

**Ксения Олеговна Базалева<sup>1\*</sup>, Марк Владимирович Железный<sup>1</sup>, Александр Александрович Голубничий<sup>2</sup>, Юлия Юрьевна Понкратова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

<sup>2</sup>Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. ак. А. А. Бочвара, Москва, Россия

\*bazaleeva-ko@pfur.ru

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЛП

В данной работе рассмотрены условия формирования структуры сплавов в процессе селективного лазерного плавления (СЛП), а также на примере аустенитного сплава 03X17H14M3 (316 L) проанализированы структурные особенности материала после СЛП. Методами металлографического и рентгендифракционного анализов, с помощью растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеновского микроспектрального анализа показаны иерархичность строения сплава после СЛП, формируемая дислокационная структура, гетерогенность состава сплава, а также определены макронапряжения и кристаллографическая текстура.

*Ключевые слова:* селективное лазерное плавление, аустенитная сталь, фазово-структурного состояние, термическая стабильность, кристаллографическая текстура.

***Kseniya O. Bazaleeva, Mark V. Zheleznyi, Alexander A. Golubnichiy, Julia Yu. Ponkratova***

## STRUCTURE AND PROPERTIES FEATURES OF AUSTENITIC STEEL PRODUCED BY L-PBF METHOD

This paper examines the formation conditions for alloys structure in the process of laser powder-bed-fusion (L-PBF), and, using the example of austenitic alloy Fe-17%Cr-14%Ni-3%Mo-0.03%C (316 L), analyzes the structural features of a material after L-PBF. Using metallographic and X-ray structural analysis, scanning and transmission electron microscopy, and X-ray microspectral analysis, the hierarchical structure of the alloy after L-PBF, the formed dislocation structure, and the heterogeneity of the alloy composition were shown, and macrostresses and crystallographic texture were determined.

*Key words:* laser powder-bed-fusion, austenitic steel, phase-structural state, thermal stability, crystallographic texture.

Известно, что селективное лазерное плавление (СЛП) является перспективным методом получения сложнопрофильных деталей, а также изделий из сплавов низкой технологичности, особенно в условиях

мелкосерийного производства. При СЛП структура сплавов формируется в условиях последовательной сверхбыстрой лазерной перекристаллизации локальных участков порошкового материала. При лазерной перекристаллизации порошкового материала реализуются скорости охлаждения  $\sim 10^6 \div 10^7$  К/с, кроме того, при лазерном воздействии на соседние участки порошка уже перекристаллизованный материал подвергается термоциклированию. Данные условия формирования приводят к возникновению неравновесного строения материала. Для расширения области применения метода СЛП для синтеза деталей разного состава необходимо понимание особенностей формируемой структуры и ожидаемых ее изменений при последующих обработках. В данной работе выполнены исследования структуры аустенитного сплава 03X17H14M3 после СЛП и последующих отжигов [1-3].

Порошок аустенитной стали (Fe-17%Cr-12%Ni-2.3%Mo-1%Mn-0.7%Si-0.02%C) дисперсностью  $20 \div 50$  мкм подвергался СЛП на установке TRUMPF TruPrint1000. При этом были использованы следующие технологические параметры: мощность лазерного излучения 110 Вт, скорость сканирования лазера по поверхности 750 мм/с, расстояние между треками 50 мкм, шахматная стратегия плавления, часть образцов была выращена в защитной атмосфере азота, часть в аргоне.

Фазово-структурное состояние образцов исследовалось в исходном состоянии после СЛП, а также после отжигов, которые проводились в интервале температур от 100 до 1200 °С с выдержкой 1 ч. Микроструктура стали исследовалась после электролитического травления в 10 %-ной щавелевой кислоте методами металлографического анализа, растровой (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). На фольгах в ПЭМ микроспектральным рентгеновским методом анализировалось распределение легирующих элементов по структуре сплава. Рентгendifракционным методом был проведен фазовый и текстурный анализы, а также по дифракционному пику  $\gamma$  (331) определялся параметр кристаллической решетки аустенитного твердого раствора и уширение пика, которое является характеристикой дефектности фазы.

Проводилось измерение микротвердости сплава в зависимости от его температуры отжига.

На рис. 1 представлена микроструктура сплава после СЛП, полученная методами РЭМ и ПЭМ. В структуре сплава наблюдаются ванны расплава, разбитые на отдельные кристаллиты размером несколько десятков мкм, которые, в свою очередь, разделены на столбчатые ячейки кристаллизации диаметром около 0.5 мкм, одинаково ориентированные внутри каждого кристаллита (рис. 1, а). Границы ячеек кристаллизации, как видно из рис. 1, б, представляют собой объемные сплетения дислокаций.

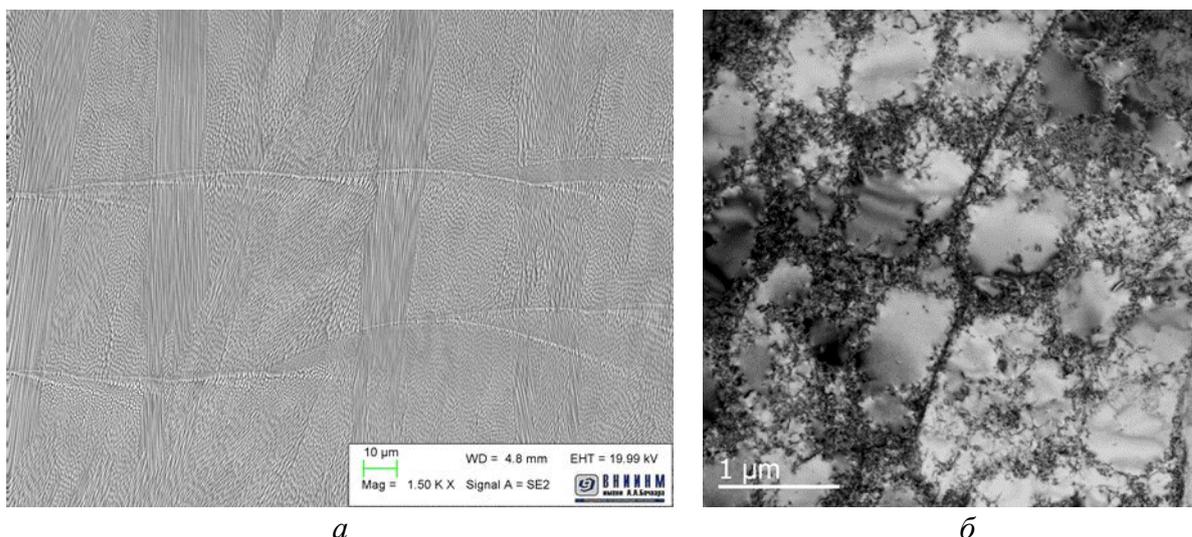


Рис. 1. Структура аустенитного сплава после СЛП: *а* – РЭМ; *б* – ПЭМ

Таким образом, после СЛП в аустенитном сплаве формируется дислокационная структура, подобная деформационной. Причиной формирования такой дислокационной структуры являются высокие термические напряжения, возникающие при лазерной перекристаллизации порошкового материала из-за высоких скоростей охлаждения. Оценка термических напряжений, проведенная рентгеновским методом « $\sin^2\Psi$ », показала, что напряжения после СЛП в аустенитном сплаве равны  $300 \div 350$  МПа, что соизмеримо с пределом текучести данного материала.

Методом рентгеновского микроспектрального анализа на фольгах было установлено, что Cr и Mo распределены неравномерно по структуре сплава: содержание Cr на границах ячеек кристаллизации составляет 17.6 мас.%, а в центре ячеек – 16.8 %; содержание Mo на границах ячеек 2.7 %, а в центре ячеек 2.0 %. Т.е. на границах ячеек кристаллизации формируются сегрегации атомов Cr и Mo, которые могут существенно закреплять сформированные при охлаждении дислокационные сплетения.

Установлено, что после СЛП при данных технологических параметрах в аустенитном сплаве формируется кристаллографическая текстура, причем она зависит от защитной атмосферы процесса: при печати в среде  $N_2$  плоскость сканирования лазера преимущественно совпадала с кристаллографической плоскостью аустенита типа  $\{100\}$ , а при печати в Ar – с плоскостью типа  $\{110\}$  (рис. 2). Предположительно, этот эффект связан с адсорбцией поверхностью металла атомов защитной атмосферы и в результате с изменением поверхностной энергии кристаллографических плоскостей.

Структурный анализ сплава после дополнительных отжигов показал, что структура, сформированная при СЛП, сохраняется до температуры отжига  $800^\circ\text{C}$  (рис. 3). При дальнейшем повышении температуры

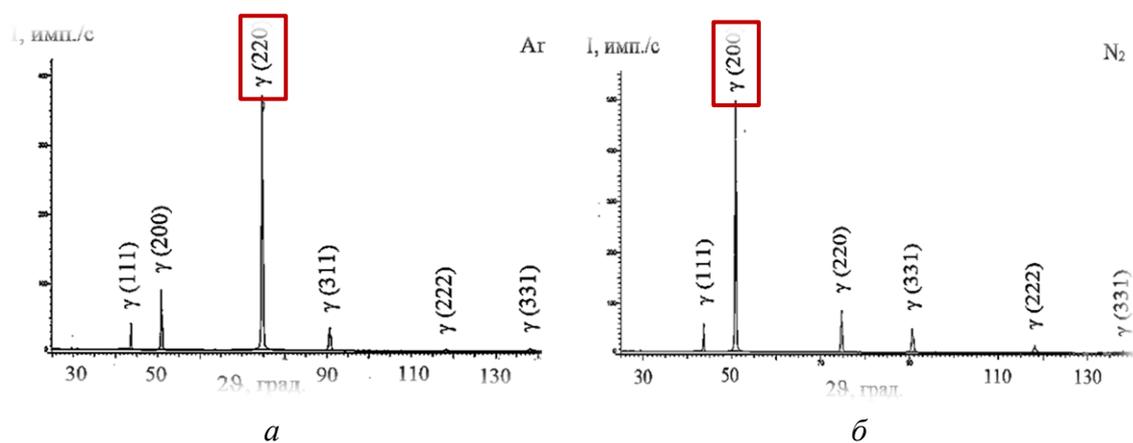


Рис. 2. Текстура в аустенитном сплаве после СЛП в защитной атмосфере:  
*a* – N<sub>2</sub>; *б* – Ar

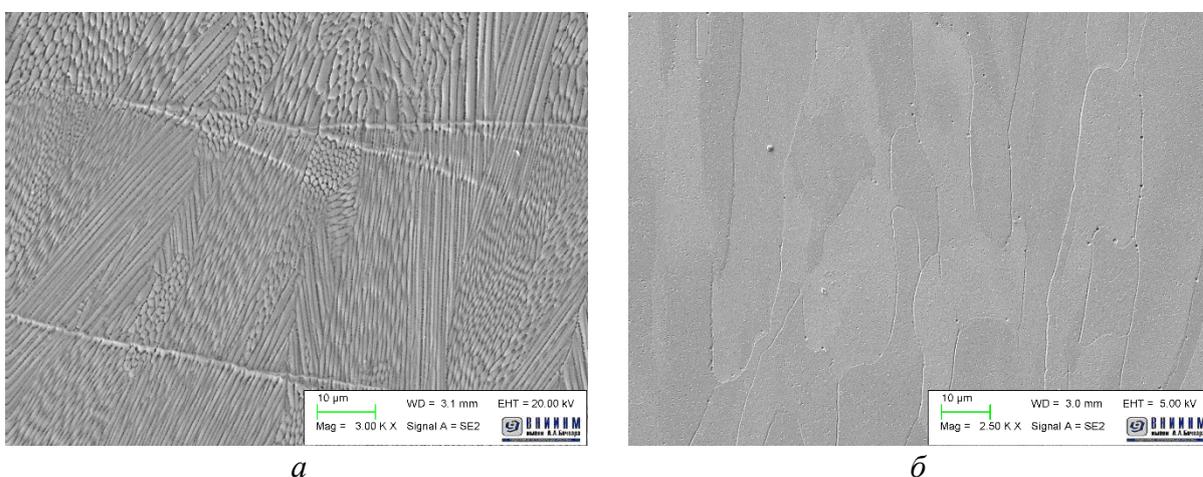


Рис. 3. Структура аустенитного сплава, полученного методом СЛП, после дополнительного отжига при температуре: *a* – 800°C; *б* – 1000 °C

сегрегации легирующих элементов на границах ячеек кристаллизации растворяются, после чего начинается перестройка дислокационной структуры, ячейки исчезают, но границы кристаллитов сохраняются в структуре сплава.

При измерении микротвердости аустенитного сплава установлено, что после СЛП твердость в 1,5 раза выше, чем после стандартной обработки сплава – аустенитизации при 1150 °C и закалки в воду. Последующие отжиги при температурах до 800 °C не приводят к снижению твердости сплава, полученного СЛП, дальнейшее повышение температуры отжига сопровождается плавным падением твердости.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Базалева К. О. Ячеистая структура в аустенитных сплавах, полученных методом селективного лазерного плавления / К. О. Базалева [и др.] // Перспективные материалы. 2014. № 3. С. 55–62.
2. Базалева К. О. Термическая стабильность ячеистой структуры аустенитного сплава, формируемой при селективном лазерном плавлении / К.О. Базалева [и др.] // Металлы. 2016. №3. С.31–39.
3. Базалева К. О. Механическое и электрохимическое поведение аустенитного сплава, синтезированного методом селективного лазерного плавления / К. О. Базалева [и др.] // Материаловедение. 2020. №11. С.31–37.

## REFERENCES

1. Bazaleeva K. O. Cellular structure in austenitic alloys prepared by selective laser melting / K. O. Bazaleeva [et. al] // Perspekt. Mater. (in Russian) 2014. №3. P. 55-62.
2. Bazaleeva K. O. Thermal stability of the cellular structure of an austenitic alloy after selective laser melting / K. O. Bazaleeva [et. al] // Russ. Metall. 2016. №5. P. 424-430.
3. Bazaleeva K. O. Mechanical and Electrochemical Behavior of Austenite Alloy Synthesized by Selective Laser Melting Method / K. O. Bazaleeva // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. №11. P. 31-37.