

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
университет»

На правах рукописи

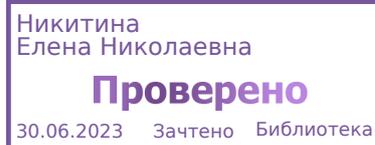
Кривобоков Анатолий Артемович

**Исследование механизмов усталостного разрушения нержавеющей стали  
12X18Н10, полученной селективным лазерным сплавлением**

Направление подготовки 15.04.03 - «Прикладная механика»

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2023



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

Научный руководитель

доктор технических наук,  
доцент Башков Олег Викторович

Защита состоится «28» июня 2023 года в 9 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 202/2.

Автореферат разослан 26 июня 2023 г.

Секретарь ГЭК



Бурдасова Александра Александровна

## Общая характеристика работы

В отличие от традиционных процессов производства в настоящее время для точного воспроизведения прототипа изделия все больше стал применяться метод 3-D печати. Современные технологии позволяют изготавливать не только прототипы изделий из пластика, но и готовые изделия из металла. Одним из наиболее распространенных методов изготовления металлических изделий является метод селективного лазерного сплавления (СЛС) из порошка. СЛС - селективное (выборочное) лазерное плавление – процесс заключается в последовательном послойном расплавлении порошкового материала посредством мощного лазерного излучения. Для этого применяют порошки, как чистых металлов, так и сплавов.

Для оценки структурного и технического состояния конструкционных материалов необходимо изучать закономерности изменения их структурного состояния. Процесс испытаний усталостной долговечности можно разделить на шесть стадии: циклическая микротекучесть, текучесть, упрочнение, развитие субмикротрещин до размеров микротрещин, развитие микротрещин до размеров макротрещин и долом. Для выявления данных стадий, как правило, проводят множественные испытания материалов на усталость при разных напряжениях, сопровождая их факторными исследованиями на каждой стадии. Процесс является достаточно трудоемким и длительным. При использовании резонансных колебательных систем, образование магистральной трещины может быть выявлено по снижению резонансной частоты циклических колебаний.

Также ранее была предложена методика оценки стадийности циклической долговечности и усталости по параметрам акустической эмиссии, регистрируемым в процессе усталостных испытаний для поликристаллических металлических материалов.

**Целью** данных исследований является исследование кинетики накопления усталостных повреждений в образцах стали 12X18H10, полученных из порошка 3D - печатью методом СЛС.

**Задачи диссертационной работы:**

1. Выполнить аналитический обзор современных методов используемых в мире аддитивных технологий.
2. Выбрать материал и методы исследований для изготовления образцов по технологии аддитивного производства.
3. Изготовить образцы для выполнения исследований усталостной долговечности и кинетики накопления усталостных повреждений.
4. Провести исследования образцов, выполненных селективным лазерным сплавлением, на циклическую усталость.

**Объектом исследований** являются образцы для испытаний на циклическую усталость, выполненные селективным лазерным сплавлением из порошкового материала сталь 12X18H10.

**Предметом исследований** является усталостные свойства, и кинетика накопления повреждений в образцах стали, изготовленных аддитивной технологией.

**Предполагаемый результат:** выявление особенностей усталостного разрушения образцов стали 12X18H10, изготовленных селективным лазерным сплавлением.

**Актуальность исследования** заключается в том, что современные технологии производства все активнее используют новые технологии аддитивного изготовления изделий не только из металлических материалов типа пластика, но и из металлов методами наплавки, лазерным сплавлением и другими методами.

Метод селективного лазерного сплавления является одним из методов точного воспроизведения изделий по чертежам с соблюдением размеров изделий в тех случаях, когда изготовление изделий другими методами невозможно. Однако, свойства, получаемых данным методом готовых изделий

еще недостаточно изучены, получаемые изделия не обладают сплошностью, как исходные материалы, получаемые классическими методами металлургического производства. В связи с этим требуется проведение исследований механических свойств и особенности развития повреждений в материалах, получаемых с использованием новых технологий производства.

**Научная новизна.** Новизна исследований заключается в получении новых результатов циклических испытаний на малоцикловую и многоцикловую усталость образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления из стали 12Х8Н10. Данные по акустической эмиссии позволили установить особенности кинетики развития разрушений в момент зарождения и развития магистральной трещины.

### **Основное содержание диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования диссертации, сформулирована цель работы и определены основные задачи исследования, отмечена научная новизна.

**В первой главе** описано определение и методы аддитивных технологий материалы и методы получения металлических пороков, так же более подробно описан метод селективного лазерного сплавления.

Аддитивные технологии – общее наименование технологий, предполагающих изготовление изделия согласно данным цифровой модели (или САД-модели) методом послойного добавления материала.

Получение изделия происходит послойно, шаг за шагом путем формирования (тем или другим способом) слоя материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения САД-модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим.

Послойный синтез подразумевает проведение построения в среде инертного газа с охлаждением определенных зон, с местной усадкой сплава, с захватом молекул газа окружающей среды (азота или аргона), с образованием

дефектов, вызванных работой лазера, неоднородностью модельного материала и др.

Модельные (строительные) материалы могут быть жидкими (фотополимерные смолы, воски и др.), сыпучими (пески, порошковые полимеры, металлопорошковые композиции), в виде тонких листов (полимерные пленки, листы бумаги и др.), а также в виде полимерной нити либо металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения и др.

Существует несколько инновационных видов аддитивных технологий:

1. FDM (Fused deposition modeling) – изделие формируется послойно из расплавленной пластиковой нити.

2. CJP (ColorJet printing) – единственная в мире 3D полноцветная печать с принципом склеивания порошка, состоящего из гипса.

3. SLS (Selective Laser Sintering) – технология лазерного запекания, при которой образуются особо прочные объекты любых размеров (рисунок 1.2).

4. MJM (MultiJet Modeling) многоструйное 3D моделирование с использованием фотополимеров и воска.

5. SLA (Laser Stereolithography) – с помощью лазера происходит послойное отвердевание жидкого полимера.

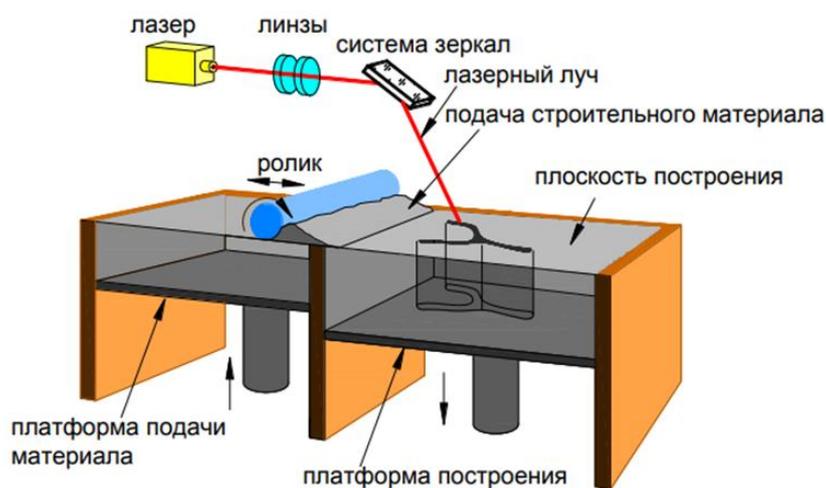


Рисунок 1 - Селективное лазерное сплавление

Более 90 % всех порошков, применяемых в аддитивных технологиях, получают методами диспергирования расплава. Основными технологиями получения порошков для АМ-машин являются:

- газовая атомизация;
- вакуумная атомизация;
- центробежная атомизация.

В методе селективного лазерного сплавления порошковый материал послойно сплавляется лазерным излучением. Для этого нужны мелкодисперсные термопластичные порошки с хорошей вязкостью и быстро затвердевающие, например, полимеры, воск, нейлон, а также керамические или металлические порошки с добавкой легкоплавкого связующего.

**Во второй главе** описаны методики, позволяющие получить новые результаты циклических испытаний на малоцикловую и многоцикловую усталость образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления из стали 12Х8Н10. Обоснован выбор материала, подвергаемые циклической усталости, а также описаны установки для проведения этих испытаний.

Нержавеющая конструкционная коррозионностойкая сталь 12Х18Н10 это сплав, который можно использовать в самых разных условиях и средах. Сталь 12Х18Н10 не подвержена коррозии, отлично ведет себя в агрессивных условиях в растворах уксусной, фосфорной кислот, разбавленных щелочей, солей. Сталь 12Х18Н10 сохраняет свои характеристики в широком температурном диапазоне. Этот сплав полностью экологичен, безопасен для здоровья, благодаря чему с успехом используется в пищевой промышленности. Сталь 12Х18Н10 отлично сваривается различными способами, легко поддается механической обработке, что позволяет применять нержавейку при изготовлении металлоконструкций любого типа.

В таблице 1 приведен состав порошка марки нержавеющей стали 12X18Н10:

Таблица 1 - Состав порошка для 3D печати

В процентах

Вещество	Fe	Cr	S	Ni	Mn	Si	P	C
Состав	основа	17,0-19,0	До 0,02	9,0-11,0	До 2,0	До 0,8	До 0,035	До 0,12

Испытательные образцы были выполнены в виде двойной лопатки с радиусной рабочей частью шириной  $h = 1,50-1,70$  мм, толщиной  $s = 2,80-2,90$  мм. Исследование циклической долговечности образцов выполнялось на установке с бесшумным бесконтактным электромагнитным нагружением. В зависимости от упругих свойств материала частота резонансных колебаний, задаваемая прибором измерения усталости, может варьироваться от 30 до 60 Гц. Для исследования кинетики накопления усталостных повреждений используется метод Акустической эмиссии (далее АЭ). Сигналы АЭ регистрируются широкополосным пьезоэлектрическим преобразователем GT-301 с полосой пропускания 50-550 кГц.

Аналоговый сигнал, после соответствующего усиления параметров полученного сигнала в аналоговом блоке (согласующий усилитель и фильтр нижних частот) приходит на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), где производится преобразование сигнала в цифровую форму и записывается в реальном масштабе времени на ЭВМ. Для обработки сигналов АЭ используется программа, созданная в Matlab. Программа позволяет обрабатывать АЭ информацию по таким параметрам как число циклов, амплитуда, частота, энергия сигналов АЭ, дополнительные параметры АЭ.

**В третьей главе** описываются результаты исследований и выявленные закономерности.

Усталостные испытания на консольный изгиб выполнялись на установке с бесшумным электромагнитным нагружением. Образцы выполняют колебания на резонансной частоте, определяемой упругостью материала и

длиной поводка, выполняющего роль консольного удлинителя. Резонансная частота колебаний при циклическом изгибе для образцов, выполненных из нержавеющей стали составляла 59,7-69,3 Гц и зависела от индивидуальных особенностей и геометрии образцов. Программное обеспечение установки позволяет регистрировать амплитуду и частоту цикла колебаний.

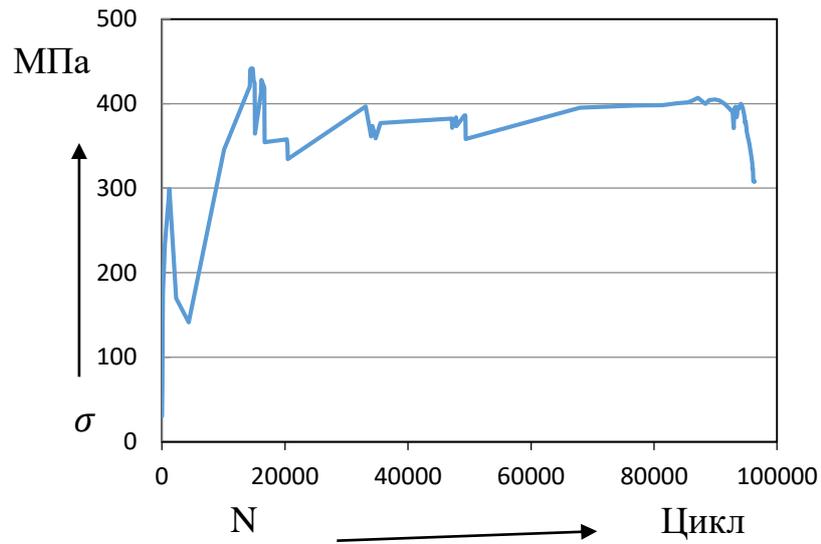
Сигналы акустической эмиссии регистрировались в течение всего испытания широкополосным пьезоэлектрическим преобразователем GT-301, установленным на неподвижной части образца в месте его стационарного крепления на усталостной установке. Сигналы усиливались усилителем Olympus с коэффициентом усиления 60 дБ и записывались с помощью высокоскоростного АЦП Adlinktech 9812 с частотой дискретизации 5 МГц. Последующая обработка сигналов выполнялась с использованием программы Matlab.

Испытания проводили на различных напряжениях цикла. Учитывая неоднородность и неравномерность структуры образцов, полученных СЛС методом из порошка, получить статистически повторяемые данные, устанавливающие зависимость между напряжением цикла и долговечностью (диаграмма Веллера) не удалось. При выполнении ряда экспериментов напряжение в процессе испытаний постепенно или ступенчато повышалось с целью достижения момента разрушения образцов на базе усталостных испытаний, не превышающих  $10^6$  циклов. Выполнялся анализ характера развития усталостной трещины от момента ее зарождения. Анализ выполнялся по изменению частоты резонансных колебаний образца и параметрам сигналов АЭ, регистрируемым в процессе испытания.

С целью изучения структуры изломов и характера развития усталостных трещин были проведены усталостные испытания образцов при различных напряжениях цикла.

На рисунках 2, 3 приведены диаграммы изменения нагрузки и частоты колебаний во времени образца 01.

а)



б)  $\nu$

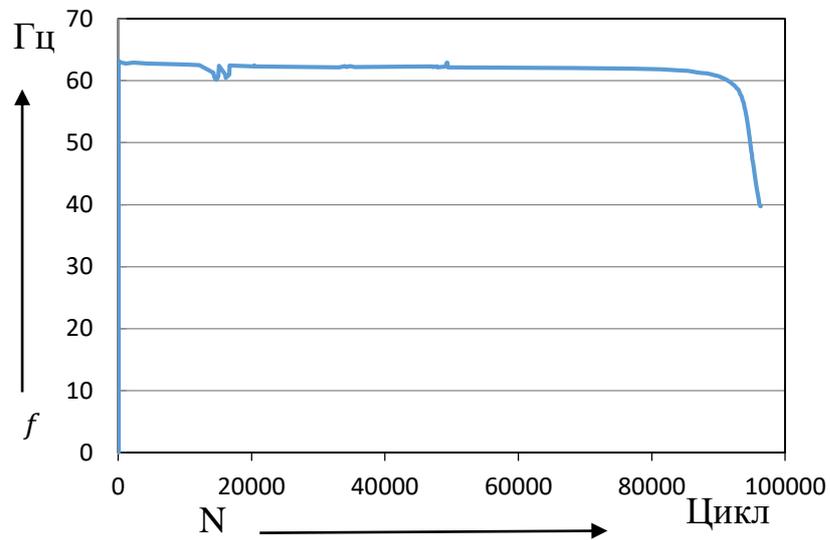
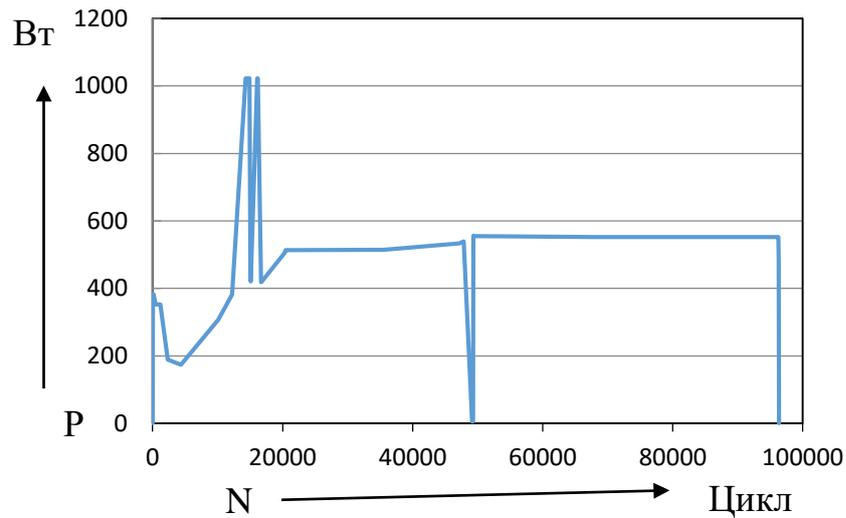


Рисунок 2- Диаграммы испытаний образца 01:

а - зависимости напряжения от числа циклов; б - зависимости частоты резонансных колебаний при испытании от числа циклов

а)



б)

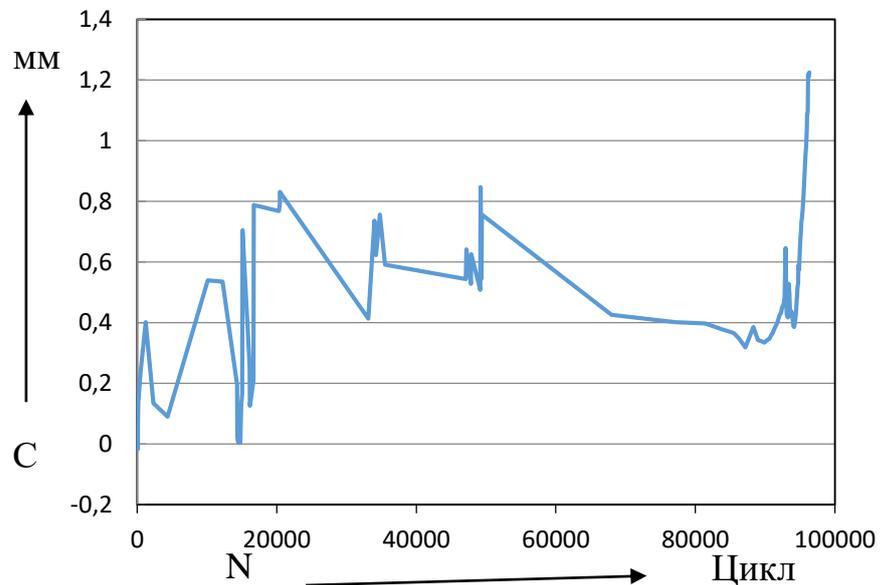


Рисунок 3 - Диаграммы испытаний образца 01: а - зависимости мощности при испытании от числа циклов; б - зависимости смещения при испытании от числа циклов

Испытание проходило при напряжении цикла  $\sigma = 380-395$  МПа, среднее значение напряжения цикла за период испытания составило 318 МПа (с учетом периода воздействия на каждом уровне напряжения).

В период с 14300 до 14900 циклов произошло кратковременное превышение напряжения испытания примерно в 1,5 раза, что теоретически могло привести к зарождению дефектов.

Испытание выполнялось при резонансных знакопеременных колебаниях на частоте 62,1 Гц. Снижение частоты резонансных колебаний, вызванное зарождением и началом роста магистральной трещины (рисунок 4), началось при достижении 81406 циклов. Разрушение образца, сопровождаемое резким снижением частоты до 39,7 Гц, наступило при 96348 циклов.



Рисунок 4 - Трещина на образце стали, полученной 3D печатью СЛС методом после усталостных испытаний образца 01

#### Акустическая эмиссия испытаний образца 01

Первая группа сигналов АЭ была зарегистрирована при достижении 15 000 циклов с периодической активностью до 32000 циклов (рисунок 5). Амплитуда регистрируемых сигналов не превышала 35 мВ. В данный период регистрировались сигналы со значениями параметра  $K_f$  в пределах двух диапазонов: 3,5-3,9 и 4,5-5,0. Медианная частота сигналов находилась в диапазоне 200-300 кГц. Активность сигналов достигала значений  $dN/dt = 60 \text{ с}^{-1}$ . Повторное повышение активности сигналов АЭ началось при достижении 90 000 циклов с регистрации сигналов с амплитудой, достигающей 40 мВ. Однако, снижение частоты, началось уже при достижении 81400 циклов. При достижении 91100 циклов частота колебаний снизилась на 2 Гц, а регистрируемая амплитуда сигналов не превышала 20 мВ. Повышение амплитуды сигналов АЭ началось после 93500 циклов, когда частота

колебаний образца снизилась на более, чем 4,5 Гц относительно начального значения. Максимальное за период испытания образца значение амплитуды сигналов 100 мВ было зарегистрировано при достижении 94700 циклов. Частота колебаний образца снизилась при этом до 50,5 Гц. Максимальная активность сигналов в данный период достигала значений  $dN/dt = 120 \text{ с}^{-1}$ . По мере роста магистральной трещины, число сигналов АЭ, отдельно регистрируемых за один период колебания образца, постепенно возрастало, достигая 30 сигналов и более за один цикл испытания. Значения частотного параметра изменялись в широком диапазоне: 3,5-5,2, что характеризует процесс развития усталостных повреждений, как имеющий значительный разброс параметров источников, генерируемых волны АЭ. Медианная частота сигналов находилась в диапазоне 250-320 кГц.

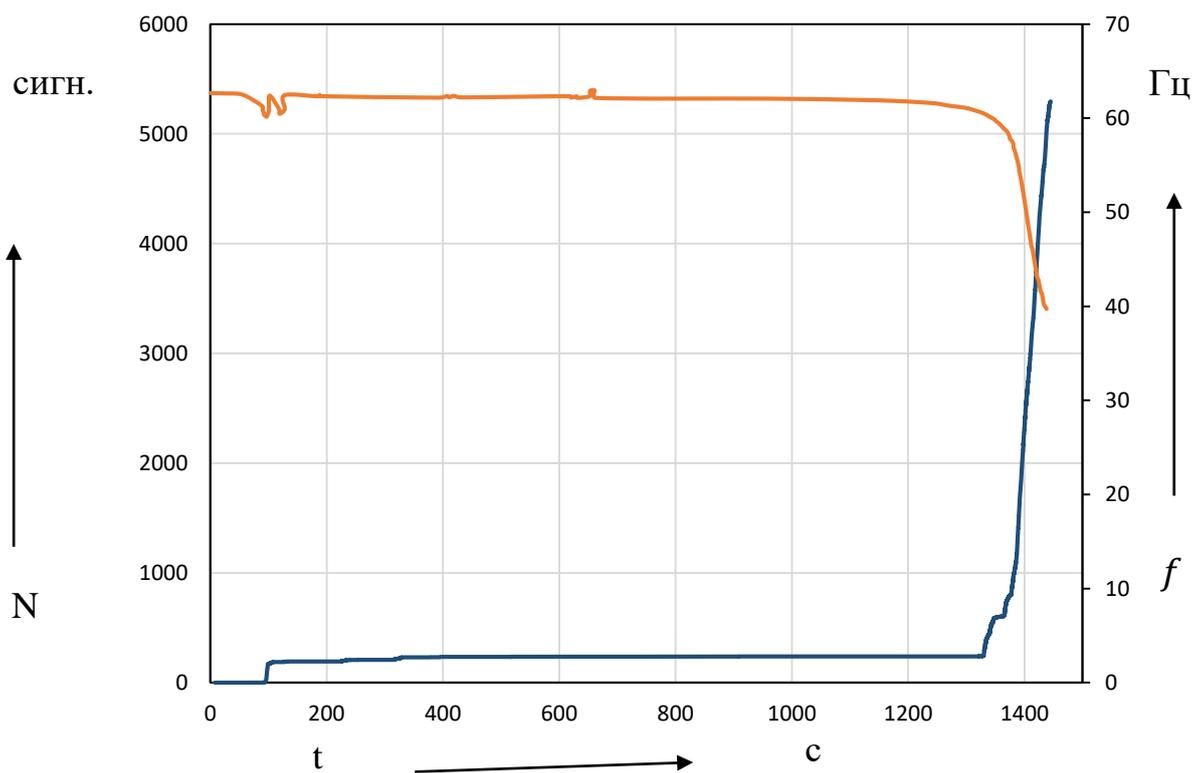


Рисунок 5 - Диаграмма зависимости суммарной АЭ (N) и частоты колебаний образца от времени для образца 01

## Заключение

В результате проведенного исследования особенностей формирований структуры нержавеющей стали 12Х18Н10, полученных 3D печатью была изучена технология селективного лазерного сплавления металлических порошков и получения изделий из них.

Было установлено, что исходная структура сталей, полученных путем сплавления из металлических порошков может иметь высокую неравновесность структуры, также могут встречаться неравномерно распределенные поры.

Структура стали 12Х18Н10 при сплавлении порошка зеренная с мостиками сплавления между частицами порошка или имеет высокую сплошность в случае формирования плотной беспористой структуры.

В результате циклических испытаний были получены образцы с характерным усталостным разрушением и структурой, содержащей элементы вязкого разрушения с образованием усталостных бороздок и продвижением усталостной трещины. Регистрируемые сигналы акустической эмиссии показывают стадийный характер начала и дальнейшего развития магистральной трещины, по которым можно судить о долговечности материала.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности применения технологии СЛС 3D печати для изготовления деталей, работающих при циклических нагрузках при условии контроля качества изделий после их изготовления.