

Научная статья

УДК 669.24'71:548.4:539.374

Исследование скоростной зависимости механических свойств  
при испытаниях на сжатие пористых образцов из 316L стали,  
полученных методом лазерной 3D-печати

**Юлия Николаевна Коэмец<sup>1</sup>, Наталия Васильевна Казанцева<sup>2</sup>,  
Сергей Викторович Афанасьев<sup>3</sup>, Игорь Вячеславович Ежов<sup>4</sup>,  
Денис Игоревич Давыдов<sup>5</sup>, Ольга Аркадьевна Коэмец<sup>6</sup>,  
Денис Александрович Шишкин<sup>7</sup>,  
Анастасия Андреевна Котельникова<sup>8</sup>**

<sup>1,2,3,4,5,7</sup> Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2,4</sup> Уральский государственный университет путей сообщения,  
Екатеринбург, Россия

<sup>6,7,8</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента  
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> y.koemets@imp.uran.ru

**Аннотация.** В статье исследована зависимость механических свойств от скорости деформации при испытаниях на сжатие пористых образцов из нержавеющей стали 316L, полученных с помощью лазерного 3D-принтера. Проведен анализ структуры, фазового состава и дефектности деформированных образцов.

**Ключевые слова:** 3D-печать, сталь 316L, зависимость механических свойств от скорости деформации, пористость

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-29-01514.

Original article

## Study of Rate Dependence of Mechanical Properties in Compression Tests of Porous 316L Steel Samples Manufactured by Laser 3D-printing

**Yulia N. Koemets<sup>1</sup>, Nataliya V. Kazanzeva<sup>2</sup>, Sergey V. Afanasev<sup>3</sup>,  
Igor V. Ezhov<sup>4</sup>, Denis I. Davydov<sup>5</sup>, Olga A. Koemets<sup>6</sup>, Denus A. Shishkin<sup>7</sup>,  
Anastasiia A. Kotelnikova<sup>8</sup>**

<sup>1,2,3,4,5,7</sup> M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

<sup>2,4</sup> Ural State Transport University, Ekaterinburg, Russia

<sup>6,7,8</sup> Ural Federal University named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> y.koemets@imp.uran.ru

**Abstract.** The dependence of the mechanical properties on the strain rate during compression tests of porous stainless steel 316L samples, manufacturing with a 3D-laser printer, has been investigated. The analysis of the structure, phase composition, and defectiveness of deformed samples is carried out.

**Keywords:** 3D-printing, steel 316L, dependence of mechanical properties on strain rate, porosity

**Funding.** The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation project No. 22-29-01514.

**А**ддитивные технологии активно внедряют во многие отрасли производства. С помощью этих технологий можно изготавливать деталь сложной геометрической формы, заданной САД-моделью, из металлического порошка путем послойного построения в камере 3D-принтера, что позволяет печатать изделия с нужными эксплуатационными характеристиками и снижать его стоимость [1]. Качество таких изделий зависит от параметров процесса печати. При нарушении оптимального режима в готовом изделии возникают такие характерные дефекты, как поры или межслоевые дефекты. Хотя пористость обычно рассматривается как критический дефект, отрицательно влияющий на механические характеристики, в каких-то областях, на-

.....

пример, в медицине некоторая степень пористости металлического изделия необходима для процессов успешной регенерации костной ткани.

При традиционном производстве изделий из аустенитной стали широко применяют холодную пластическую деформацию, улучшая физические и механические свойства материала. При определенных условиях (криогенной температуре или высокой степени деформации ~ 30 %) в аустенитной стабильной стали типа 316L может происходить фазовый переход  $\gamma$ -Fe аустенита (ГЦК) в  $\alpha'$ -Fe мартенсит (ОЦК) [2]. Появление мартенсита деформации  $\alpha'$ -фазы приводит к снижению коррозионных свойств и охрупчиванию детали.

В проведенном нами ранее исследовании было обнаружено, что процесс пластической деформации при испытаниях на растяжение пористых образцов стали 316L, полученных лазерной 3D-печатью, протекает аномально [3].

В настоящем докладе представлены результаты анализа скоростной зависимости пластической деформации при испытании на сжатие пористых образцов из стали 316L (русский аналог 03X17H14M3), полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС).

Пористые образцы были получены за счет снижения мощности лазера от величины, рекомендуемой производителем, в лазерном 3D-принтере Renishaw AM 400. Деформация образцов сжатием была выполнена при комнатной температуре до 30 % с разными скоростями: 0,6 мм/мин, 2 мм/мин, 8 мм/мин, 15 мм/мин.

В структуре полученных СЛС образцов стали до деформации наблюдали два типа пор: технологические, которые имели острые края, большой размер и были заполнены нерасплавленным порошком, и газовые поры круглой формы и маленького размера. Размер пор варьировался от 50 мкм до 200 мкм. По данным рентгеноструктурного анализа СЛС-образцы находились в аустенитном состоянии.

При исследовании деформированных образцов было обнаружено, что присутствие большого количества пор влияет на характер деформации пористого СЛС-образца. Деформация происходит неравномерно, технологические поры закрываются, при этом границы пор становятся практически не различимы (см. рис. ниже). Релаксационные процессы при деформации происходят за счет того, что нерасплавленные порошинки внутри пор взаимодействуют с внутренними поверхностями поры. С увеличением скорости деформации увеличи-

вается как пластичность, так и прочность СЛС-образцов, в структуре наблюдается процесс развития двойников деформации.

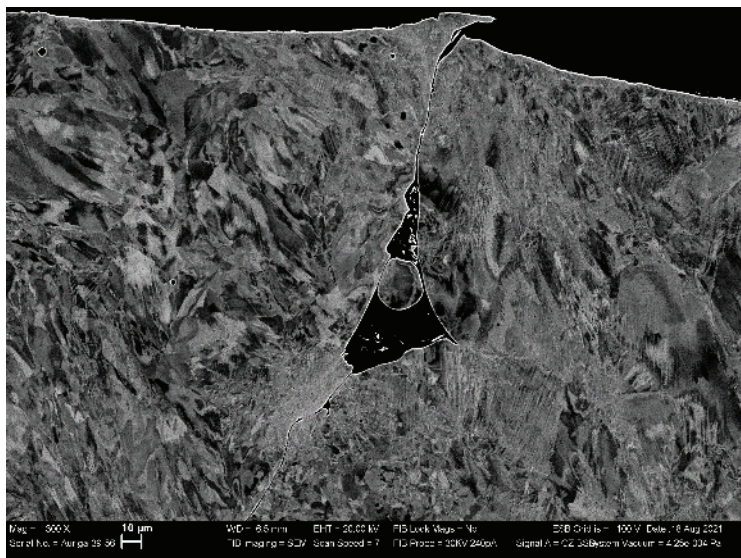


Рис. Микроструктура деформированного образца 316L

Согласно литературным данным, мартенсит деформации может формироваться в местах пресечения двойников [2]. Однако в нашем случае рентгеноструктурный анализ деформированных пористых СЛС-образцов не обнаружил присутствия  $\alpha'$ -мартенсита.

#### Список источников

1. Шишковский И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. 424 с.
2. Сагарадзе В. В., Уваров А. И. Упрочнение и свойства аустенитных сталей. Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2013. 720 с.
3. Micromechanisms of Deformation and Fracture in Porous L-PBF 316L Stainless Steel at Different Strain Rates / N. Kazantseva [et al.] // Metals. 2021. Vol. 11.

### References

1. Shishkovsky I. V. Laser synthesis of functionnal-gradient mesostructures and volumetric products. М. : FIZMATLIT, 2009. 424 p.
2. Sagaradze V. V., Uvarov A. I. Hardening and properties of austenitic steels. Ekaterinburg : RIO UB RAS, 2013. 720 p.
3. Micromechanisms of Deformation and Fracture in Porous L-PBF 316L Stainless Steel at Different Strain Rates / N. Kazantseva [et al.] // Metals. 2021. Vol. 11.