

УДК 669.15-194.56:620.192.63: 539.422.3

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛИ 316L АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА¹

©2024 г. Л.Р.Ботвина^{1*}, Е.Н. Белецкий^{1*}, В.П. Левин^{1*}, А.В. Юдин^{2*}^{1*}ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

E-mail: lbotvina@imet.ac.ru

^{2*}АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Москва

Поступила в редакцию 22 ноября 2023 г.

После доработки 13 декабря 2023 г. принята к публикации 13 декабря 2023 г.

На разных стадиях циклического нагружения измерены такие физические характеристики стали 316L, полученной методом селективного лазерного плавления, как электрическое сопротивление и вихретоковый параметр. Установлена корреляция этих характеристик с длиной и раскрытием малых усталостных трещин, возникших на технологических дефектах, а также с относительным числом циклов нагружения. Основой отмеченной корреляции является подобие стадийности изменения физических свойств и стадийности изменения длины и раскрытия малых усталостных трещин с увеличением числа циклов. Показано, что средняя длина малых трещин на стадии стабильного роста линейно зависит от относительного числа циклов нагружения как при низкой, так и при высокой амплитуде напряжения. Электрическое сопротивление, оцененное после разрушения вблизи изломов образцов, растет с увеличением амплитуды напряжения согласно линейному соотношению, которому отвечает и зависимость вихретокового параметра от числа циклов при низких амплитудах напряжения. С ростом раскрытия малых трещин значения вихретокового параметра увеличиваются.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление; малые трещины; поврежденность; усталость; вихретоковый параметр; электрическое сопротивление; неразрушающий контроль.

Использование технологии селективного лазерного плавления для изготовления сталей и сплавов из металлического порошка в соответствии с компьютерной 3D-моделью находит все большее применение во многих областях техники, включая автомобильную, аэрокосмическую промышленность и биомедицину [1]. Это требует развития методов диагностики состояния таких «аддитивных» материалов, тем более что они содержат большое количество разнообразных технологических дефектов (пор в местах несплавления и на границах ванн расплава, нерасплавленных частиц порошка и др.) [2]. Поэтому основное внимание исследователей направлено на устранение и контроль таких дефектов плавления методами неразрушающего контроля, позволяющими оптимизировать структуру новых материалов [3, 4].

Оценке физических свойств «аддитивных» материалов в процессе нагружения, в частности, циклического нагружения, еще не уделяется должного внимания и литературных источников по этой проблеме крайне мало. Однако рассмотрение работ по физической диагностике процесса усталостного разрушения обычных конструкционных материалов облегчает анализ результатов оценки характеристик неразрушающего контроля новых материалов. Так, из работ, посвященных оценке параметра электрического сопротивления (R), следует, что этот параметр является достаточно информативным: характеризует циклическую поврежденность материала на разных стадиях развития разрушения и проявляет чувствительность к надрезу [5–7].

Авторы работ [8, 9] на основе измерений электрического сопротивления развили подход, позволяющий оценивать реальную поврежденность материала в процессе устало-

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00784).

стного разрушения, и предложили соотношения для такой оценки, учитывающие равномерность распределения микротрещин по сечению образца.

Высокой чувствительностью к поврежденности обладает и вихретоковый параметр H_{ec} благодаря большому числу определяющих его спектральных компонентов [10—12] и простоте реализации данного подхода [13], обеспечивающей преимущество перед другими методами неразрушающего контроля состояния металлических конструкций и широкое применение при оценке многочисленных типов дефектов, возникающих в разных условиях.

К числу преимуществ относится также и возможность при его (вихретоковом параметре) применении разделять влияние пластической деформации материала при проведении неразрушающего контроля и влияние повреждений, внесенных циклической нагрузкой [14]. Его использование в сочетании с акустическим методом дает возможность при исследовании аустенитной нержавеющей стали разделять эффекты, связанные с фазовым превращением, наведенным пластической деформацией в процессе циклирования, и с накоплением повреждений [15].

Особенностью данного метода является его ограничение, связанное с возможностью оценки поврежденности лишь в поверхностном слое образца или детали. Но если учесть, что деформационные процессы в области поверхности чаще всего опережают таковые в центральных объемах образца, особенно в процессе циклического нагружения, то этот метод оказывается информативным и, вероятно, может обладать прогностическими свойствами. В ряде исследований продемонстрированы его полезность и информативность при изучении малых усталостных трещин, зарождающихся вблизи концентраторов напряжений [16, 17].

В настоящей статье приведены результаты работы по оценке электрического сопротивления и вихретокового параметра — физических характеристик циклического разрушения образцов стали 316L, полученной методом селективного лазерного плавления.

Материал и методы исследования. Используются образцы, полученные из металлопорошковой композиции аустенитной стали 316L на установке MeltMaster3D-550 селективного лазерного плавления. Химичес-

Химический состав порошка 316L и механические свойства образцов аддитивной стали 316L

Содержание в порошке, мас. %					$\sigma_{0,2}$	σ_b	$\delta, \%$
Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	МПа		
17,97	1,63	65,54	12,47	2,31	376	495	23,8

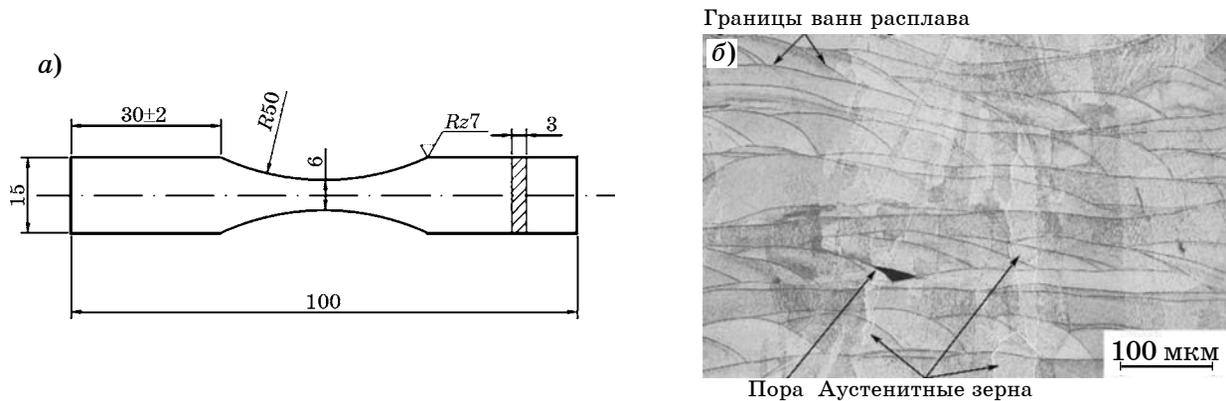
кий состав порошковой шихты аддитивной стали 316L и механические свойства образцов из нее представлены в таблице.

Результаты исследования исходного порошкового материала показали, что частицы порошка имеют округлую форму, их размеры лежат в диапазоне от 24 до 63 мкм со средним размером 40 мкм. Такие морфометрические параметры исходного порошка позволили сформировать равномерный слой порошкового материала толщиной 50 мкм. Процесс построения образцов и их заготовок проводился в среде азота с остаточным содержанием кислорода $<700 \text{ ppm}$ при следующих основных параметрах процесса селективного лазерного плавления (СЛП): мощность лазера 360 Вт; скорость сканирования 850 мм/с; шаг сканирования, т.е. расстояние между соседними траекториями лазерного луча, 80 мкм; траектория сканирования — шахматная [18].

В результате получены заготовки, из которых электроискровым методом вырезаны образцы в направлении линии послойного сплавления, размеры которых показаны на фиг. 1. Поверхность образцов перед усталостными испытаниями предварительно шлифовали до значения шероховатости $Rz7$. Для изучения кинетики роста малых усталостных трещин образцы были отполированы.

На фиг. 1 представлена геометрия усталостного образца и структура исследуемой стали. Усталостные испытания плоских корсетных образцов (12 штук) толщиной 3 мм проводили на сервогидравлической установке BISS Nano (максимальная нагрузка датчика силы 15 кН) при частоте нагружения 20 Гц, асимметрии цикла $R = 0,1$.

Для исследования картин поврежденности с оценкой длины и раскрытия малых трещин образцы разгружали, снимали из захватных приспособлений и с использованием микроскопа Neophot 32, оснащенного цифровой фотокамерой Canon 350D, проводили фотосъемку среднего сечения предварительно отполированного образца. Число таких установок было порядка десяти. Для измере-



Фиг. 1. Геометрия усталостного образца (а) и структура аддитивной стали 316L (б)

ния длины малых трещин полученные картины поврежденности анализировали с помощью программы обработки изображений. Отмечено, что длина малых усталостных трещин изменялась в диапазоне от 10 до 350 мкм; по данным измерения ~30 трещин оценивали их среднюю длину l_{cp} .

При тех же амплитудах напряжений ($\sigma = 175$ и 350 МПа) во время остановок испытательной машины (без снятия нагрузки) измеряли вихретоковый параметр H_{ec} и электрическое сопротивление R . Для оценки вихретокового параметра использовали дефектоскоп ВД-90НП. Электрическое сопротивление исследуемых образцов измеряли микроомметром ТС-2.

По данным экспериментальных измерений указанных физических характеристик (число измерений от 10 до 20) оценивали их средние значения и исследовали зависимость этих значений от относительного числа циклов, амплитуды напряжения и средней длины усталостных микротрещин. Погрешность измерения указанных параметров разрушающего контроля не превышала 5%.

Результаты исследования и их обсуждение. По результатам усталостных испытаний образцов исследуемой стали построена кривая усталости (фиг. 2, а), получены профили изломов (фиг. 2, б, в) и картины микротрещин на поверхности образцов, испытанных при высокой (фиг. 2, г) и низкой (фиг. 2, д) амплитуде напряжения (белыми стрелками показаны малые трещины).

Из представленных данных следует, что кривая усталости имеет перелом при амплитуде напряжения σ^* , при достижении которой резко меняется поврежденность образца: при $\sigma > \sigma^*$ она развивается более интенсивно и в большем объеме образца по срав-

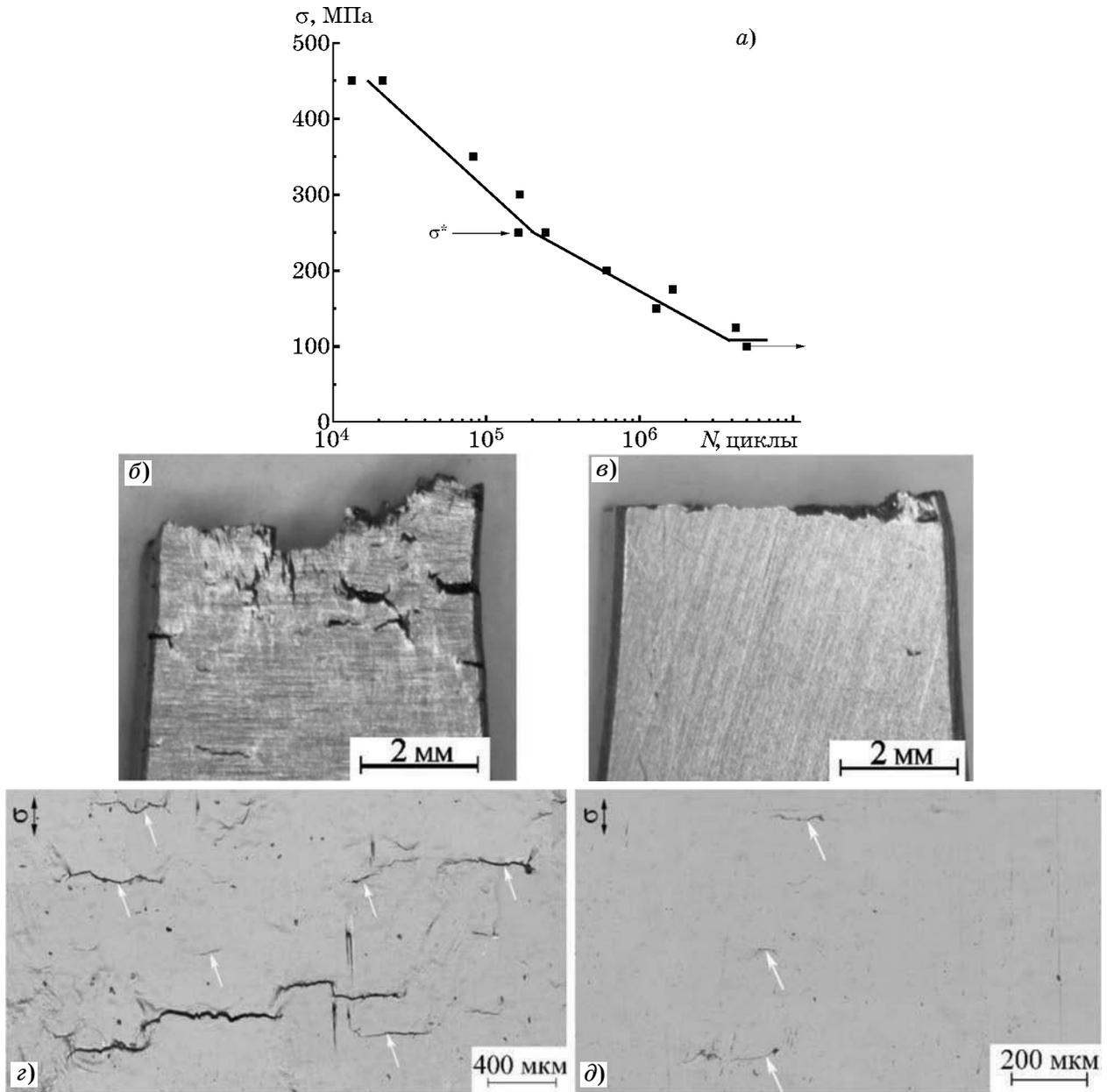
нению с процессом развития поврежденности при $\sigma < \sigma^*$, т.е. при амплитудах напряжения, соответствующих нижней ветви кривой усталости. Кроме того, левая верхняя ветвь кривой усталости связана с многоочаговым разрушением, а нижняя — с преимущественно одноочаговым. Меняется и профиль излома: сдвиговый излом, наблюдаемый при $\sigma > \sigma^*$, переходит в излом, сформировавшийся в условиях отрыва при $\sigma < \sigma^*$ [19].

Эти особенности усталостного разрушения в области перелома, или разрыва, кривых усталости свидетельствуют о смене напряженного состояния, реализующегося в вершине макротрещины, и переходе от плосконапряженного состояния при $\sigma > \sigma^*$ к плоскодеформированному состоянию материала образца при $\sigma < \sigma^*$ [19].

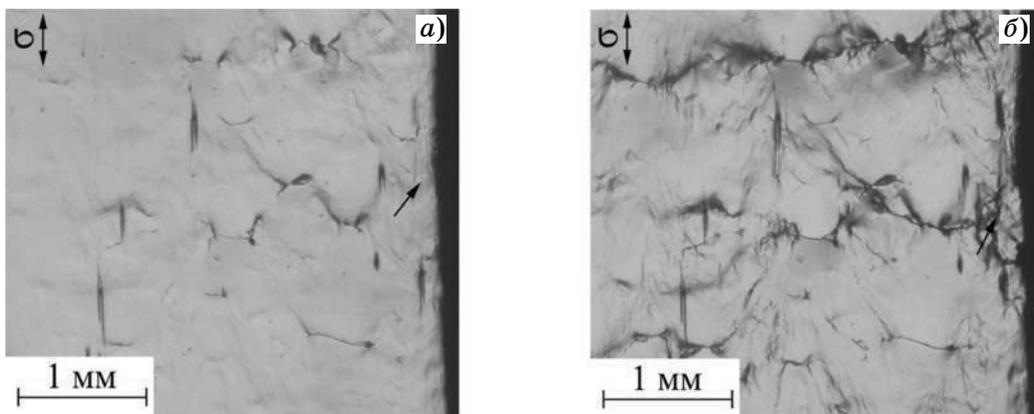
В.И. Шабалин [20] связывал разрыв кривых усталости с достижением циклического предела текучести материала. Это подтверждают результаты анализа микрорельефа разрушения, показавшие, что по сравнению с низким уровнем амплитуды напряжений при высоких напряжениях наблюдается более вязкий микрорельеф [19].

Изменения картин поврежденности обнаруживаются и при амплитудах $\sigma > \sigma^*$, но на разных стадиях усталостного разрушения. На начальной стадии развития поврежденности при $N/N_f = 0,1$ на структурных границах зарождаются и накапливаются малые трещины размером ~130 мкм (фиг. 3, а), раскрытие и длина которых растут с увеличением числа циклов. На стадии предразрушения при $N/N_f = 0,7$ происходит слияние этих трещин, которое приводит к формированию макротрещины (фиг. 3, б).

С увеличением числа циклов растет поврежденность поверхностного слоя образца,



Фиг. 2. Кривая усталости стали 316L (а), профили усталостных изломов (б, в) и картины микротрещин (z, д) при амплитуде напряжения выше $\sigma > \sigma^*$ (б, z) и ниже $\sigma < \sigma^*$ (в, д) амплитуды σ^* , соответствующей перелому кривой усталости [19]



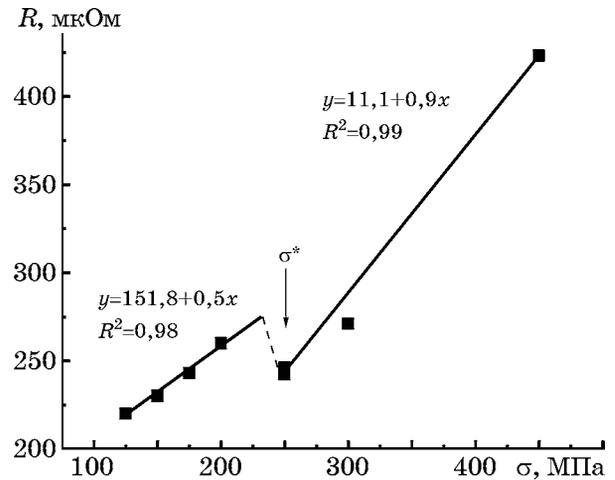
Фиг. 3. Картины поврежденности вблизи боковой поверхности образцов, испытанных при амплитуде напряжения $\sigma = 350$ МПа на начальной стадии разрушения при $N/N_f = 0,1$ (а) и на стадии слияния малых трещин при $N/N_f = 0,7$ (б)

в котором по смежным плоскостям скольжения развиваются микротрещины [19], а вдоль слоя, по его границе, — продольные микротрещины (на фиг. 3, б показано стрелкой).

Развитие поврежденности не могло не отразиться на изменении физических свойств исследуемого материала, в частности на изменении электрического сопротивления и вихретокового параметра. Это подтверждает зависимость электрического сопротивления от амплитуды напряжения, построенная по измерениям данной характеристики непосредственно вблизи поверхностей изломов образцов после разрушения (фиг. 4). Видно, что характер зависимости резко меняется при амплитуде напряжения σ^* , соответствующей перелому кривой усталости. Электрическое сопротивление повышается с увеличением амплитуды напряжения, причем при амплитудах, близких к σ^* , наблюдается область перехода к высокоамплитудному участку зависимости R — σ , соответствующему развитию множественного и многоочагового усталостного разрушения.

Следует отметить на фиг. 4 некоторую тенденцию увеличения угла наклона прямой при напряжениях $\sigma > \sigma^*$, что согласуется с результатами исследования авторов [7], показавших, что при амплитуде напряжения, равной пределу текучести нержавеющей стали 304 (215 МПа), наблюдается значительное увеличение удельного сопротивления в области надреза образца, связанное с зарождением микротрещин. При превышении предела текучести резкий рост удельного сопротивления вблизи надреза начинается при меньшем числе циклов в результате слияния микротрещин и последующего образования макротрещины.

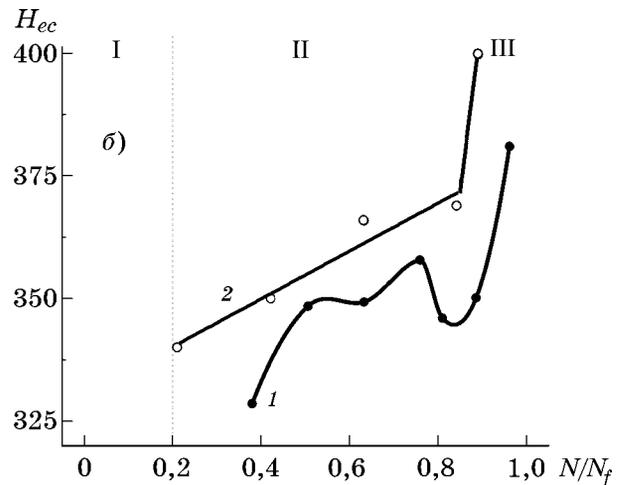
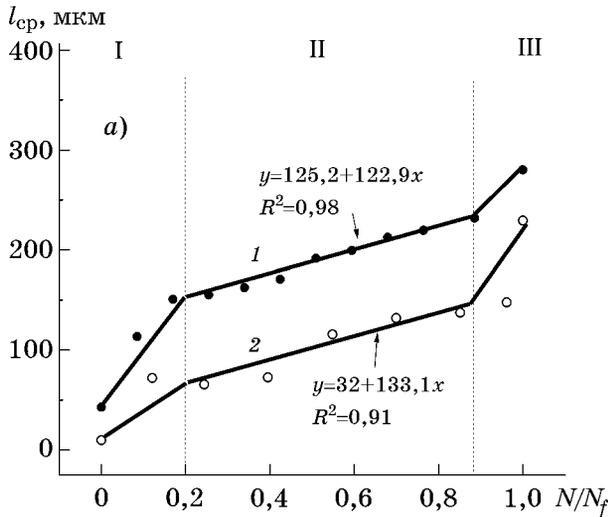
Стадийность изменения электрического сопротивления в процессе циклического нагружения образцов из нержавеющей стали AISI 316L изучена также авторами работ [5, 6], установившими снижение электрического сопротивления на начальной стадии усталостного разрушения, а затем его увеличение при долговечности, составляющей 20—40%, которое они связали с усталостным повреждением материала в зоне надреза. В дальнейшем, при большей долговечности, наблюдалась общая тенденция быстрого увеличения электрического сопротивления.



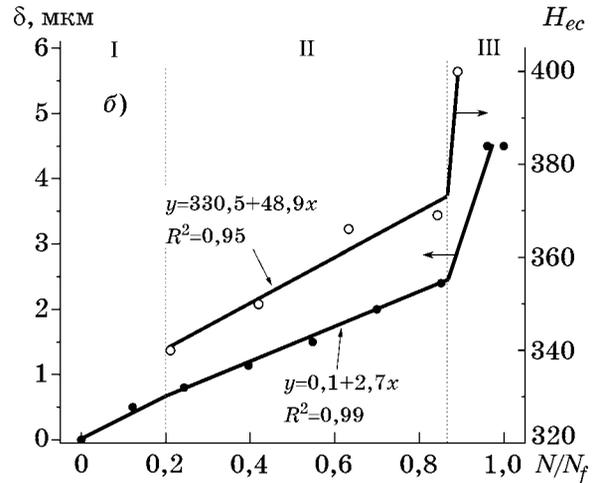
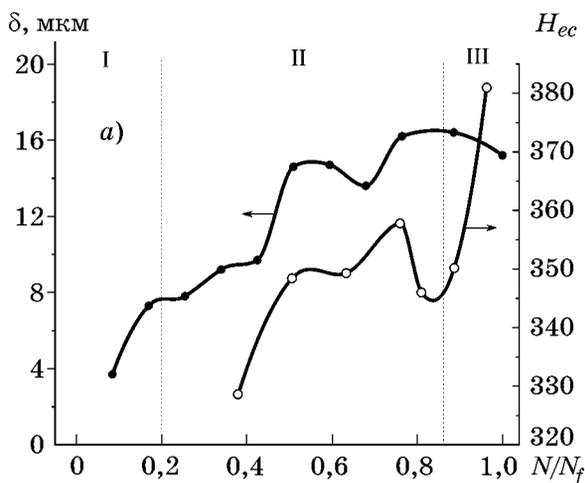
Фиг. 4. Изменение электрического сопротивления R вблизи поверхностей излома образцов в зависимости от амплитуды приложенного напряжения σ

В работах [8, 9] отмечена информативность электрорезистивной характеристики материалов, которая может быть использована в качестве критерия деградации материала в условиях циклического нагружения. Авторы этих исследований развивают концепцию эквивалентности электрической проводимости и нагрузки, согласно которой площадь токопроводящего поперечного сечения равна площади несущего сечения, что позволяет по параметру электрического сопротивления оценивать поврежденность материала. Проверка этого подхода на нескольких конструкционных материалах показала хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных.

Поврежденность исследуемой стали характеризуется средней длиной малых трещин (l_{cp}) и их раскрытия (δ), значения которых, как видно на фиг. 5, а и фиг. 6, растут с увеличением относительного числа циклов N/N_f . По изменению скорости роста этих характеристик можно выделить три стадии развития трещин: начальный (I), основной (II) и финальный рост трещин (III) перед разрушением. Но если рост средней длины малых трещин на II стадии развития поврежденности при обоих уровнях амплитуды напряжения можно описать линейными зависимостями типа $l_{cp} \sim N/N_f$, то изменение раскрытия δ (фиг. 6, а), связанное с чередованием его увеличения и уменьшения в процессе роста трещин, такой зависимости не отвечает. По данным исследования [19] увеличение раскрытия вызвано торможением малых трещин на структурных границах, а его



Фиг. 5. Зависимости средней длины трещины l_{cp} (а) и вихрекового параметра H_{ec} (б) от относительной долговечности N/N_f при амплитудах напряжения $\sigma = 350$ МПа (1) и $\sigma = 175$ МПа (2)



Фиг. 6. Зависимости раскрытия усталостных микротрещин δ и вихрекового параметра H_{ec} от относительной долговечности N/N_f при амплитудах напряжения $\sigma = 350$ МПа (а) и $\sigma = 175$ МПа (б)

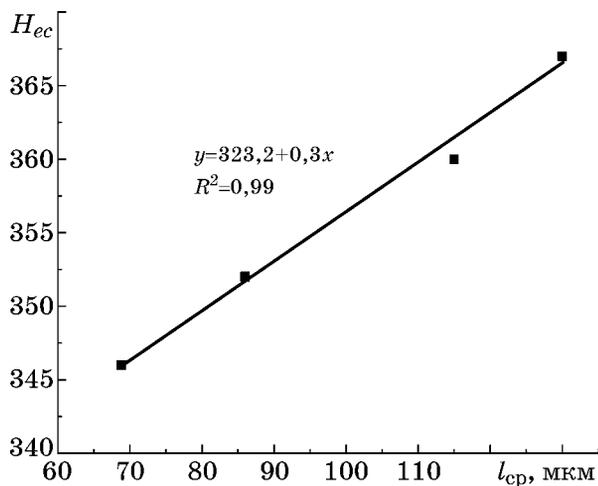
уменьшение при преодолении таких границ предшествует дальнейшему росту длины трещины.

Изменения длины и раскрытия трещин отражаются и на изменениях вихрекового параметра H_{ec} (фиг. 5, б, фиг. 6), особенно чувствительного к поврежденности поверхностного слоя усталостного образца, накопление дефектов в котором опережает процесс развития поврежденности в центральных областях (см. фиг. 3). Скорость роста параметра H_{ec} мала на стадии II и возрастает на стадии III роста средней длины трещин. При низкой амплитуде напряжения на II стадии роста дефектов зависимости раскрытия микротрещин и вихрекового параметра (фиг. 6, б) от относительного числа циклов отвечают линейным соотношениям.

Как показано на фиг. 7, линейной зависимостью вихрековый параметр связан и

со средней длиной трещин. Это означает, что он может служить в качестве критерия диагностики усталостного разрушения, что подтверждается исследованием [21], в котором изучалась взаимосвязь показаний вихревых токов с числом циклов при малоцикловом испытании на усталость пластин из углеродистой стали S355. При этом было установлено, что с увеличением числа циклов как вихрековый параметр, так и плотность микротрещин возрастают, а механические свойства стали (предел текучести и ударная вязкость) ухудшаются.

Совершенствование этого метода неразрушающего контроля, связанное с использованием индукционной термографии [16] или микродатчиков вихревого тока [17], позволяет повысить его чувствительность и регистрировать малые усталостные трещины длиной <1 мм в области концентраторов напря-



Фиг. 7. Зависимость вихретокового параметра H_{ec} от средней длины малых трещин l_{cp} при амплитуде напряжения $\sigma = 175$ МПа

жений, например в болтовых или заклепочных соединениях. Более того, авторам работы [22] с помощью разработанного ими вихревого датчика удалось измерять в процессе циклического нагружения микротрещины длиной < 50 мкм в образцах из алюминиевого сплава.

Это дает новую возможность для контроля усталостных испытаний образцов и элементов конструкций с оценкой числа циклов до зарождения макротрещины, а также для изучения кинетики роста малых трещин, что является актуальной задачей при использовании аддитивных материалов.

Выводы. 1. Оценены длина и раскрытие малых усталостных трещин в образцах из стали 316L, полученной методом селективного лазерного плавления. Изучена стадийность в изменении роста трещин в зависимости от числа циклов нагружения. Показано, что средняя длина трещин на II стадии стабильного роста во всем диапазоне амплитуд напряжения линейно зависит от относительного числа циклов нагружения.

2. Процесс роста длин малых трещин при амплитудах напряжения выше напряжения σ^* , соответствующего перелому на кривой усталости, сопровождается попеременным увеличением и уменьшением их раскрытия, а при амплитудах напряжения ниже σ^* раскрытие трещин линейно зависит от относительного числа циклов нагружения.

3. Электрическое сопротивление материала, оцененное вблизи изломов после разрушения образцов, увеличивается с амплитудой напряжения, причем его зависимость от ам-

плитуды имеет разрыв при напряжении $\sigma = \sigma^*$, но обе ветви этой зависимости описываются линейным соотношением.

4. Вихретоковый параметр растет с увеличением числа циклов и отражает зависимости изменения с числом циклов раскрытия трещин. При амплитуде напряжения $\sigma < \sigma^*$ его зависимость от относительного числа циклов на стадии стабильного роста отвечает линейному соотношению. Линейным соотношением описывается и зависимость вихретокового параметра от средней длины малых трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qiao, R. The characterization of fatigue damage of 316L stainless steel parts formed by selective laser melting with harmonic generation technique / R. Qiao, X. Yan // Mater. (Basel). 2022. V.15. №3. DOI : 10.3390/ma15030718.
2. Sanaei, N. Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance : A state-of-the-art review / N. Sanaei, A. Fatemi // Prog. Mater. Sci. — Elsevier Ltd, 2021. V.117. August 2020. Art.100724. DOI : 10.1016/j.pmatsci.2020.100724.
3. Kim, C. Ultrasonic nondestructive evaluation of laser powder bed fusion 316L stainless steel / C. Kim, H. Yin, A. Shmatok, B.C. Prorok, X. Lou, K.H. Matlack // Addit. Manuf. Elsevier B.V. 2021. V.38. November 2020. Art.101800. DOI : 10.1016/j.addma.2020.101800.
4. Cook, O.J. Uncovering microstructural heterogeneities in binder jet printed SS316L through ultrasonic testing and X-ray computed tomography / O.J. Cook, N. Huang, R.L.W. Smithson, C.M. Kube, A.M. Beese, A.P. Argüelles // Mater. (Basel). 2023. V.197. Art.112697.
5. Nobile, R. In situ measurements of fatigue damage evolution by electrical resistance method / R. Nobile, A. Saponaro // Procedia Struct. Integr. Elsevier B.V. 2020. V.28. P.1321—1328. DOI : 10.1016/j.prostr.2020.10.103.
6. Nobile, R. Electrical Resistance measurements for fatigue damage prediction of AISI 316L stainless steel / R. Nobile, A. Saponaro // Procedia Struct. Integr. Elsevier B.V. 2022. V.41. P.421—429. DOI : 10.1016/j.prostr.2022.05.048.
7. Omari, M.A. Estimation of changes in the mechanical properties of stainless steel subjected to fatigue loading via electrical resistance monitoring / M.A. Omari, I. Sevostianov // Intern. J. Eng. Sci. 2013. V.65. P.40—48. DOI : 10.1016/j.ijengsci.2013.02.006.
8. Sun, B. High-cycle fatigue damage measurement based on electrical resistance change considering variable electrical resistivity and uneven damage / Sun B., Guo Y. // Intern. J. Fatigue. 2004. V.26. №5. P.457—462. DOI : 10.1016/j.ijfatigue.2003.10.004.
9. Yang, L. Damage evaluation based on electrical resistance measurement / Yang L., Sun B., Guo Y. // Key Eng. Mater. 2008. V.385—387. P.589—592. DOI : 10.4028/www.scientific.net/kem.385-387.589.
10. Janousek, L. Novel insight into swept frequency eddy-current non-destructive evaluation of material defects

- / L. Janousek, A. Stubendekova, M. Smetana // Meas. J. Intern. Meas. Confed. Elsevier, 2018. V.116. September 2017. P.246—250. DOI : 10.1016/j.measurement.2017.11.039.
11. *Rusli, N.S.* A review on eddy current thermography technique for non-destructive testing application / N.S. Rusli, I.Z. Abidin, S.A. Aziz // J. Teknol. 2016. V.78. №11. P.127—132. DOI : 10.11113/.v78.7656.
 12. *Горкунов, Э.С.* Применение вихретокового метода для оценки накопленной пластической деформации и остаточных механических свойств после циклического нагружения отожженной среднеуглеродистой стали / Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, А.В. Макаров, Л.Х. Коган, С.А. Роговая // Дефектоскопия. 2007. №4. P.24—30.
 13. *Ghoni, R.* Defect characterization based on eddy current technique : Technical review / R. Ghoni, M. Dollah, A. Sulaiman, I.F. Mamat // Adv. Mech. Eng. 2014. V.2014. DOI : 10.1155/2014/182496.
 14. *Fang, Y.* Distinguishing evaluation of plastic deformation and fatigue damage using pulsed eddy current testing / Fang Y., Qu Y., Zeng X., Chen H., Xie S., Wan Q., Uchimoto T., Chen Z. // NDT E Intern. Elsevier Ltd, 2023. V.140. June. Art.102972. DOI : 10.1016/j.ndteint.2023.102972.
 15. *Mishakin, V.V.* On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring / V.V. Mishakin, V.A. Klyushnikov, A.V. Gonchar, M. Kachanov // Intern. J. Eng. Sci. Elsevier Ltd, 2019. V.135. P.17—22. DOI : 10.1016/j.ijengsci.2018.11.001.
 16. *Weekes, B.* Eddy-current induced thermography — Probability of detection study of small fatigue cracks in steel, titanium and nickel-based superalloy / B. Weekes, D.P. Almond, P. Cawley, T. Barden // NDT E Intern. Elsevier, 2012. V.49. P.47—56. DOI : 10.1016/j.ndteint.2012.03.009.
 17. *Jiao, S.* Monitoring fatigue cracks of a metal structure using an eddy current sensor / Jiao S., Cheng L., Li X., Li P., Ding H. // Eurasip J. Wirel. Commun. Netw. 2016. V.2016. №1. DOI : 10.1186/s13638-016-0689-y.
 18. *Ботвина, Л.Р.* Малые усталостные трещины в аддитивной стали 316L : влияние на механические свойства, параметры акустической эмиссии и кинетику процесса разрушения / Л.Р. Ботвина, М.Р. Тютин, А.И. Болотников, И.О. Синев, Е.Н. Белецкий, И.А. Иванов, А.В. Юдин // Деформация и разрушение материалов. 2024. №2. С.25—33.
 19. *Ботвина, Л.Р.* Усталостное разрушение стали 316L, изготовленной методом селективного лазерного плавления / Л.Р. Ботвина, Е.Н. Белецкий, Ю.А. Демина, И.А. Иванов // Зав. лаб. Диагностика материалов. 2024. №8.
 20. *Шабалин, В.И.* О разрыве в кривых усталости дуралюмина / В.И. Шабалин // ДАН СССР. 1958. V.122. №4. P.600—604.
 21. *Potthoff, M.* Monitoring of low cycle fatigue damage with eddy current / M. Potthoff, J. Peterseim, W. Thale // 19th World Conf. Non-Destructive Test. 2016. P.1—9.
 22. *Zilberstein, V.* MWM eddy current sensors for monitoring of crack initiation and growth during fatigue tests and in service / V. Zilberstein, D. Schlicker, K. Walrath, V. Weiss, N. Goldfine // Intern. J. Fatigue. 2001. V.23. № Suppl. 1. P.477—485. DOI : 10.1016/s0142-1123(01)00154-2.