

**THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE OF THE SLM  
OF THE INCONEL 718 ALLOY***Anastasia Andreevna Protatskaya <sup>a</sup>, Saida Railevna Sharipova*

Ufa State Aviation Technical University, K. Marx str. 12, Ufa, 450008, Russia

<sup>a</sup> a.protatskaya@yandex.ru

---

**ABSTRACT**

The current study investigates the effects of the selective laser melting (SLM) and homogenization (as a part of following solution heat treatment) on the structure and hardness of austenitic iron-nickel base Inconel 718 superalloy. The microstructure of the selective laser melted alloy 718 in an as-manufactured condition consists of "knitted pattern" layers typical for SLM. Moreover, there are long vertical dendrites, stretched towards build direction through multiple layers. The forming of that long dendrites is probably caused by the small build size, and combination of layers cooling rate and laser second moving speed in the current point. That leads to the crystallization of the layer below into the vertical dendrites. The homogenization of SLM Inconel 718 has led to some loss of microhardness caused by dissolving of hardening phases. After the homogenization the structure still include both "knitted pattern" layers and the vertical dendrites. To measure the fraction of the dendrites is difficult, according to low accuracy of their boundaries in the structure after the homogenization. Following investigations will include influence of the sample size on the structure and properties of the Inconel 718 superalloy.

**KEYWORDS**

Selective laser melting; microstructure; Inconel 718; heat treatment.

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ СЛС  
СПЛАВА ИНКОНЕЛЬ 718***Анастасия Андреевна Протацкая <sup>a</sup>, Саида Раилевна Шарипова*

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

<sup>a</sup> a.protatskaya@yandex.ru

---

**АННОТАЦИЯ**

Представлено исследование влияния селективного лазерного сплавления (СЛС) и гомогенизирующего отжига (как элемента последующей стандартной термической обработки) на структуру и твердость аустенитного никель-хромового жаропрочного сплава Инконель 718. Микроструктура сплава после построения в основном представляет собой типичные для СЛС слои

«вязаного узора», помимо которых наблюдаются проросшие перпендикулярно сквозь несколько слоев, вытянутые вдоль направления построения образцов дендриты. Происхождение таких вытянутых дендритов предположительно связано с небольшой площадью построения образцов, сочетанием определенной скорости охлаждения каждого слоя и скорости повторного прохождения лазера через данную точку, что создало условия для продолжения кристаллизации нижележащей ванны расплава в вертикальный дендрит. Использование гомогенизирующего отжига СЛС сплава Инконель 718 привело к незначительному снижению микротвердости, что может быть связано некоторым выравниванием химического состава сплава. После гомогенизации в структуре по-прежнему присутствуют как элементы связанного узора, так и просматриваются вертикальные дендриты. Дать статистическую оценку изменения доли дендритов оказалось затруднительно из-за недостаточной четкости их границ в структуре после гомогенизирующего отжига. Дальнейшие исследования будут связаны с определением влияния масштаба образцов на структуру и свойства сплава Инконель 718.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Селективное лазерное сплавление; микроструктура; Инконель 718; термообработка.

### Введение

На сегодняшний день перспективным является использование аддитивных технологий для производства высокотехнологичной продукции из сложнообрабатываемых материалов. Одним из способов реализации аддитивных технологий является селективное лазерное сплавление (СЛС). В технологии СЛС используется лазер высокой мощности для расплавления тонкого слоя порошка в соответствии с 3D-моделью [1–3]. В последнее время наблюдается значительный рост применения аддитивных технологий при производстве сложнопрофильных деталей из сложнообрабатываемых материалов. Полученные методом СЛС изделия обычно имеют характерную структуру «вязаного узора» [4, 5].

Технология подразумевает использование одного или нескольких лазеров (как правило, углекислотных) для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта. В качестве расходных материалов используются пластики, металлы, керамика или стекло. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой моде-

ли (т.н. «сканирования») с помощью одного или нескольких лазеров. По завершении сканирования рабочая платформа опускается, и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели [6–8].

Сфера применения 3D-печати методом СЛС, благодаря способности производить функциональные детали сложной геометрической формы, обширна: детали силовых установок, авиастроение, машиностроение, космонавтика [9].

### 1. Материал и методы исследования

Аустенитные дисперсионно-твердеющие стали и сплавы подвергают разным видам термической обработки (ТО): отжигу, закалке, отпуску (старению или дисперсионному твердению) и отпуску для снятия напряжений.

Для сплава Инконель 718 используется ТО в виде гомогенизации для растворения дисперсных выделений и фаз в матрице и трехэтапное старение для выделения  $\gamma''$ - и  $\gamma'$ -фаз различной формы и размера.

ТО образцов проводится в камерной печи по стандартному режиму для сплава Инконель 718 [10–12]:

– гомогенизирующий отжиг при температуре 980 °С в течение 1 часа и последующим охлаждением на воздухе;

– старение в три этапа:

1) выдержка при температуре 720 °С в течение 3-х часов;

2) охлаждение в печи до 620 °С в течение 2-х часов;

3) выдержка при температуре 620 °С в течение 3 часов.

Химический состав стандартного сплава Инконель 718 [13–18] и определенный по результатам РЭМ представлены в табл. 1.

## 2. Результаты исследования

Исследование микроструктуры подготовленных микрошлифов из сплава Инконель 718 показало присутствие проросших сквозь несколько слоев ванн расплава дендритов, вытянутых вдоль направления построения, и зерна типичного для СЛС «вязаного узора», т.е. закристаллизовавшиеся ванны расплава каждой порошинки, растекшиеся в плоскости, перпендикулярной направлению построения (рис. 1 и 3) [19, 20].

Таблица 1. Химический состав сплава Инконель 718

Table 1. Chemical composition of Inconel 718 alloy

| Инконель 718/<br>Inconel 718   | Массовая доля легирующих элементов, % /<br>Mass fraction of alloying elements, % |           |              |             |               |             |       |       |       |                           |      |       |
|--|--|-----------|--------------|-------------|---------------|-------------|-------|-------|-------|---------------------------|------|-------|
|  | Ni   | Cr        | Nb           | Mo          | Ti            | Al          | C     | Si    | Mn    | Fe                        | Co   | B     |
| По стандарту /<br>According<br>to the standard                       | 50–55  | 17–<br>21 | 4,75–<br>5,5 | 2,8–<br>3,3 | 0,65–<br>1,15 | 0,2–<br>0,8 | ≤0,08 | ≤0,35 | ≤0,35 | Осталь-<br>ное /<br>other | –    | –     |
| По результатам<br>РЭМ /<br>According<br>to the results<br>of the SEM | 51,66  | 18,43     | 4,75         | –           | 0,91          | 0,61        | –     | 0,013 | 0,14  | 17,97                     | 0,27 | 0,006 |

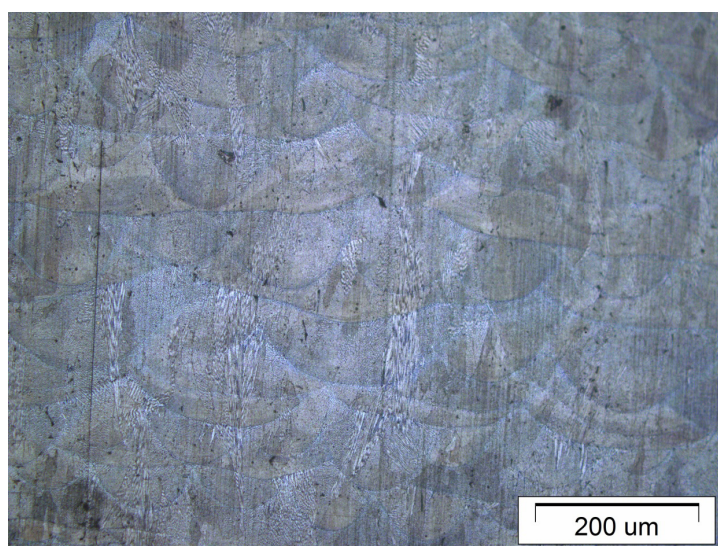


Рис. 1. Микроструктура вертикально выращенного образца Инконель 718

Fig. 1. Microstructure of vertically grown Inconel 718 sample

После проведения термической обработки границы ванн расплава видны хуже, чем до ТО. Зерна имеют то же направленное построение, появляются частицы фаз по границам вязаных зерен и внутри них.

После гомогенизирующего отжига у вертикально выращенного образца Инконель 718 наблюдается незначительное снижение микротвердости (рис. 2 и 4).

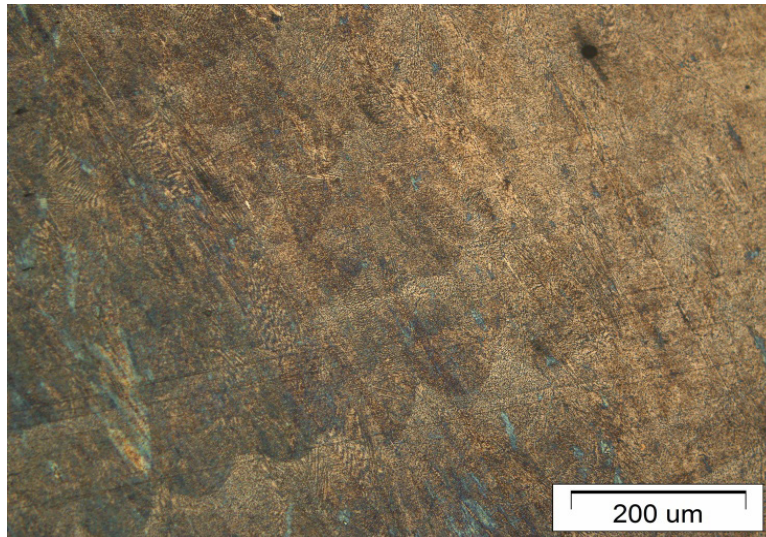


Рис. 2. Микроструктура вертикально выращенного образца Инконель 718 после термической обработки

Fig. 2. Microstructure of vertically grown Inconel 718 sample after heat treatment

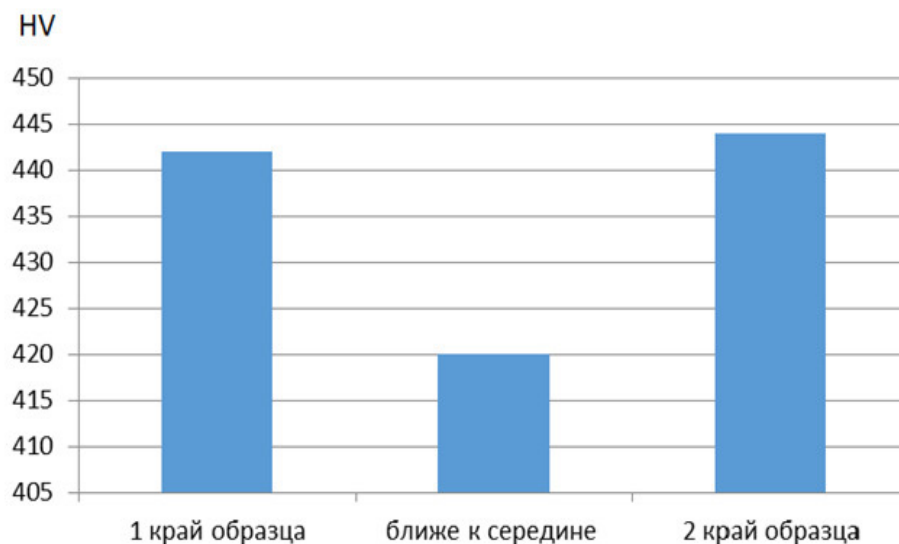


Рис. 3. Микротвердость вертикально выращенного образца до гомогенизирующего отжига

Fig. 3. Microhardness of vertically grown sample before homogenizing annealing

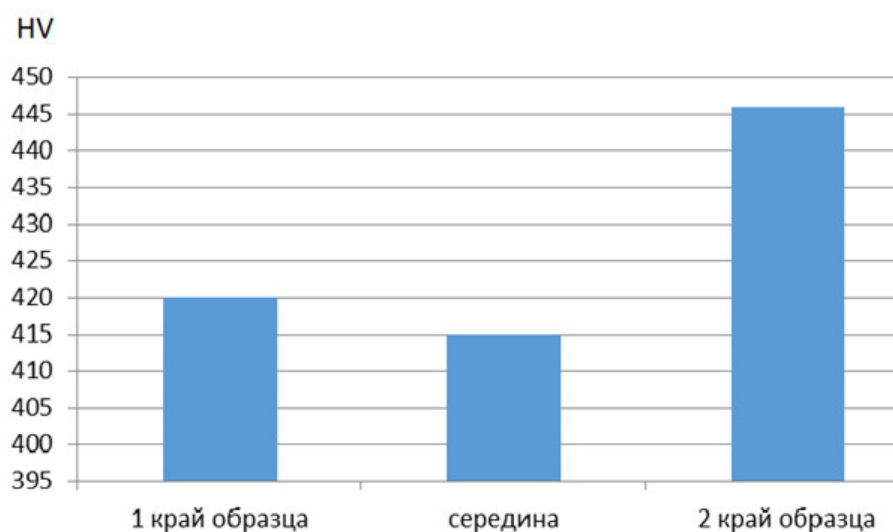


Рис. 4. Микротвердость вертикально выращенного образца после гомогенизирующего отжига

Fig. 4. Microhardness of vertically grown sample after homogenizing annealing

### Выводы

В структуре Инконеля 718, полученного методом СЛС, в основном присутствует типичный для СЛС технологии «вязанный узор», помимо которого имеются вытянутые вдоль направления построения дендриты. Структура «вязаных» зерен также имеет однородное дендритное строение. После проведения термической обработки границы ванн расплава видны хуже, чем до ТО. Зерна имеют то же направленное построение, появляются частицы фаз по границам вязаных зерен и внутри них.

Снижение микротвердости у вертикального выращенного образца Инконель 718 после гомогенизирующего отжига составило 5,5%, что, по-видимому, связано с растворением упрочняющих фаз.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков / А. Г. Евгений [и др.] // Труды ВИАМ. 2015. № 2. 12 с. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
2. Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной

геометрической формы / Б. Граф [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 3 (20). С. 34–42.

3. Гарибов Г. С. Металлургия гранул – основа создания новых материалов для перспективных авиадвигателей // Пермские авиационные двигатели. 2012. № 26. С. 58–63.

4. Шишковский И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: ООО «Питер», 2016. 400 с.: ил.

5. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Издательство политехнического университета СПб., 2013. 210 с.

6. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms / D. D. Gu et al. // International Materials Reviews. 2012. V. 57, Iss. 3. P. 133–164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.

7. Петров А. Аддитивные технологии: SLS – выборочное лазерное спекание. URL: <https://yandex.ru/turbo/heatreatment.ru/s/additivnye-tehnologii-sls-vyborochnoe-lazernoe-spekanie.html>.

8. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков / А. Г. Евгений [и др.] // Труды ВИАМ. 2015. № 2. 12 с. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.

9. Kurlas M. "A German specialist in selective laser melting is considering an IPO" // Industrial Laser Solutions Magazine. 2014.

10. Asm handbook. V. 4: Heat Treating. ASM International. Ohio: Materials Park, 1991. P. 950.
11. Sundararaman M., Mukhopadhyay P., Banerjee S. Precipitation of the  $\delta\text{Ni}_3\text{Nb}$  phase in two nickel base superalloys // Metallurgical transactions A. 1988. V. 19, No. 3. P. 453–465. DOI: 10.1007/BF02649259.
12. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Елютин Е. С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № S2. С. 38–52.
13. Бабенцова Л. П., Анциферова И. В. Механические свойства сплава In718 при статическом и циклическом деформировании // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 6. С. 14–19.
14. Машиностроение: Энциклопедия. Т. 2–3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / И. Н. Фридляндер [и др.]; под общ. ред. И. Н. Фридляндера. М.: Машиностроение, 2001. 880 с.
15. Nieh T. G., Wadsworth J., Sherby O. D. Superplasticity in metals and ceramics. Cambridge Univ. Press, 1997. P. 251.
16. Superplastic properties of Inconel 718 / H. Xue et al. // Journal of Materials Processing Technology. 2003. V. 137, Iss. 1–3. P. 17–20. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01055-5.
17. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996.
18. Железо и его сплавы. URL: <https://poznayka.org/s83319t1> (дата обращения 24.05.2021).
19. Розенберг В. М. Основы жаропрочности металлических материалов. М.: Metallurgia, 1973. 324 с.
20. Структура и свойства образцов из сплава Inconel 718 полученных по технологии селективного лазерного плавления / А. А. Педаш [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. 2017. № 8 (143). С. 46–54.