УДК 538.951:539.424

# ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СПЛАВА INCONEL 718, ПОЛУЧЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© 2014 г.

М.Ю. Грязнов, <sup>1,2</sup> С.В. Шотин, <sup>1</sup> В.Н. Чувильдеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИФТИ Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского <sup>2</sup>Институт проблем машиностроения РАН, Н. Новгород

gryaznov@nifti.unn.ru

Поступила в редакцию 08.07.2014

Представлены результаты исследований структуры и физико-механических свойств образцов, полученных по технологии послойного лазерного сплавления (ПЛС) из порошкового сплава Inconel 718. Показано, что оптимизация режимов ПЛС и последующей термообработки изделий позволяет достичь в материале готового изделия механической прочности, сопоставимой с прочностью материалов, получаемых по традиционным технологиям (в частности, технологии горячей прокатки).

*Ключевые слова:* послойное лазерное сплавление, жаропрочные сплавы, Inconel 718, прочность, пластичность.

#### Ввеление

Жаропрочные сплавы системы «никельхром-железо», разработанные в конце 1940-х годов, хорошо зарекомендовали себя в двигателестроении и впоследствии непрерывно совершенствовались, главным образом за счет легирования тугоплавкими металлами (Nb, Mo и др.). Одним из наиболее распространенных серийных сплавов данной системы является сплав Inconel 718. В настоящее время сплав Inconel 718 широко применяется в авиакосмической и атомной промышленности. В частности, он используется в газовых турбинах, реактивных двигателях, ядерных реакторах, сосудах высокого давления благодаря высокой стабильности его механических свойств при повышенных температурах (до 800°C) [1-3]. Вместе с тем при практическом применении этого высокопрочного сплава возникает нетривиальная научно-техническая проблема получения из него изделий сложной формы. Эта проблема вызвана его низкой обрабатываемостью давлением из-за чрезвычайно узкого температурноскоростного диапазона пластической деформации [4, 5], а также связана со сложностью механической обработки из-за высокой склонности этого материала к наклепу [3]. Одной из наиболее эффективных технологий производства металлических изделий без использования механообработки является технология послойного лазерного сплавления (ПЛС). Суть технологии заключается в послойном изготовлении готовых изделий из порошкового материала на основе САО-модели [6–10]. Основная задача получе-

ния ПЛС-изделий связана с оптимизацией технологических режимов лазерного сплавления [11, 12]. Варьирование режимов сплавления позволяет эффективно управлять структурой материала изделия, что, в свою очередь, позволяет влиять на его физико-механические характеристики, изменяя их в широком диапазоне значений [13]. Для изучения перспектив практического применения порошковых деталей, полученных с использованием технологии ПЛС, представляется весьма важным сравнение их свойств со свойствами порошковых изделий, полученных с помощью наиболее эффективной технологии электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС), а также сравнение их свойств со свойствами материалов, полученных методами индукционного плавления и горячей прокатки. Можно предположить, что механические характеристики полученного методом ПЛС материала должны быть близки к характеристикам литых образцов и, следовательно, могут оказаться недостаточно высокими. Такое сравнение механических свойств ПЛС-образцов со свойствами ЭИПС-образцов и литых образцов, а также взятых в качестве эталона горячекатаных образцов и является основной задачей настоящей работы.

Целью настоящей работы является исследование структуры и физико-механических свойств образцов сплава Inconel 718, полученных с помощью технологий индукционного плавления, горячей прокатки, электроимпульсного плазменного спекания и послойного лазерного сплавления. В работе приведены результаты экспериментальных исследований прочности, пластичности, мик-

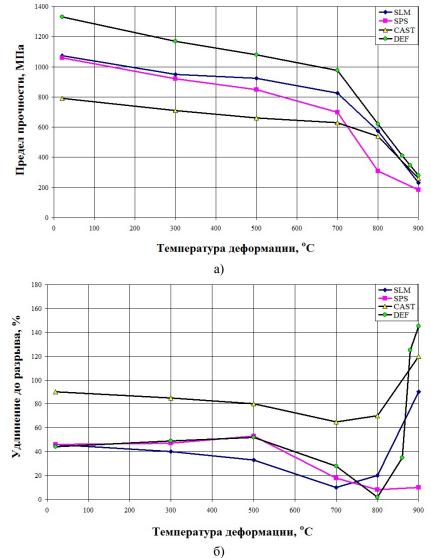


Рис. 1. Температурные зависимости предела прочности (а) и удлинения до разрыва (б) образцов сплава Inconel 718, полученных с использованием различных технологий

ротвердости и других свойств и дано подробное описание обнаруженных эффектов.

#### Объект исследования

Объектами исследований являются образцы сплава Inconel 718 (вес.%: Ni 49.8; Cr 19.9; Fe 19; Nb 5.3; Mo 4.1; Ti 1.0; Al 0.8), изготовленные в НИФТИ ННГУ с помощью различных технологий: индукционного плавления с использованием машины INDUTHERM VTC-200 (далее — образцы Cast), электроимпульсного плазменного спекания порошка на установке Spark Plasma Sintering SPS-625 (далее — образцы SPS), послойного лазерного сплавления из порошка на установке МТТ Realizer SLM 100 (далее — образцы SLM). Размер частиц порошка Inconel 718 не превышает 70 мкм, 75% частиц имеют сферическую форму и диаметр от 30 до 50 мкм. В качестве эталона для сравнения были

использованы образцы сплава Inconel 718, изготовленные из горячекатаного и состаренного (774°C, 8 часов) прутка диаметром 31.75 мм производства Outokumpu (далее – образцы Def).

# Методика исследования структуры и свойств

Исследования механических свойств образцов сплава Inconel 718 проводились на машине для механических испытаний Tinius Olsen H25KS в режиме растяжения с постоянной скоростью движения захватов с начальной истинной скоростью деформации  $3\times10^{-3}~{\rm c}^{-1}$  в воздушной среде в интервале температур деформации  $20-900^{\circ}$ C. В работе использовались миниатюрные плоские образцы в форме «двойной лопатки», длина рабочей части 3 мм, сечение  $2\times2~{\rm mm}^2$ . (В связи с малым размером рабочей части образцов величина удлинения до разрыва может

Таблица 1

### Результаты исследований микропластических свойств образцов сплава Inconel 718,

полученных с использованием различных технологий

Состояние сплава	Предел макроупругости,	Физический предел	
(технология)	МПа	текучести, МПа	
SLM	500	960	
SPS	320	600	
Def	580	1100	
Cast	170	470	

иметь завышенные значения по сравнению с величиной удлинения до разрыва, получаемой на стандартных «пяти- и десятикратных» образцах.) Исследования микропластических характеристик проводились в режиме сжатия при комнатной температуре на автоматизированном комплексе для релаксационных испытаний АСС-1. Исследования микротвердости проводились на микротвердомере Struers Duramin-5. Структурные исследования проводились с использованием оптического микроскопа Leica IM DRM и растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6490.

#### Экспериментальные результаты

На рисунке 1 приведены температурные зависимости предела прочности и удлинения до разрыва для образцов SLM, SPS, Cast и Def сплава Inconel 718. Зависимость предела прочности от температуры деформации для образцов всех исследуемых материалов носит двухстадийный характер: 20-700°C - монотонное уменьшение величины предела прочности на 15-25%; 700-900°C - резкое падение предела прочности на 50-70% до 200-300 МПа. Зависимость удлинения до разрыва от температуры деформации имеет более сложный характер. Для образцов SLM, SPS можно выделить общие характерные стадии на температурной зависимости удлинения до разрыва: 20-700°C - стадия снижения пластичности в 2-3 раза относительно соответствующих начальных значений; 700-900°C – стадия повышения пластичности (рост удлинения до разрыва до значений порядка 100%). Следует отметить, что для SPS-образцов удлинение до разрыва не имеет характерного повышения при температурах выше 800°C и на зависимости для Def-образцов можно выделить катастрофически низкую пластичность 2% при температуре 800°С.

Проведены микропластические исследования образцов сплава Inconel 718 в режиме «ступенчатого» сжатия до достижения физического предела текучести (таблица 1). Показано, что наибольшие значения предела макроупругости (580 МПа) и физического предела текучести

(1100 МПа) наблюдаются на Def-образцах. Наименьшие значения предела макроупругости и физического предела текучести наблюдаются на Cast-образцах и составляют 170 и 470 МПа, соответственно.

Проведены исследования влияния температуры отжига на микротвердость. Показано, что зависимости микротвердости от температуры предварительного отжига для образцов SLM, SPS и Cast сплава Inconel 718 имеют схожее поведение: в интервале температур отжига 20-600°C величина микротвердости практически не изменяется и составляет 3.1, 2.6 и 2.3 ГПа, соответственно; в интервале температур отжига 600-800°C величина микротвердости интенсивно увеличивается на 30% до 4.0, 3.7 и 3.6 ГПа, соответственно; в интервале температур отжига 800-1000°C происходит уменьшение микротвердости до значений 2.7, 2.5 и 2.3 ГПа, соответственно. Существенно иное поведение зависимости микротвердости от температуры отжига наблюдается для Def-образцов: в интервале температур отжига 20-700°C микротвердость практически не изменяется и составляет 4 ГПа в пределах погрешности измерения; в интервале температур отжига 700-1000°C микротвердость интенсивно убывает до 2.1 ГПа (рисунок 2).

На рисунке 3 приведены изображения структуры образцов сплава Inconel 718 в исходном состоянии (без термообработок). Показано, что средний размер зерна образцов SLM, SPS и Def составляет 15, 8 и 80 мкм, соответственно. Образцы Def-сплава имеют полиэдрическую структуру с большим количеством двойников (рисунок 3Г). Cast-образцы имеют дендритную структуру с характерным размером более 500 мкм (рисунок 3В).

#### Обсуждение результатов

В таблице 2 приведены сводные данные по результатам исследований структуры и физикомеханических свойств образцов сплава Inconel 718, полученных с использованием различных технологий. Как видно из таблицы, образцы, полученные с использованием порошковых технологий послойного лазерного сплавления и элек-

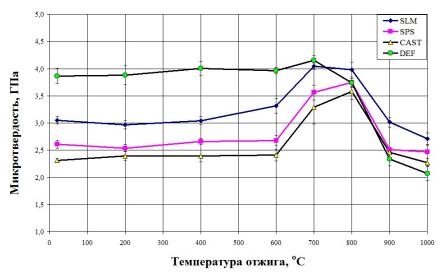


Рис. 2. Зависимость микротвердости от температуры предварительного отжига образцов сплава Inconel 718, полученных с использованием различных технологий

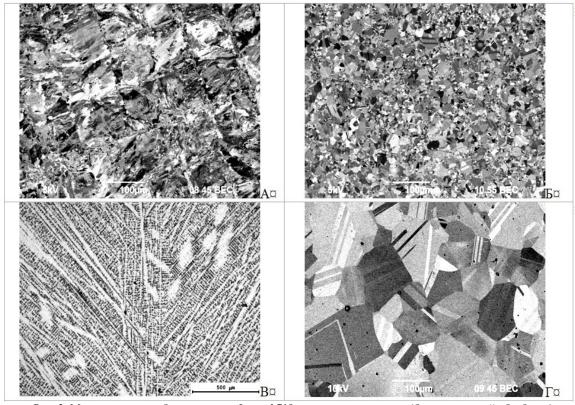


Рис. 3. Микроструктура образцов сплава Inconel 718 в исходном состоянии (без термической обработки) при различных увеличениях (оптическая металлография и PЭM): A - SLM; B - SPS; B - Cast,  $\Gamma - Def$ 

троимпульсного спекания, значительно превосходят по механическим характеристикам литые аналоги и лишь незначительно уступают образцам, полученным деформационными методами.

Сравнение материалов, полученных по технологиям ПЛС и индукционного литья, показывает принципиальное отличие этих материалов по структуре и свойствам. Это связано с тем, что плавление и кристаллизация в условиях ПЛС осуществляется принципиально в ином

режиме: быстрого нагрева и охлаждения, вследствие чего в ПЛС-материалах не формируется дендритная структура, обусловливающая низкие механические свойства литого материала. Таким образом, прочностные и микропластические характеристики ПЛС-материала на 40% и 100%, соответственно, превосходят свойства литых образцов.

Сравнение свойств ПЛС-материала с образцами, полученными по технологии ЭИПС, пока-

Т Физико-механические характеристики и структурные параметры сплава Inconel 718

Таблица 2

	Исходное состояние			
Характеристика	SLM	SPS	Cast	Def
Предел прочности ( $T_{\text{комн}}$ ), МПа	1075	1060	790	1330
Удлинение до разрыва ( $T_{\text{комн}}$ ), %	46	46	90	44
Предел прочности ( $T_{800^{\circ}\text{C}}$ ), МПа	580	310	540	620
Удлинение до разрыва $(T_{800^{\circ}\text{C}})$ , %	20	8	70	2
Предел макроупругости, $\sigma_0$ (сжатие), МПа	500	320	170	580
Предел текучести, $\sigma_{T}$ (сжатие), МПа	960	600	470	1090
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ (растяжение), МПа	720	500	400	1000
Микротвердость, ГПа	3.1	2.6	2.3	3.9
Размер зерна, мкм	15	8	500 (дендрит)	80

зывает неожиданный результат, требующий в дальнейшем подробного изучения: ПЛС-материал демонстрирует более высокие микропластические характеристики (предел макроупругости, физический предел текучести), чем ЭИПС-материал, несмотря на то, что ЭИПС-материал имеет заметно меньший размер зерна (8 мкм против 15 мкм).

#### Заключение

В работе приведены результаты сравнительных исследований образцов жаропрочного сплава Inconel 718, полученных с использованием различных технологий. Показано, что использование технологии послойного лазерного сплавления позволяет создавать готовое изделие с механическими свойствами, превосходящими свойства порошковых материалов, полученных методом электроимпульсного плазменного спекания, и близкими к свойствам материала после горячей прокатки.

Авторы признательны Ю.П. Вишня за плодотворное обсуждение результатов работы, выражают искреннюю благодарность В.Е. Кузину за проведение механических испытаний и К.В. Грешновой за сотрудничество и поддержку.

Работа частично поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

#### Список литературы

- 1. ASM Metals HandBook V. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International. 2002. 3470 p.
- 2. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов. М.: Металлургия, 1973. 324 с.
- 3. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Осинцев О.Е. и др. Машиностроение: Энциклопедия. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под общ. ред. И.Н. Фридляндера. 880 с.
- 4. Nieh T.G., Wadsworth J., Sherby O.D. Superplasticity in metals and ceramics. Cambridge Univ. Press, 1997. 251 p.
- 5. Xue H., Lijun W., Hui X. et al. // Journal of Materials Processing Technology. 2003. V. 137. I. 1–3. P. 17–20.
- 6. Smith G.D., Patel S.J. // Source of the Document Proceedings of the International Symposium on Superalloys and Various Derivatives. 2005. P. 135–154.
- 7. Hong J.K., Park J.H., Park N.K. et al. // Journal of Materials Processing Technology. 2008. V. 201. I. 1–3. P. 515–520.
- 8. Chang L., Sun W., Cui Y. et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2014. V. 590. P. 227–232.
- 9. Amato K.N., Gaytan S.M., Mur L.E. et al. // Acta Materialia. 2012. V. 60. I. 5. P. 2229–2239.
- 10. Qingbo Jia, Dongdong Gu // Journal of Alloys and Compounds. 2014. V. 585. P. 713–721.
- 11. Liu F., Lin X., Huang Ch. et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2011. V. 509. I. 13. P. 4505–4509.
- 12. Lambarrin J., Leunda J., Navas V.G. et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2013. V. 51, I. 7. P. 813–821.
- 13. Грязнов М.Ю., Шотин С.В., Чувильдеев В.Н. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 5(1). С. 43–50.

## PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF INCONEL 718 ALLOY OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY

M.Yu. Gryaznov, S.V. Shotin, V.N. Chuvildeev

The article presents the results of studies of the structure and physico-mechanical properties of the samples obtained from the Inconel 718 powder alloy by selective laser melting (SLM). The optimization of SLM regimes with subsequent heat treatment is shown to attain the ready-made product mechanical strength which is comparable to the strength of materials produced by traditional technologies (in particular, the technology of hot rolling).

Keywords: selective laser melting (SLM), high-temperature alloys, Inconel 718, strength, plasticity.

#### References

- 1. ASM Metals HandBook V. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International. 2002. 3470 p.
- 2. Rozenberg V.M. Osnovy zharoprochnosti metallicheskih materialov. M.: Metallurgiya, 1973. 324 s.
- 3. Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Osincev O.E. i dr. Mashinostroenie: Ehnciklopediya. M.: Mashinostroenie, 2001. T. II-3: Cvetnye metally i splavy. Kompozicionnye metallicheskie materialy / Pod obshch. red. I.N. Fridlyandera. 880 s.
- 4. Nieh T.G., Wadsworth J., Sherby O.D. Superplasticity in metals and ceramics. Cambridge Univ. Press, 1997. 251 p.
- 5. Xue H., Lijun W., Hui X. et al. // Journal of Materials Processing Technology. 2003. V. 137. I. 1–3. P. 17–20.
  - 6. Smith G.D., Patel S.J. // Source of the Document

- Proceedings of the International Symposium on Superalloys and Various Derivatives. 2005. P. 135–154.
- 7. Hong J.K., Park J.H., Park N.K. et al. // Journal of Materials Processing Technology. 2008. V. 201. I. 1–3. P. 515–520.
- 8. Chang L., Sun W., Cui Y. et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2014. V. 590. P. 227–232.
- 9. Amato K.N., Gaytan S.M., Mur L.E. et al. // Acta Materialia. 2012. V. 60. I. 5. P. 2229–2239.
- 10. Qingbo Jia, Dongdong Gu // Journal of Alloys and Compounds. 2014. V. 585. P. 713–721.
- 11. Liu F., Lin X., Huang Ch. et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2011. V. 509. I. 13. P. 4505–4509.
- 12. Lambarrin J., Leunda J., Navas V.G. et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2013. V. 51, I. 7. P. 813–821.
- 13. Gryaznov M.Yu., Shotin S.V., Chuvil'deev V.N. // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. 2012. № 5(1). S. 43–50.