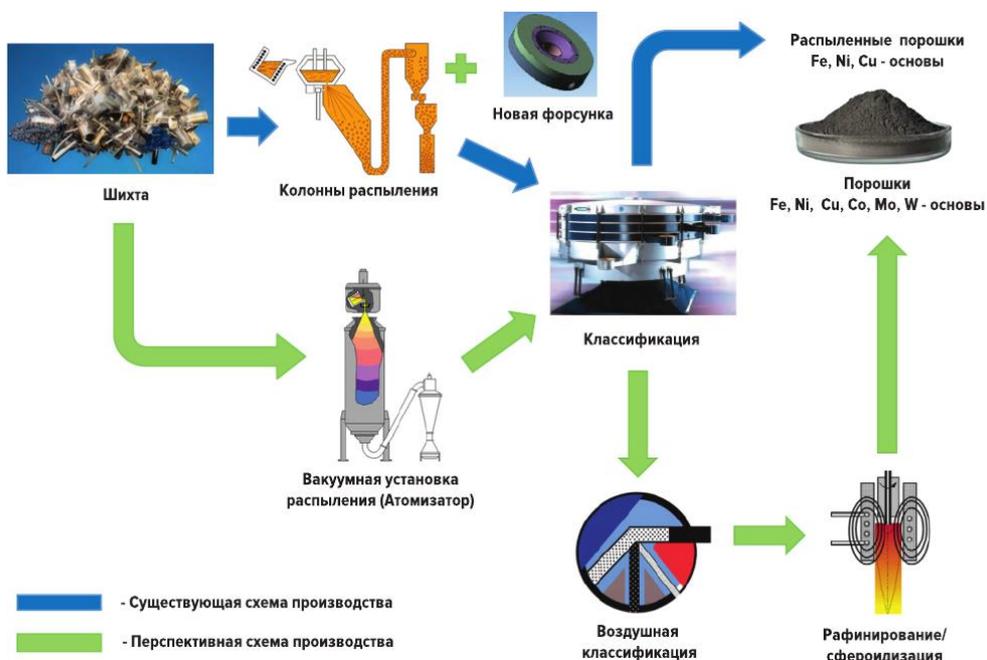


Рис. 2. Схема производства металлических порошков



Рис. 3. Установка лазерного выращивания металлических деталей ИЛИСТ

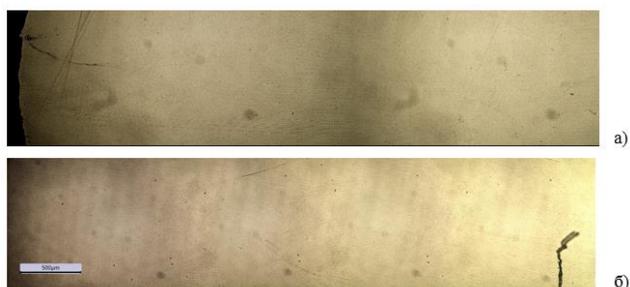


Рис. 5. Фотографии микрошлифов материалов, полученных из порошка ПР-АН55Х45: а – образец №5 без макродефектов; б – образец №4 с трещинами и порами

Таблица 2

Варьируемые параметры при выращивании из материала ПР-АН55Х45

Номер образца	Скорость перемещения рабочего инструмента, мм/с	Расход порошка, г/мин
1	10	2,65
2		5,30
3		7,95
4	15	3,98
5		7,95
6		11,92
7	20	5,30
8		10,61
9		15,91

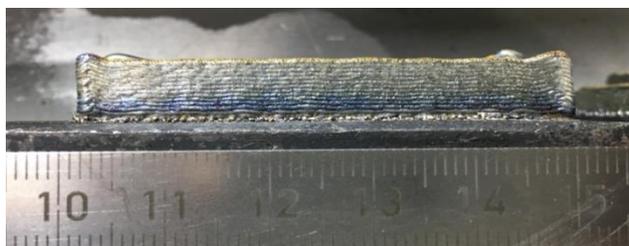


Рис. 4. Образец из материала ПР-АН55Х45, выращенный методом прямого лазерного выращивания

Эксперимент показал возможность формирования образцов во всем диапазоне исследованных параметров. Образцы имели равномерную структуру без дефектов, таких как наплывы и утонения, что свидетельствует о стабильности процесса. Однако было замечено, что уменьшение энергии приводит к появлению трещин и несплавлений. Пористость присутствовала почти во всех образцах. Типичные фотографии структур приведены на рис. 5.

Эксперимент проводился в три этапа: сначала с однородным гранулометрическим составом - Партия 1; далее с разнородным составом - Партия 2, и, наконец, с подогревом платформы до 200°C. Результаты металлографического исследования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты металлографического исследования

Номер образца	Дефекты, выявленные по результатам металлографического контроля		
	Партия 1	Партия 2	Партия 2 + подогрев платформы до 200°C
1	-	-	-
2	Поры	Поры	Поры
3	-	Поры	-
4	Поры, трещина	Поры	-
5	-	-	-
6	Поры	-	-
7	Поры	поры	-
8	Несплавления между частицами	Несплавления между частицами	-
9	Поры, несплавления между частицами	Несплавления между частицами	Несплавления между частицами

Аналогичные исследования структуры и свойств изделий из жаростойких сплавов на основе Ni-Cr-CrN, также применяющих аддитивную технологию DMLS, были реализованы в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», подтверждая выводы эксперимента [1].

Заключение

Таким образом, существует потенциальная возможность использования порошка марки ПР-АН55Х45 в аддитивном производстве изделий посредством прямого лазерного выращивания. Процесс протекает с уверенным формированием наносимого слоя, что свидетельствует о равноудалённости распределения присадочного материала в отношении лазерного луча и зоны обработки. Во всех девяти образцах не выявлено дефектов, выходящих на поверхность. Образцы, изготовленные в режимах с повышенной погонной энергией (скорость рабочего инструмента составляет 20 мм/с), содержат меньшее количество дефектов. Оптимальный расход порошка варьируется от 5 до 10 г/мин. При снижении энергии на

единицу длины наблюдается тенденция к возникновению несплавлений между частицами порошка и трещин. Дополнительный подогрев платформы строительства до 200°C способствует улучшению качества образцов. Необходимость дальнейших исследований структуры и свойств материала из сплава ПР-АН55Х45, полученного методом прямого лазерного выращивания, представляется обоснованной.

Список источников

1. Исследование структуры и свойств изделий из жаростойких сплавов на основе Ni–Cr–CrN с высоким содержанием азота, полученных с применением аддитивной технологии прямого лазерного сплавления порошковых материалов / Зиатдинов М.Х., Жуков А.С., Евсеев Н.С. и др. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 118-130.
2. Khaing M.V., Fuh J.Y.N., Lu L. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterization of EOS parts // Journal of Materials Processing Technology. 2001. V. 113. P. 269-272. DOI: 10/1016/S0924-0136(01)00584-2
3. Sustaita-Torres I.A. et al. Aging of a cast 35Cr-45Ni heat resistant alloy // Mater. Chem. Phys. 2012. V. 133. No. 2 P. 1018-1023.
4. Zhang Y. et al. High-temperature deformation and fracture mechanisms of an advanced heat resistant Fe-Cr-Ni alloy // Materials Science and Engineering. A. 2017. V. 686. P. 102-112.
5. Xie Y. et al. Corrosion behaviour of Ni-Cr alloys in wet CO₂ atmosphere at 700 and 800°C // Corros. Sci. 2019. V. 146. P. 28-43.
6. Zhu J. et al. Fabrication of ZrO-NiCr functionally graded material by powder metallurgy // Mater. Chem. Phys. 2001. V. 68. P. 130-135/
7. Kazakov A.A. Phase formation control in liquid and solidifying steels and nickel-chromium alloys // Advanced materials: St-Petersburg State Technical University Transactions. 1996. No. 463. P. 8-21 (in Russian).

Сведения об авторах

Гаврилова Татьяна Олеговна – директор ООО «Эталон-ПРО», Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FEATURES OF THE APPLICATION OF ADDITIVA TECHNOLOGIES IN METALLURGY

Gavrilova Tatiana O. – Director of "Etalon-PRO" LLC, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Currently, significant qualitative changes are taking place in metallurgy: the range of metal products is expanding and the share of production of special steels is increasing, requirements for their quality and operational properties are increasing. These changes are driven by the growing needs of various industries, such as automotive, aviation, machine tool industry, construction industry and energy, where high performance properties of steel are becoming key factors to ensure the reliability and safety of final products. Modern steel processing and production technologies allow us to achieve exceptional properties, including increased strength, corrosion resistance and wear resistance. In turn, the use of such special steels in critical components of machinery and equipment helps to increase their service life and reduce maintenance costs. In addition, the active introduction of innovative methods, such as additive technologies and process automation, opens up new opportunities in the creation of metal products. This not only reduces production time, but also ensures the highest quality at all stages – from receiving raw materials to the final processing of the product. Thus, metallurgy is rapidly transforming, responding to the challenges of the time and the high demands of the modern market. As a result of the conducted research, the main parameters of the technology for obtaining nitrided chromium SHS ligatures for special steels and alloys used in additive manufacturing and smelting of nitrogenous steels and alloys have been determined. The control of the structure formation of nitrogen-containing special steels can be achieved by improving the technology of sputtering combustion in the SHS synthesis of chromium ligatures, as well as strictly rationing both the chemical and granulometric composition of nitrogen-containing metal powders for the production of special steels using additive technologies.

Keywords: additive technologies, metal powders, self-propagating high-temperature synthesis, direct laser fusion, nitride nickel-chromium alloy

Ссылка на статью:

Гаврилова Т.О. Особенности применения аддитивных технологий в металлургии // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 30-33.

Gavrilova T.O. Features of the application of additive technologies in metallurgy. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 30-33.