

УДК 669.24/.25

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Co-Ni-Al ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Гоголева Виктория Дмитриевна

*Студентка 1 курса, магистратура,
кафедра «Материаловедение»*

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

*Научный руководитель: С.Ю. Шевченко
кандидат технических наук, доцент,
кафедра «Материаловедение»*

*Консультант: Д.И. Сухов
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория №616
«Аддитивные технологии и порошковая металлургия» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ*

По сравнению с другими направлениями машиностроительных технологий, одним из самых перспективных и наиболее требовательным является авиационное двигателестроение. Ввиду необходимости постоянного увеличения КПД узлов, повышения их надежности и долговечности, а также снижения экономических и временных затрат на производство, разработка жаропрочных материалов для получения сложнопрофильных и тонкостенных деталей происходит постоянно. К ним относят сплавы на основе никеля, кобальта и железоникелевые системы, причем последние довольно быстро исчерпали свой ресурс [1].

Несмотря на то, что большая часть работ посвящена никелевым сплавам, полученным методом селективного лазерного сплавления (СЛС), эти высокопрочные материалы с большим содержанием γ' -фазы имеют существенные недостатки – низкую свариваемость, охрупчивание в температурном диапазоне 600-800 °С из-за сочетания усиленного окисления границ зерен, повышенной прочности и накопления дислокаций вблизи границ зерен, а также образования ТПУ фаз (σ -фазы, μ и фазы Лавеса) [1]. Решение проблемы реализуется двумя параллельными путями исследований и разработок.

Во-первых, сначала были адаптированы никелевые сплавы систем Ni-Cr-Al, Ni-Cr-Mo и Ni-Al-Co. На основе полученного опыта была разработана линейка новых жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) для аддитивных технологий.

Во-вторых, было начато использование в аддитивных технологиях (АТ) сплавов на основе кобальта, которые сложно применять в литейном производстве и для получения заготовок методом ОМД. По сравнению с никелем, кобальт имеет более высокую температуру плавления, стойкость к горячей коррозии и более пологую кривую длительной прочности. Существенным прорывом в изучении сплавов на основе кобальта стало открытие Сато новой высокотемпературной γ' -фазы $Co_3(Al, W)$, которую возможно стабилизировать благодаря легированию танталом, ниобием и титаном [2]. Сначала также были проведены работы по адаптации уже существующих сплавов систем Co-Ni-W-Fe и Co-Ni-W-Ta, а затем, специально для АТ был разработан отечественный сплав системы Co-Cr-Ni-W-Ta.

Ввиду малого количества исследований по кобальтовым сплавам, особенно для СЛС, целесообразно рассмотреть систему, в которой присутствует высокое содержание γ' -фазы. В данной работе положено начало изучению кобальтового сплава системы Co-Ni-Al, в котором реализуется механизм упрочнения через образование большого количества γ' -фазы ($\approx 70\%$) [3-6]. Целью работы является исследование особенностей структуры и свойств сплава системы Co-Ni-Al на первых двух основных этапах аддитивного производства (АП) – литой материал и металлопорошковая композиция (МПК).

В ходе работы были изготовлены литая шихтовая заготовка и МПК фракции 10-63 мкм, предназначенная для проведения селективного лазерного сплавления.

Для литого материала изучены химический состав и содержание газовых примесей (ГОСТ 17745, ГОСТ 24018.7, ГОСТ 24018.8), плотность (ГОСТ 25281), микроструктура (РЭМ, МРСА) и упрочняющие фазы; для МПК проведен гранулометрический анализ (ГОСТ Р 8.777), исследованы технологические характеристики (ГОСТ 19440, ГОСТ 20899) и сферичность.

Также для кобальтового сплава системы Co-Ni-Al были построены и проанализированы ДСК-кривые, в частности, для литого состояния и МПК фракций -10 мкм, 10-63 мкм и +63 мкм. По ним были определены температуры сольвуса, солидуса и ликвидуса.

Химический состав и содержание газовых примесей материала соответствовали обозначенным диапазонам, определенным на основании статей и требований к кобальтовым литым шихтовым заготовкам. Значение плотности, равное $8,489 \text{ г/см}^3$, оказалось сопоставимым с самыми востребованными отечественными никелевыми сплавами для СЛС – ЭП648 ($8,180 \text{ г/см}^3$) и ВЖ159 ($8,230 \text{ г/см}^3$). В таблице 1 представлены примерные значения температур сольвуса, солидуса и ликвидуса исследуемого кобальтового сплава.

Таблица 1 – Критические температуры литого материала

Маркировка	$T_{\text{Solv}}, ^\circ\text{C}$	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_L, ^\circ\text{C}$
19	1180	1324	1392

Ввиду медленного охлаждения в структуре присутствовали как дендритная матрица γ -фазы, так и частицы γ' -фазы кубической формы в осях дендритов. Помимо наличия γ' -фазы в межосных пространствах, в них присутствовала эвтектика (γ/γ'), вблизи которой частицы значительно укрупнились (рисунки 1 - 2).



Рисунок 1. Микроструктура, полученная на световом микроскопе (x100)

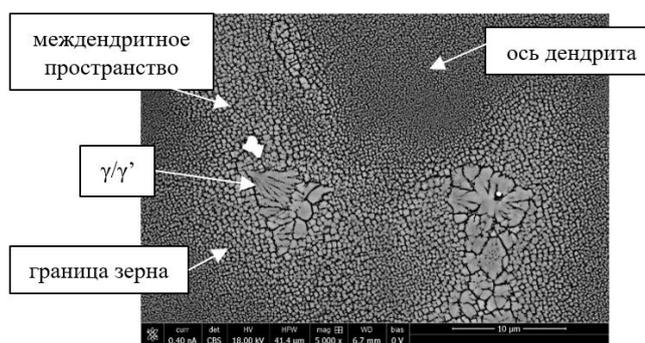


Рисунок 2. Микроструктура, полученная на РЭМ – эвтектика в междендритных областях (x5000)

Химический анализ общего поля методом МРСА показал, что в нем действительно присутствовали в большом количестве Co, Ni, Ta, Al и W. Эвтектика состояла из Co, Ni, Ta и Al. В оси дендрита в большом количестве присутствовали Co, Ni, Ta, Al, Cr и W. Междендритное пространство отличалось от состава оси дендрита увеличенным содержанием Ta примерно в 2 раза и отсутствием W. При точечном анализе были обнаружены карбиды тантала и гафния.

Для МПК был проведен гранулометрический анализ и определены такие технологические показатели как насыпная плотность и текучесть. При оценке сферичности выявлено, что основными разновидностями дефектных гранул фракции 10-63 мкм (рисунок 3) являются гранулы с наличием сателлитов и мелких гранул на поверхности; гранул с аморфным панцирем не обнаружено. Доля частиц сферической формы составила 82,4 %.

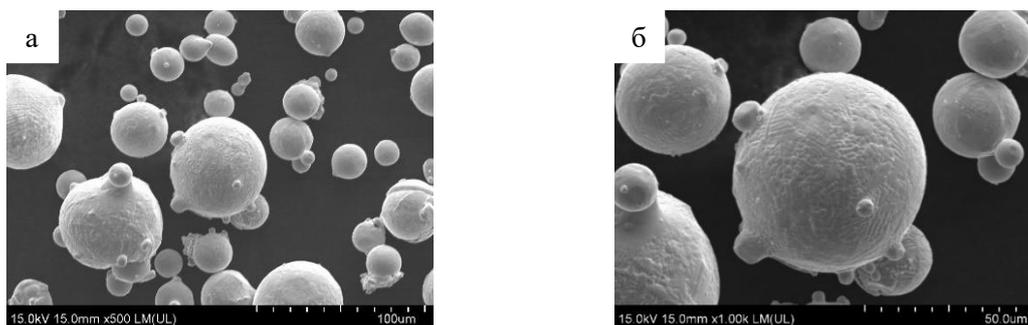


Рисунок 3. Морфология частиц МПК кобальтового сплава 19: а - $\times 500$, б - $\times 1000$

При анализе ДСК-кривых для литого материала и МПК основной фракции было обнаружено, что различные эндо- и экзотермические реакции во первом случае имели более очевидные точки температур фазовых превращений. Мелкая фракция (-10 мкм) существенно отличалась по количеству поглощенной и выделившейся энергии относительно основной (10-63 мкм) и крупной (+63 мкм), что, предположительно, можно объяснить высоким содержанием кислорода.

Литература

1. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Кн.1. М: Металлургия, 1995. 384 с. ISBN 5-229-00781-8. URL: <https://djvu.online/file/A9k0nm11C3AEW?ysclid=mgwcyngnvl70574110> (дата обращения: 20.03.2026).
2. Sato J., Omori T., Oikawa K. et. al. Cobalt-Base High-Temperature Alloys // Science. 2006. Vol. 312, Issue 5770. P. 90-91. DOI: 10.1126/science.1121738.
3. Murray S.P., Pusch K.M., Polonsky A.T. et. al. A defect-resistant Co-Ni superalloy for 3D printing // Nature Communications. 2020. Vol. 11, Art. 4975. DOI: 10.1038/s41467-020-18775-0.
4. Murray S.P., Raeker E.B., Pusch K.M. et. al. Microstructure Evolution and Tensile Properties of a Selectively Laser Melted CoNi-Base Superalloy // Metallurgical and Materials Transactions: A. 2022. Vol. 53. P. 2943-2960. DOI: 10.1007/s11661-022-06716-z.
5. High temperature oxidation resistant Co-based gamma/gamma prime alloys DMREF-Co: пат. US 11725263 B2; заявл. 04.04.2019; опубл. 15.08.2023.
6. Murray S. P. CoNi-base superalloys with improved high temperature properties and 3D Printability: dis. for the degree Doctor of Philosophy in Materials. Santa Barbara: University of California. 2021. P. 275. URL: <https://escholarship.org/uc/item/92z770w8> (date of request: 21.03.2026).