

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

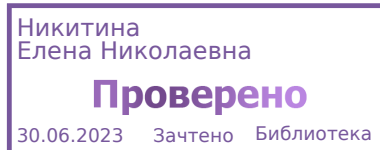
Макаренко Сергей Валерьевич

Исследование усталостной долговечности
материалов, полученных методом послойного
наращивания

Направление подготовки
15.04.03 - Прикладная механика

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2023



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

кандидат технических наук,
доцент кафедры МТНМ

Бурдасова Александра

Александровна

Рецензент

кандидат технических наук,
Жилин Сергей Геннадьевич

Защита состоится «28» июня 2023 года в 09 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 202/2.

Автореферат разослан ____ июня 2023 г.

Секретарь ГЭК



Бурдасова Александра Александровна

Целью и задачи исследования

Целью работы является исследование кинетики усталостных испытаний и исследование усталостной долговечности материалов, полученных методом послойного наращивания. Изучение особенностей деформационного разрушения аустенитной нержавеющей стали.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные задачи исследования:

- 1) провести экспериментальные исследования накопления усталостных повреждений аустенитной нержавеющей стали, полученную методом послойного получения материала;
- 2) провести патентный поиск методов селективного лазерного спекания;
- 3) построить обобщенную диаграмму усталости аустенитной нержавеющей стали, основанную на серии опытов усталостных испытаний;
- 4) провести исследование изломов, основанную на серии фрактографических опытов.

Объект и предмет исследования. исследование является процесс прогнозирования технического состояния объектов.

Метод исследования. основаны на современных понятиях о накоплении повреждений в материалах и прогнозировании его предельных характеристик. Обработка результатов проводилась с помощью амплитудного, интегрального, локально-динамического, интегрально-динамического критериев. Анализ и оценка остаточного ресурса проводилась при помощи вероятностных методов расчета ресурса, параметрических методов оценки текущего состояния и остаточного ресурса металлоконструкций на основе метода неразрушающего контроля, метода оценки ресурса с использованием диффузионного распределения.

Новизна полученных результатов:

Разработан алгоритм исследования усталостной долговечности материалов, полученных методом послойного наращивания.

Достоверность и обоснованность результатов исследования.

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых, взаимодополняющих методов исследования, большим объемом непротиворечивых экспериментальных данных, согласованность с данными теоретических исследований.

Практическая значимость и ценность работы.

Представлены алгоритм и методика определения остаточного ресурса объектов из конструкционных материалов по регистрируемым параметрам акустической эмиссии.

Личный вклад автора.

заключается в анализе различных методологических подходов определения остаточного ресурса конструкционных материалов по регистрируемым параметрам АЭ, а также в систематизации информации о влиянии структурных и внешних факторов на АЭ излучение в процессе деформации и разрушения.

Основные положения, выносимые на защиту:

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты работы:

- алгоритм определения остаточного ресурса по регистрируемым параметрам АЭ;
- закономерность между параметрами АЭ и остаточным ресурсом объекта.

Структура и объём магистерской диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх разделов, заключения и списка использованных источников. Общий объём работы составляет 60 страниц, включая 28 рисунков, 3 таблиц, список используемых источников, состоящий из 46 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснования актуальности темы диссертационной работы, изложены основные направления проведённых исследований, сформулированы цель и задачи исследований.

В первом разделе представлен обзор литературных данных, посвящённый развитию накопления усталостных повреждений.

Во втором разделе диссертационной работы описана методика проведения усталостных испытаний.

В третьем разделе описаны:

- влияние УМЗ структуры на усталостную прочность аустенитных нержавеющей сталей;
- результаты опытов проведения усталостных испытаний;
- анализ структуры и механических свойств деформированных образцов;

Усталостная прочность является одним из ключевых свойств, касающихся практического использования ультрамелкозернистых сталей. Эти две области являются одними из самых требовательных к созданию микроструктур, среди свойств которых усталостная прочность вызывает повышенный интерес. Усталостная прочность металлических биоматериалов была хорошо изучена и описана в работах.

Мы определили характер развития трещины, а именно красным выделено начало трещины, структура которой расходится веером. Очаг разрушения находится внизу самого излома. На данном фото (рисунок 1) показана структура излома при увеличении $\times 45$.

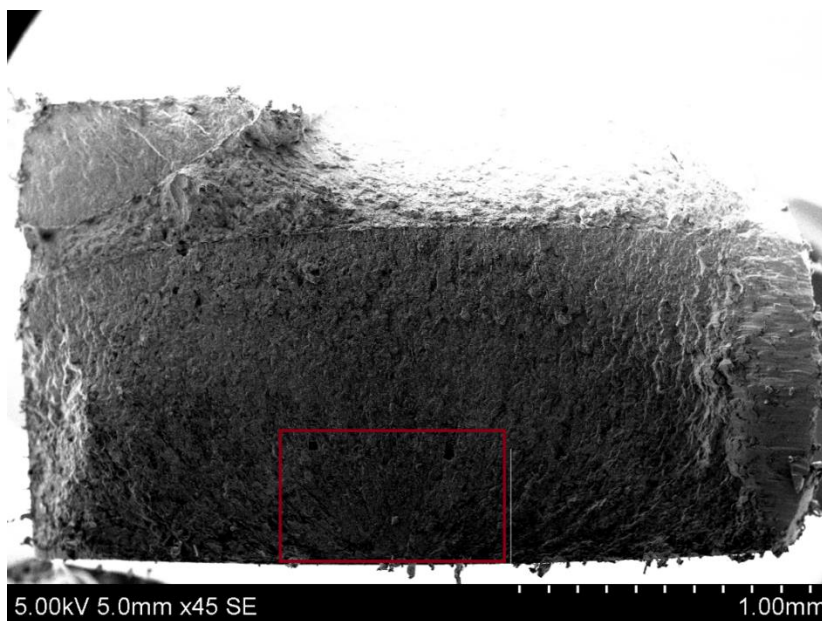


Рисунок 1 – Изображение излома аустенитной нержавеющей стали марки 03X16H15M3 при (x45)

На данном фото (рисунок 2) показана структура излома при увеличении x500, проявляется характер движения трещины. Наблюдается неоднородность структуры.

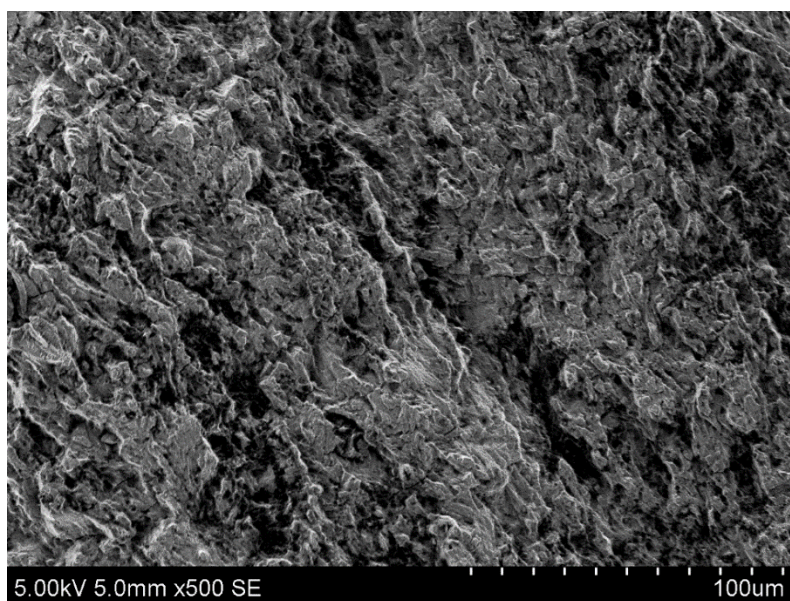


Рисунок 2 – Изображение излома аустенитной нержавеющей стали марки 03X16H15M3 при (x500)

На данном фото (рисунок 3) показана структура излома при увеличении x3000, основная трещина росла по границам зёрен, поскольку

вокруг зерён находятся трещинки. Наблюдается неоднородность структуры. Сама трещина расходится, так как движение направления разное.

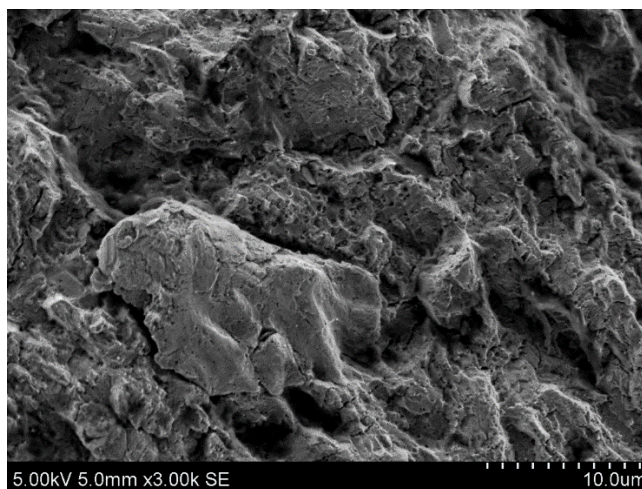


Рисунок 3 – Изображение излома аустенитной нержавеющей стали марки 03X16H15M3 при (x3000)

На данном фото (рисунок 4) показана структура излома при увеличении x10000, основная трещина росла по границам зёрен. По самому зерну трещина разрастается, это заключается в том, что появляются усталостные бороздки. Не всегда они бороздки проявляются в процессе усталостных испытаний. На основе этого мы можем поределить шаг развития трещины. При увеличении в x10000 отчётливо заметен характер трещины.

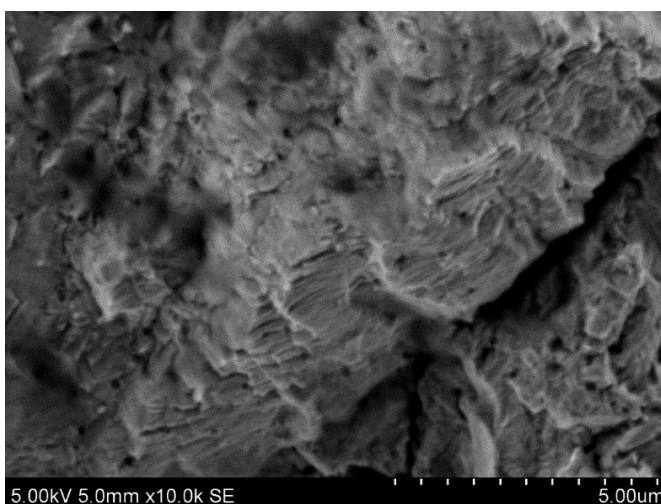


Рисунок 4 – Изображение излома аустенитной нержавеющей стали марки 03X16H15M3 при (x10000)

Рисунок 5 и таблица 3.2 показывает результаты механических испытаний исследованных образцов LPBF. Как видно, с увеличением скорости деформации происходит одновременное увеличение как прочности, так и пластичности образцов. Образец из нержавеющей стали LPBF 316L в готовых условиях обычно демонстрирует более высокие прочностные характеристики, чем у обычной стали. Прочностные характеристики аустенитных нержавеющих сталей АМ варьируются в диапазоне 300-600 МПа и 350-760 МПа для σ_S и σ_{TS} соответственно [17,18]. Как было показано в [19] высокая прочность и пластичность могут быть получены в образцах LPBF 316L за счет усиления эффекта пластичности, вызванного сдвоением, который возникает из-за образования двойников и дислокационных структур. Присутствие фазы мартенсита также может приводить к высокому пределу текучести (пластичность, вызванная переходом, эффект ТРИП) [20]. В обычной стали 316L образование α' -фаза мартенсита наблюдалась при скорости деформации $10-3 \text{ с}^{-1}$ при растяжении при истинной деформации 50% [20] и при холодной прокатке [21].

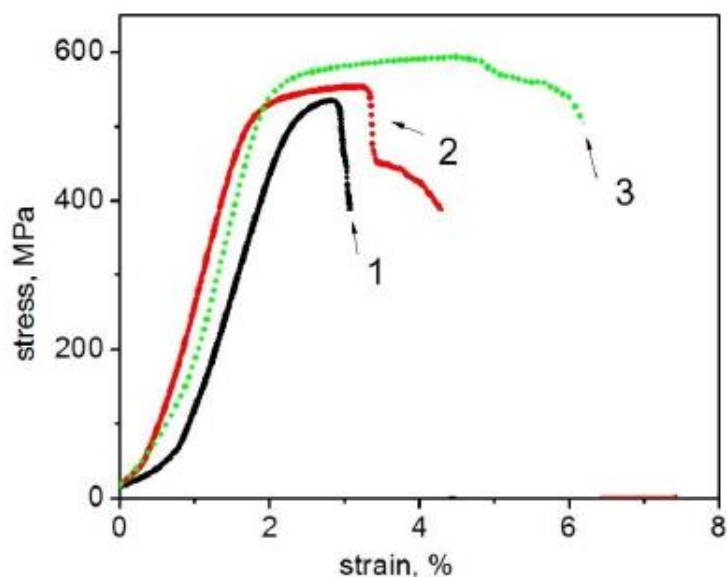


Рисунок 5 Кривые инженерного напряжения–деформации при растяжении исследованных образцов L-PBF, скорость деформации: 1- $3 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; 2— $1 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; 3— $8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Таблица 1 Механические свойства стали L-PBF 316L испытаны при различных скоростях деформации.

Скорость деформации, с^{-1}	σ_s , МПа	σ_{TS} , МПа	δ , %
3×10^{-4}	535	520	1.7
1×10^{-3}	554	526	5.0
8×10^{-3}	593	562	5.4

Прочностные свойства, измеренные в настоящем исследовании, находятся в диапазоне стандартных для конвенционных аустенитных сталей, но не приближаются к самым высоким значениям, как мы предполагаем, из-за пористости образцов. Увеличение скорости деформации обычно приводит к повышению прочностных характеристик, измеряемых экспериментально при растяжении. Кроме того, во всех исследованных образцах было обнаружено значительное снижение пластических свойств по сравнению с холоднокатаными листами и пластинами из обычной стали 316, где относительное удлинение принято равным 40% (EN стандарт 10088-2). Аналогичная низкая пластичность (2%) наблюдалась в объемных образцах из обычной аустенитной стали 316L с нано-двойникованными аустенитными зернами (~ 30 нм), в то время как предел прочности при растяжении составил 1400 МПа [20]. В нашем исследовании готовый образец демонстрировал ячеистую структуру; средний размер ячейки составлял около 100 нм, следовательно, низкая пластичность, вероятно, была связана с высокой пористостью образцов и низкой подвижностью дислокаций в стенках ячеек.

Таблица 1 показаны средние значения полученных характеристик.

Анализ микроструктуры после деформации показал, что разрушение происходит вместе с технологическими порами, острые неровные края которых служили концентраторами напряжений (рисунки 6 и 7). Наличие большого количества технологических пор повлияло на характер разрушения пористого образца L-PBF 316L. Смешанное хрупко-пластичное разрушение может наблюдаться в образце L-PBF 316L после деформации при

$3 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ (рисунок 6 а). Область хрупкого разрушения с выступом (или ступенькой) видна на рисунке 6 а (указано стрелкой). С увеличением скорости деформации наблюдалось пластическое разрушение вдоль пор, что неожиданно для материала с высокой пористостью (рисунок 6с,е). Методом SEM были выявлены двойники во всех деформированных образцах вблизи края разрушения (рисунок 6 b, d, f). Двойникование было более выраженным в образцах, деформированных с более высокой скоростью деформации (рисунок 6f). Исследованные образцы L-PBF имеют специфическую ячеистую структуру. Обычно на стенках ячеек наблюдается сегрегация элементов и повышенная плотность дислокаций. Дислокации в этих ячеистых структурах менее подвижны и при высокой скорости деформации не могут легко скользить. Из-за этого активируется двойникование, как другой механизм пластической деформации. Чем выше используемая скорость деформации, тем выше наблюдается вклад двойникования (рисунок 6). Это привело к более высокому удлинению при разрушении в образцах L-PBF 316L, испытанных с более высокой скоростью деформации (таблица 1).

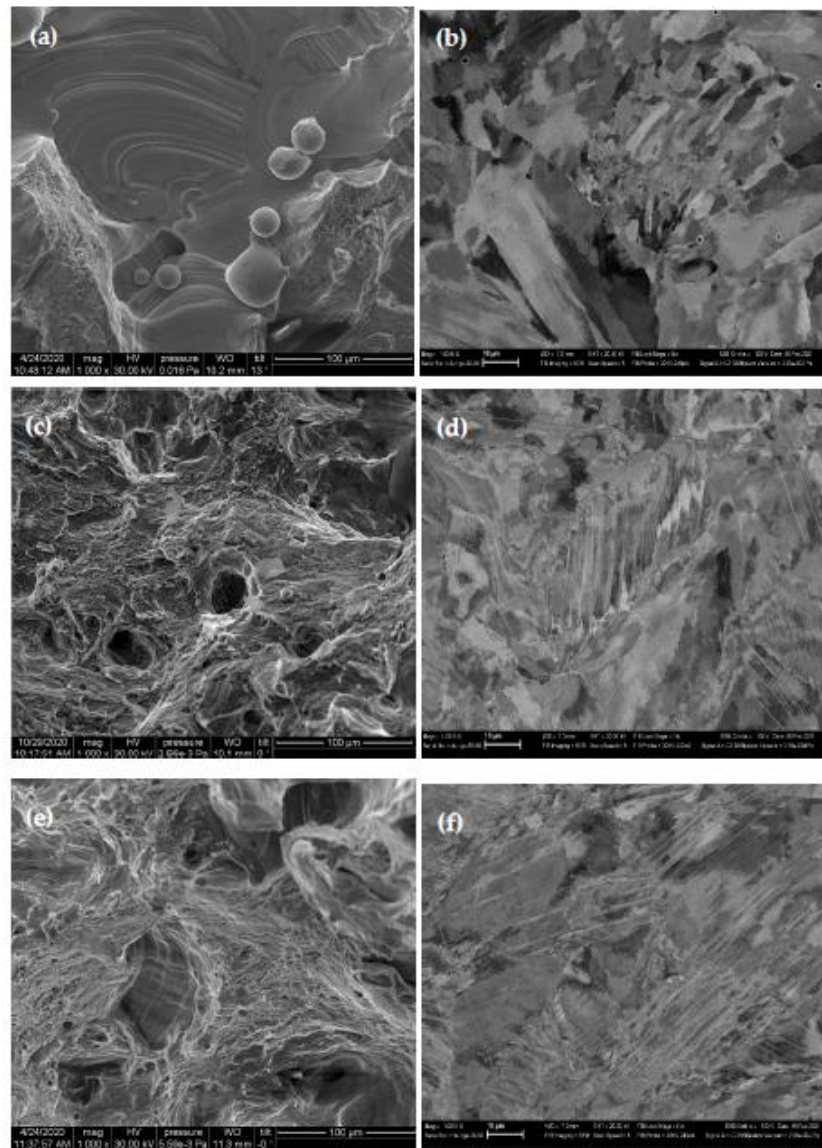


Рисунок 6. Поверхности разрушения и микроструктуры под изломом образцов стали L-PBF 316L, деформированных при различных скоростях деформации, (a,c,e) Изображения SEM; (b,d,f) СЭМ-изображения с обратным рассеянием электронов: (a,b) $3 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; (c,d) $1 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$; (e,f) $8 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$.

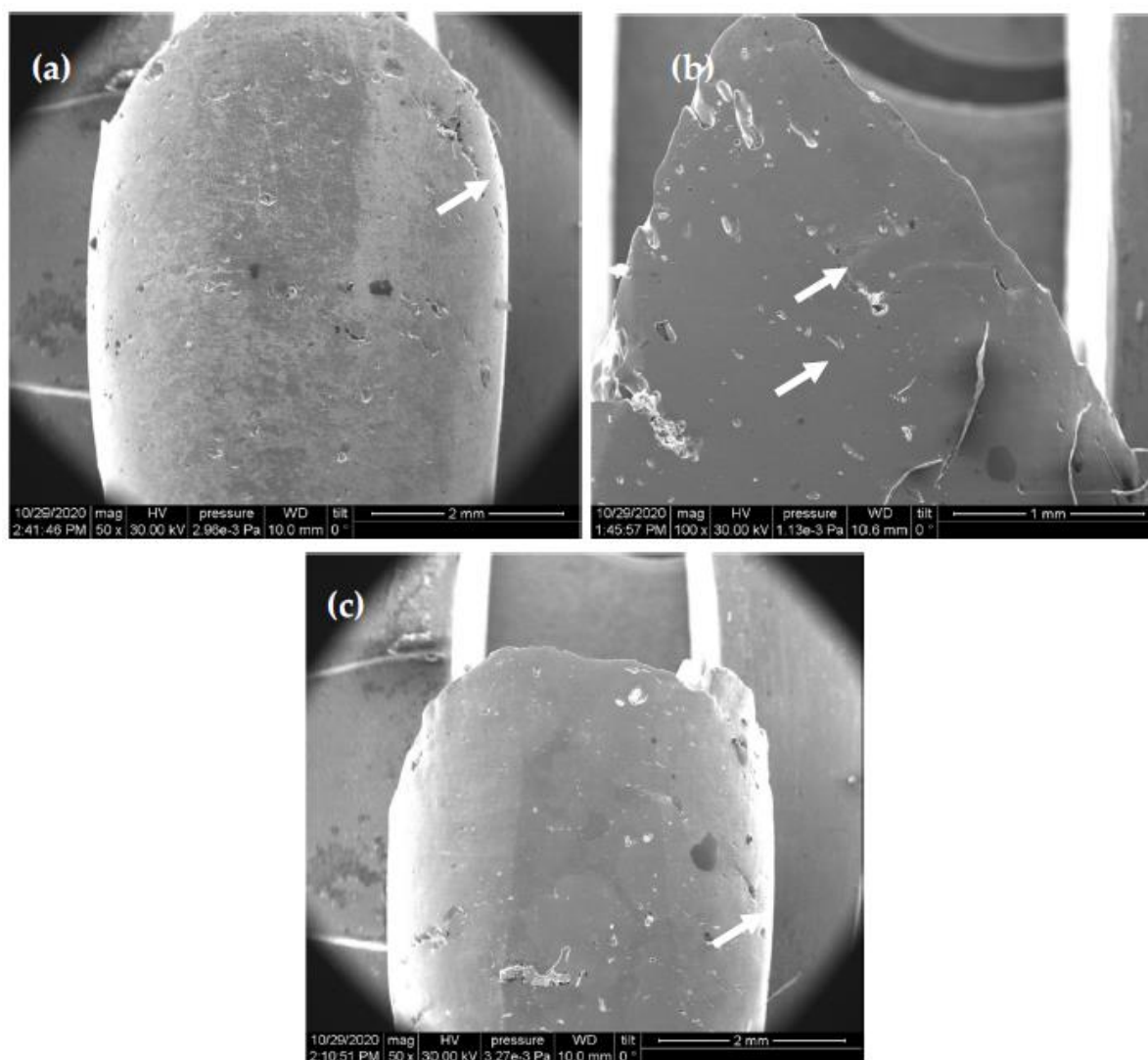


Рисунок 7. Внешняя поверхность исследованных образцов L-PBF вблизи зоны разрушения после деформации с различными скоростями деформации, изображения SEM: (a) $3 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; (b) $1 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; (c) $8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Заключение

Процесс неустойчивого пластического течения, связанный с чувствительностью механических свойств к скорости деформации, был изучен на образцах из пористой аустенитной стали 316L, изготовленных методом лазерного наплавления в порошковом слое. Наличие пор и специфической ячеистой микроструктуры стали определяет процесс деформации и механизмы разрушения при растяжении при различных скоростях деформации. Можно сделать следующие выводы:

- Несмотря на пористость, образцы показали высокую прочность, значение которой возрастало со скоростью нагружения. Пористость уменьшала эффективное поперечное сечение образца, что приводило к снижению пластичности образцов. Кроме того, пористость приводила к делокализации пластической деформации, так что сужение не наблюдалось во всех испытанных образцах при всех скоростях деформации.

- С увеличением скорости деформации образование новых пор было менее выраженным при самой высокой скорости деформации $8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ в качестве доминирующего микроскопического механизма пластического разрушения наблюдалась только коалесценция пор.

- С увеличением скорости деформации двойникование FCC (111)[11-2] или (11-1)[11-2] было более развито, вероятно, из-за относительно низкой подвижности дислокаций, связанных с ячеистыми дислокационными структурами в материале. Это привело к увеличению относительного удлинения при разрушении, измеренного в образцах, испытанных при $8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Обычно микроструктура материалов, изготовленных с добавлением добавок (AM), отличается от структуры обычных сыпучих материалов. Кроме того, в материалах AM могут быть обнаружены некоторые специфические дефекты, такие как газовая пористость и отсутствие плавления. Эти особенности влияют на механические характеристики и эксплуатационные характеристики материала, и, следовательно, создание условий существования неустойчивости пластического течения необходимо для успешного промышленного применения изделий из металла 3D.