

## **УДК 669.**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СИНТЕЗИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА СТАЛИ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Ni-Co-Mo, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ, ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ И БАРОТЕРМИЧЕСКИХ ОБРАБОТОК**

Гоголева Виктория Дмитриевна

*Студентка 4 курса, бакалавриат,  
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: И.А. Богачев  
кандидат физико-математических наук, начальник сектора «Аддитивное производство», лаборатория №616 «Аддитивные технологии и порошковая металлургия» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ*

Последним трендом в материаловедении стало аддитивное производство, в том числе полного цикла. Оно включает в себя: изготовление литой шихтовой заготовки с минимальным содержанием примесей; получение дисперсных металлопорошковых композиций (МПК); разработку электронных моделей, в том числе с применением топологической оптимизации; создание технологий синтеза деталей из металлопорошковых композиций с последующей термической и баротермической обработкой; контроль свойств, структуры и качества изготовленных деталей различными методами [1].

Благодаря использованию аддитивных технологий (АТ) можно создать детали сложной геометрической конфигурации, снизить массу при сохранении прочностных характеристик, повысить производительность и коэффициент использования материала (КИМ). Специально для аддитивного производства в 2020 году НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработал коррозионностойкую мартенситно-старееющую сталь (МСС) марки 02X13H5K9M4 (ВНЛ14). Ее состав был специально модифицирован для исключения образования горячих трещин при синтезе, улучшения свариваемости и формирования необходимой структуры, что позволило в конечном итоге получить комплекс свойств материала на уровне литых аналогов [2,3]. Для достижения требуемых параметров в том числе необходимы наиболее технологичные режимы термической и баротермической обработок.

С целью оптимизации существующего технологического цикла изготовления заготовок из разработанной МСС для уменьшения вероятности коробления сложнопрофильных деталей, сохранения качества поверхности и снижения стоимости, целесообразно рассмотреть альтернативные режимы термической и баротермической обработок с возможностью исключения или корректировки технологических операций, оказывающих наиболее интенсивное термическое воздействие на синтезированный материал.

Для исследования влияния альтернативных режимов термической и баротермической обработок на структуру и механические свойства стали ВНЛ14 был решен ряд задач. Сначала была выплавлена литая шихтовая заготовка, проведен ее химический анализ (ВНЛ14-17Л). Затем посредством процесса газовой атомизации расплава была получена металлопорошковая композиция (МПК), был проведен химический анализ и определено содержание газовых примесей (таблица 1) Были определены технологические характеристики МПК (таблица 2). С помощью установки для 3D печати по выбранным оптимальным режимам процесса СЛС были напечатаны экспериментальные образцы.

Таблица 1 – Определяемые элементы при химическом и газовом анализе отобранных проб и образцов, данные патента

Маркировка образца	Массовая доля элементов, %										
	Основные элементы							Примеси			
ВНЛ14-17Л (17П,17С)	Fe	Cr	Ni	Co	Mo	Si	Mn	Nb	C	S	O
Патент 2751064 С1	Осн.	12.5	4.5	8.5	3.5	Не более					
		–	–	–	–	0.1	0.3	0.15	0.02	0.01	0.06
Примечание: Иттрий и лантан вводят по расчету и не определяют при химическом анализе ( $Y$ и $La \leq 0,02\%$ )											

Таблица 2 – Результаты измерения текучести и насыпной плотности МПК

Плавка	Текучесть, с	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>
№ВНЛ14-17П	19,0	3,9852
№ВНЛ14-17С	18,5	4,1520

В процессе модифицирующих обработок варьировали следующие параметры: температура отжига, закалочная среда (в т.ч. наличие или отсутствие операций закалки), температура и время выдержки при старении, последовательность технологических операций.

С целью определения механических характеристик были изготовлены образцы по ГОСТ 1497-2023, 11150-84. Для сравнения микроструктур полученных образцов были сделаны металлографические шлифы.

На первом этапе работ проведен анализ структуры и механических характеристик (таблица 3) стали ВНЛ14 в исходном синтезированном состоянии, а также после операций высокотемпературного отжига при 1200 °С и старения из исходного состояния: 550 °С, 3 ч; 525 °С, 3 ч; 525°С, 10 ч; 500 °С, 10 ч.

Таблица 3 – Механические свойства образцов-свидетелей

Маркировка образца	Ст. ТО	СЛС		Старение 550 °С, 3 ч		Старение 525 °С, 3 ч		Старение 525 °С, 10 ч		Старение 500 °С, 10 ч	
		σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа
Предел текучести, σ <sub>0,2</sub> , МПа	1300	907	896	1274	1269	1290	1310	1478	1448	1427	1439
Временное сопротивление, σ <sub>в</sub> , МПа	1480	1029	1032	1338	1288	1340	1355	1520	1499	1470	1488

По сравнению с базовым режимом ТО (отжиг 650 °С + закалка 1000 °С (масло) + старение 550 °С) обнаружено следующее. После СЛС значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$  снизились в 1,44 раза, так как без старения в стали отсутствуют дисперсные упрочняющие фазы. При различных режимах старения в некоторых случаях происходит повышение прочностных характеристик из-за распада мартенсита и выделения упрочняющих фаз. После старения при 550 °С, 3 ч уменьшаются  $\sigma_{0,2}$  в 1,02 раза, а  $\sigma_b$  в 1,13 раз. После старения при 525 °С, 3 ч  $\sigma_{0,2}$  не изменяется, а  $\sigma_b$  уменьшается в 1,1 раза. После старения при 525 °С, 10 ч увеличиваются  $\sigma_{0,2}$  в 1,13 раз, а  $\sigma_b$  в 1,02 раза. После старения при 500 °С, 10 ч  $\sigma_{0,2}$  увеличивается в 1,1 раза, а  $\sigma_b$  не изменяется.

Результаты исследований показали, что параметры статической прочности ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ) благодаря коротким вариантам термических обработок можно увеличить относительно свойств после стандартной ТО. Однако критерий жесткости (E) при этом будет немного ниже заявленных данных.

В исходном синтезированном состоянии структура стали представляет собой типичную для технологии СЛС мелкоячеистую структуру с характерным размером ячеек до 5-10 мкм, внутри которых наблюдается пластинчатое строение с ориентацией пластин параллельно с направлением треков. По характеру пластин можно сделать вывод о наличии внутри ячеек большого количества мартенсита. Таким образом, вследствие высоких скоростей охлаждения и структурных особенностей стали после синтеза формируется псевдозакаленная мартенситная структура.

При высокотемпературном отжиге (1200 °С) произошла рекристаллизация исходных ячеек, увеличение размера зерна и гомогенизация структуры, однако внутри зерен все равно прослеживаются пластинчатые микроучастки, а также большое количество малоугловых границ. Данные границы являются наследственной структурой ячеек, а вид пластин и скорости нагрева и охлаждения при отжиге позволяют предположить наличие в структуре стали нижнего бейнита и сорбита отпуска.

При старении по всем выбранным режимам прослеживается тенденция обратимости сдвигового М→А превращения, выражающаяся увеличением доли аустенита в стали, а также выделение избыточных дисперсных фаз, обеспечивающих повышение прочностных характеристик.

Были также проведены оценка пористости, количества остаточного аустенита и твердости по Роквеллу. На следующем этапе работ будут проведены исследования структуры и механических характеристик стали ВНЛ14 после операций горячего изостатического прессования (ГИП), отжига и закалки с последующим старением в различных комбинациях.

## Литература

1. НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: официальный сайт. Москва. Обновляется в течение суток. Режим доступа: <https://viam.ru/add> (дата обращения: 15.03.2025).
2. Богачев И.А. Исследование микроструктуры и свойств коррозионностойкой стали системы Fe-Cr-Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления/ И.А. Богачев, Е.А. Сульянова, Д.И. Сухов, П.Б. Мазалов. Текст: электронный // Труды ВИАМ. 2019. №3 (75). С. 1-13. Режим доступа: <http://viam-works.ru/ru/articles> (дата обращения 16.03.2025).
3. Каблов Е.Н., Неруш С.В., Тонышева О.А., Мазалов П.Б., Крылов С.А., Богачев И.А. Высокопрочная порошковая коррозионно-стойкая сталь: пат. 2751064 С1 Российская Федерация. 2021. Бюл. №19. 8 с.