

## Влияние пористости в образцах из аустенитной стали, полученных лазерной 3D печатью, на процесс деформационного динамического старения

Н. Казанцева<sup>1,3,\*</sup>, И. Ежов<sup>1</sup>, Ю. Коэмец<sup>1,2</sup>, Д. Давыдов<sup>1,3</sup>, С. Афанасьев<sup>1</sup>, М. Карабаналов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева, Екатеринбург, Россия.

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

\*kazantseva@imp.uran.ru

**Аннотация.** Проведено исследование структуры и процесса деформации пористых образцов из стали 31 L, полученных с помощью селективного лазерного сплавления. Плотность полученных образцов составила 92%. В исходных образцах были обнаружены поры размерами от 50 мкм до 150 мкм. Установлено протекание процесса деформационного динамического старения в исследованных пористых образцах, который проявляется в повышении пластичности с увеличением скорости деформации. Показано, что исходная пористость аустенитных образцов, полученных с помощью селективного лазерного сплавления, влияет на характер их разрушения.

**Ключевые слова:** аддитивная лазерная печать, 316L, динамическое деформационное старение, разрушение.

### 1. Введение

Качество изделий при аддитивном процессе зависит как от режима работы 3D принтера, так и от качества исходного порошка [1]. Отход от оптимального режима печати приводит к возникновению в материале изделия, полученном методом селективного лазерного сплавления (СЛС), характерных дефектов, таких как нерасплавленные частицы порошка и крупные технологические поры, острые края которых служат источником локальных напряжений и снижают механические свойства СЛС изделия [2, 3]. Кроме технологических пор в СЛС изделиях также могут образовываться газовые поры. Эти дефекты имеют небольшой размер и сферическую форму и, в целом при их небольшом количестве, не принимают участие в процессе деформации [1–3].

В условиях высоких температур или скоростей деформации в материале могут протекать неравновесные процессы, связанные с его упрочнением или размягчением. Основным процессом упрочнения металлических материалов считается повышение плотности дислокаций в структуре [4]. При отсутствии фазовых переходов, разупрочнение сплавов происходит за счет динамического возврата, полигонизации или рекристаллизации [4]. В определенном температурно-скоростном интервале при деформации материала может происходить динамическое деформационное старение (ДДС). ДДС эффект связывают с подвижностью дислокаций, обусловленной повышением внешних напряжений в определенном температурно – скоростном диапазоне деформаций [4]. Увеличение скорости деформации обычно снижает механические свойства материалов. Однако, в некоторых случаях, ДДС эффект также наблюдают в обычных титановых сплавах и сталях [5].

Основная цель данной работы: исследование процесса динамического деформационного старения в пористых образцах из аустенитной стали 316L, полученных селективным лазерным сплавлением.

### 2. Материалы и методы исследования

Пористые образцы из аустенитной стали 316L были получены с помощью лазерного принтера Renishaw AM 400 (Renishaw Inc., Wotton-under-Edge, UK) с 400 W лазером. Для печати был использован сферический порошок ASTM F3184 (316L сталь). Химический состав порошка приведен в Таблице 1.

**Таблица 1.** Химический состав стального порошка 316L ASTM A240/A240M, масс.%

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	N
Осн.	≤ 0.03	≤ 0.75	≤ 2	10–14	≤ 0.03	≤ 0.045	16–18	2–3	≤ 0.1

Горизонтальные цилиндрические образцы были напечатаны в атмосфере аргона с использованием шахматной стратегии лазерного сканирования [6]. Измеренная плотность методом Архимеда составила 92%. Перед механическими испытаниями поверхность образцов была отполирована. Механические испытания были проведены с помощью испытательной машины Instron растяжением при комнатной температуре с различными скоростями:  $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ,  $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Исследовали 9 образцов, по три образца при каждой скорости деформации. Размеры образцов для испытаний были выбраны согласно требованиям ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84).

### 3. Результаты и Обсуждение

Механические испытания показали, что в исследованных СЛС образцах с увеличением скорости деформации происходит одновременное повышение как прочности, так и пластичности (Таблица 2). Прочностные характеристики полученных СЛС образцов находятся в диапазоне стандартных величин для обычных аустенитных сталей [7]. Однако пластичность полученных пористых СЛС образцов оказалась значительно ниже. Похожую низкую пластичность наблюдали в обычной аустенитной стали 316L с размером зерна  $\sim 30 \text{ нм}$  в работе [8]. В нашем случае снижение пластичности связано с пористостью образцов.

**Таблица 2.** Механические свойства СЛС образцов стали 316L после деформации с различными скоростями.

Скорость деформации, $\text{с}^{-1}$	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
$3 \cdot 10^{-4}$	520	530	1.7
$1 \cdot 10^{-3}$	530	550	5.0
$8 \cdot 10^{-3}$	560	590	5.4

На Рис. 1–3 приведены результаты фрактографического анализа зоны разрушения исследованных СЛС образцов, а также электронно-микроскопические снимки пористой поверхности в зоне разрушения. Разрушение происходит вдоль технологических пор. Острые края которых служат концентраторами напряжений. Характер разрушения образцов меняется в зависимости от скорости нагружения. При деформации со скоростью  $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  наблюдается смешанное хрупко-вязкое разрушение (Рис. 1). Вязкая составляющая также присутствует в характере разрушения образцов при всех остальных скоростях нагружения (Рис. 2–3).

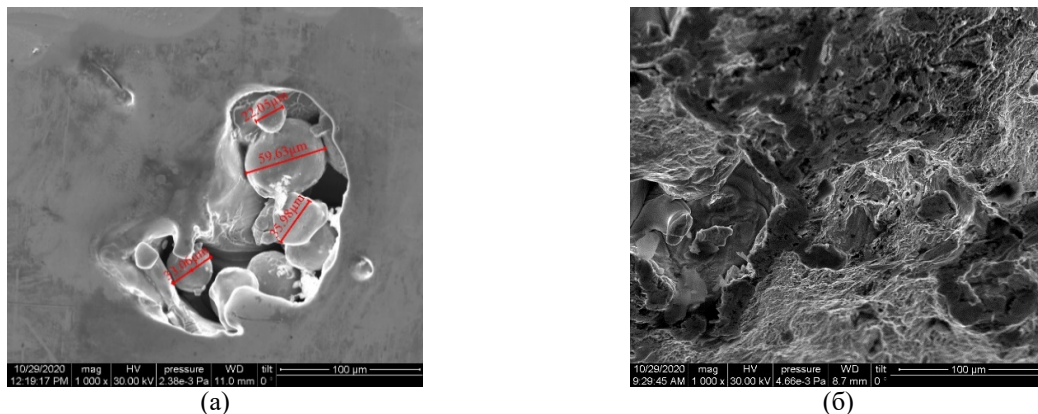


Рис. 1. Микроструктура образца после деформации со скоростью  $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , СЭМ: (а) – поры; (б) – зона разрушения.

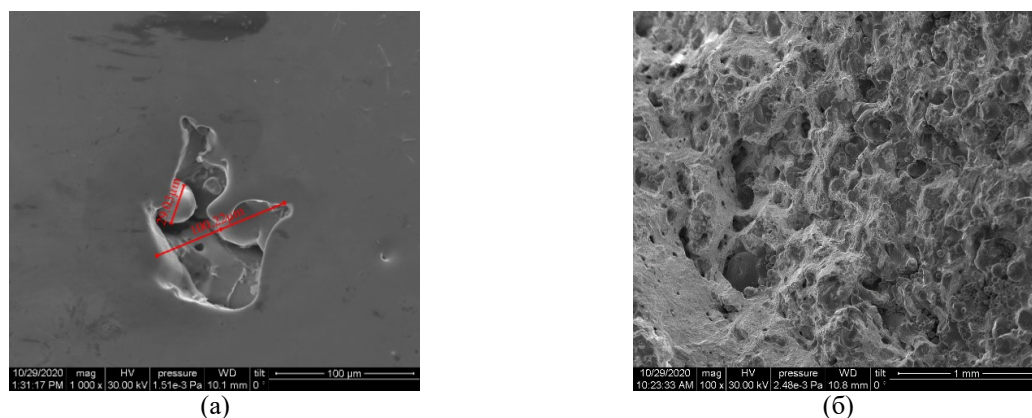


Рис. 2. Микроструктура образца после деформации со скоростью  $1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ , СЭМ: (а) – поры; (б) – зона разрушения.

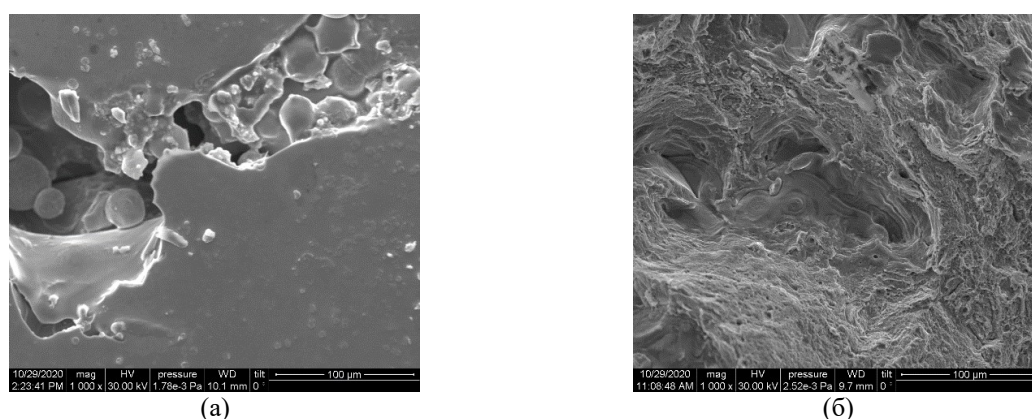


Рис. 3. Микроструктура образца после деформации со скоростью  $8 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ , СЭМ: (а) – поры; (б) – зона разрушения.

#### 4. Заключение

Проведенное исследование показало, что в СЛС образцах аустенитной стали 316L с плотностью 92% образуются поры размерами от 50 до 150 мкм. При механических испытаниях на растяжение при комнатной температуре обнаружена скоростная зависимость механических свойств исследованных СЛС образцов, связанная с эффектом динамического деформационного старения. Исходная пористость СЛС образцов оказывает влияние на пластические свойства материала, при этом прочность остается высокой. Технологические поры участвуют в процессе разрушения и влияют на характер разрушения. Вязкое разрушение обнаружено вдоль пор в СЛС образцах аустенитной стали 316L, что является аномальным для аналогов, полученных традиционными методами.

#### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке программы "Аддитивность" 121102900049-1 института физики металлов УрО РАН.

#### 5. Список литературы

- [1] I. Yadroitsev, P. Bertrand, and I. Smurov, Parametric analysis of the selective laser melting process, *Appl. Surf. Sci.*, vol. **253**(19), 8064, 2007; doi: 10.1016/j.apsusc.2007.02.088
- [2] Z. Sun, X. Tan, S.B. Tor, and W.Y. Yeong, Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates, *Materials & Design*, vol. **104**, 197, 2016; doi: 10.1016/j.matdes.2016.05.035

- [3] N. Kazantseva, Main factors affecting the structure and properties of titanium and cobalt alloys manufactured by the 3D printing, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. **1115**, 042008, 2018; doi: 10.1088/1742-6596/1115/4/042008
- [4] Zh.P. Pastukhova, A.G. Rakhshadt, and Yu.A. Kaplun, *Dynamic aging of alloys*, Moscow: Metallurgy, 1985.
- [5] P. Bajaj, A. Hariharan, A. Kini, P. Kürnsteiner, D. Raabe, and E.A. Jägle, Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. **772**, 138633, 2020; doi: 10.1016/j.msea.2019.138633
- [6] H. Jia, H. Sun, H. Wang, and Y. Wu, Scanning strategy in selective laser melting (SLM): A review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. **113**, 23, 2021; doi: 10.1007/s00170-021-06810-3
- [7] C. Qiu, M. Al Kindi, A.S. Aladawi, and I. Al Hatmi, A comprehensive study on microstructure and tensile behaviour of a selectively laser melted stainless steel, *Sci. Rep.*, vol. **8**, 7785, 2018; doi: 10.1038/s41598-018-26136-7
- [8] M. El-Tahawy, P. Jenei, T. Kolonits, et al., Different Evolutions of the Microstructure, Texture, and Mechanical Performance During Tension and Compression of 316L Stainless Steel, *Metall. Mater. Trans. A*, vol. **51**, 3447, 2020; doi: 10.1007/s11661-020-05782-5