ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/294

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС6У**

¹Корниенко Е.Е., ¹Рашковец М.В., ¹Лазуренко Д.В.

¹*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

На сегодняшний день изготовление деталей при помощи различных методов аддитивного производства (АП) является актуальной темой. Наиболее востребованными технологиями в настоящее время являются селективное лазерное и электронно-лучевое спекание [1]. По сравнению с традиционными способами получения деталей, АП имеет следующие преимущества: получение изделий любой формы, использование любого материала, экономия времени, гибкость и способность контролировать и оптимизировать производительность продукции [2]. Аддитивные технологии применяют для изготовления изделий сложной геометрии из специальных материалов в авиационной промышленности, космической индустрии, энергетическом машиностроении, а также биомедицине и ряде других отраслей.

Жаропрочные сплавы на основе никеля обладают превосходными механическими свойствами, высоким пределом ползучести, коррозионной стойкостью и износостойкостью. Благодаря этому, из никелевых суперсплавов изготавливают детали для высокотемпературных реактивных двигателей и газовых турбин [3]. В основном сырьем для печати является порошок марок Inconel 718 и Inconel 625 [4,5], хотя в последнее время встречается ряд работ, где в качестве прекурсора используют проволоку [5,6]. Аддитивная технология получения изделий с подачей проволоки является экономически более выгодной, за счет более низкой цены материала. Также, снижается вероятность загрязнения выращиваемого материала кислородом [2]. В отечественной промышленности широко применяют сплав ЖС6У [7]. Известно, что сплавы типа ЖС содержат небольшое количество углерода, поэтому объемная доля карбидов в этих материалах невелика (1-2 %). Основной проблемой является то, что карбиды преимущественно выделяются по границам зерен, что существенно снижает пластичность этих материалов и, как следствие, невозможность получать из него проволоку методами пластической деформации. В основном в литературе встречаются работы, посвященные изучению жаропрочных никелевых сплавов в литом состоянии, а структура и свойства никелевых сплавов типа ЖС после термической обработки затронуты незначительно. Целью настоящей работы является изучение влияния различных видов термической обработки на структурные особенности и свойства жаропрочного сплава ЖС6У.

В качестве исходного материала использовали жаропрочный никелевый сплав марки ЖС6У. Химический состав сплава (Ni – основа; 8,52 % Cr; 9,19 % W; 10,14 % Co; 6,14 % Al; 1,71 % Mo; 2,48 % Ti; 0,94 % Nb, 0,05 % Fe) соответствует ОСТ 1-90126-85. Исходный материал представлял собой цилиндр диаметром 90 мм и длиной 300 мм в литом состоянии. Образцами для структурных исследований, а также измерений микротвердости, являлись поперечные микрошлифы, подготовленные по стандартной методике: механическое шлифование и полирование с использованием суспензии, содержащей частицы Al₂O₃. Для травления микроструктуры использовали концентрированную царскую водку (HCl : HNO₃ = 3:1). Микроструктуру образцов исследовали при помощи светового микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, а также растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP. Поэлементный химический анализ выполняли на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором Oxford Instruments EDS X-Act. Режимы термической обработки исходного сплава ЖС6У были следующими: температура нагрева: 900, 1000, 1100 и 1200 °С, время выдержки 1 час, среда охлаждения: печь и вода. Термическую обработку проводили в муфельных нагревательных печах. Микротвердость образцов оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 10 Н. Для определения прочностных характеристик проводили испытания на сжатие на машине сжатия Instron 3369 по ГОСТ

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

25.503-97. Скорость нагружения была равной 1 мм/мин. Для проведения испытаний из исходной заготовки вырезали гладкие цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 10 мм. Из исходной заготовки сплава ЖС6У вырезали прутки диаметром 5 мм и длиной 30 мм, которые подвергали деформированию в валках прокатного стана. Расстояние между валками уменьшали от 5 до 3 мм. Перед прокаткой образцы нагревали до 1200 °С и выдерживали 1 час.

В работе показано, что материал в литом состоянии представляет собой крупные столбчатые кристаллиты длиной до 100 мм и имеет типичное дендритно-ячеистое строение. Основными фазами являются: карбиды свободной формы типа MC, вытянутые карбиды с возможной стехиометрией $M_{23}C_6$ или M_6C , γ' -фаза и неравновесная эвтектика $\gamma'+\gamma$.

Проведение термической обработки не оказывает влияния на макроструктуру образцов: дендритно-ячеистое строение сохраняется. Увеличение температуры нагрева при отжиге и закалке не оказывает влияния на размеры карбидных частиц. Закалка при температуре 1200 °С позволяет получить минимальный размер γ' -фазы (менее 0,3 мкм) и минимальную ее объемную долю.

Измерениями микротвердости показано, что наибольший уровень микротвердости составляет 598 HV и соответствует образцам после закалки при 900 °С. Минимальные значения микротвердости характерны для образцов после закалки при температуре 1200 °С (449 HV). При испытаниях образцов на сжатие было выявлено, что предел прочности образцов всех образцов находится примерно на одном уровне (1900-2100 МПа). Установлено, что разрушение образцов обусловлено наличием карбидов, выделяющихся по границам ячеек дендритов.

Пластическая деформация образцов, нагретых до 1200 °С и выдержанных 1 час, проходит с образованием трещин. Таким образом, проводить пластическое деформирование сплава подобного химического состава нецелесообразно. Для получения филаментов рациональнее использовать литейную технологию.

Благодарности

Научные исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013)".

1. И. Ю. Смуров, С. Г. Конов, Д. В. Котобан, *Новости материаловедения*. Наука и техника, 4-14 11-22 (2015).
2. Q. Guan, *Автоматическая сварка*, 10-11 33-37 (2013).
3. C. Radhakrishna, K. P. Rao, *Journal of Material Science*, 32-8 1977-1984 (1997).
4. M.M. Kirka, F. Medina, R. Dehoff, A. Okello, *Materials Science and Engineering: A*, 680 338-346 (2017).
5. F. Xu, Y. Lu, Y. Liu, B. Xub, P. Heb, *Physics Procedia* 50, 48-54 (2013).
6. X. Wang, T. Keya, K. Chou, *Procedia Manufacturing* 5, 1006-1017 (2016).
7. Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, Г.Н. Миннеханов, Б.Е. Лопаяев, *Омский научный вестник*, 1-117 63-68 (2013).
8. Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов, *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* (М.:МИСИС, 1999) 416 с.
9. H. Kitaguchi, *In book: Metallurgy - Advances in Materials and Processes*. (2012). P. 19-42.
10. R. Dong, J. Li, T. Zhang, R. Hu, H. Kou, *Materials Characterization* 122 189-196 (2016).
11. G. Tian, C. Jia, Y. Wen, *Rare Metals* 27 410-417 (2008).
12. Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, Н. А. Давлеткильдеев, Г. Н. Миннеханов, *Омский научный вестник* 1-97 24-29 (2011).