

К. К. Кукуджанов

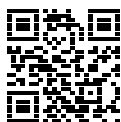
УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АДДИТИВНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 03X16H15M3 ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Аннотация. За счет воздействия высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем (ВЭМП) на образцы из нержавеющей стали 03X16H15M3 (AISI 316L), изготовленные при помощи технологии селективного лазерного плавления (СЛП), удалось достичь существенного увеличения предельной деформации до разрушения при незначительном снижении предела прочности. Предложен новый подход к определению предпочтительного режима высокоэнергетической электроимпульсной обработки (ВЭИО), направленного на зализывание микродефектов в аддитивных материалах. После применения предпочтительного режима ВЭИО механическое поведение материала стало более предсказуемым и менее вариабельным, о чем свидетельствует существенное снижение стандартных отклонений предела прочности и предельной деформации до разрушения. Подобная динамика макропоказателей является результатом зализывания микродефектов в материале и существенного уменьшения его пористости в результате обработки образцов в предложенном режиме ВЭИО.

Ключевые слова: аддитивные материалы, селективное лазерное плавление, зализывание, импульсные токи высокой плотности, технологические дефекты, микротрещины, микропоры, пористость, 03X16H15M3, 316L

Кукуджанов Константин Константинович, аспирант; e-mail: kkukudzhanov@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-8106-2453>; AuthorID: 9179-3855



для цитирования: Кукуджанов К.К. Улучшение механических характеристик аддитивной нержавеющей стали 03X16H15M3 при высокоэнергетической электроимпульсной обработке // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2026. № 1(67). С. 55–74. DOI: 10.37972/chgpu.2026.67.1.003. EDN: DJXUOL

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

K. K. Kukudzhanov

IMPROVEMENT OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ADDITIVE STAINLESS STEEL AISI 316L WITH HIGH-ENERGY ELECTRIC PULSE TREATMENT

I. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

Abstract. Significant improvement in mechanical properties of additively manufactured with selective laser melting (SLM) stainless steel 03X16H15M3 (AISI 316L) has been achieved by applying high-energy electric pulse treatment (HeEPT). Considerable increase of elongation with only a minor decrease in the ultimate strength is observed after applying the preferred route of HeEPT. A novel approach for determining the preferred HeEPT route aimed for healing of the microdefects in additively produced materials is proposed. HeEPT processing in the preferred route also made the material mechanical behavior more predictable, that is evidenced by the decreased standard deviations of ultimate stress and strain. This macro behavior is the result of healing internal microdefects and porosity reduction in the material.

Keywords: 03X16H15M3, 316L, additive manufacturing, SLM, healing, electric pulse treatment, microdefects, microcracks, micropores, porosity, mechanical properties

Konstantin K. Kukudzhanov, PhD student, IPMech RAS; e-mail: kkukudzhanov@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-8106-2453>; AuthorID: 9179-3855



to cite this article: Kukudzhanov K.K. Improvement of mechanical characteristics of additive stainless steel AISI 316L with high-energy electric pulse treatment // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2026. No 1(67). p. 55–74. DOI: 10.37972/chgpu.2026.67.1.003

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение. Аддитивное производство (АП) позволяет создавать трехмерные объекты любой сложности на основе цифровых моделей. Наиболее распространенный метод АП — селективное лазерное плавление (СЛП). Механические свойства деталей, изготовленных методом СЛП, отличаются от изготовленных традиционными способами. Основные отличия:

1. повышенная пористость, снижающая прочность и усталостные характеристики из-за распространения макротрещин, особенно от пор неправильной формы;
2. тонкая микроструктура материала, повышающая твердость и прочность, но снижающая пластичность сталей;

Промышленное применение технологии СЛП, как и других методов АП, не позволяет достичь бездефектного изготовления металлических деталей. Неправильная оптимизация параметров процесса приводит к повышенной пористости и образованию большого количества технологических дефектов (таких как трещины и поры неполного сплавления и газовые поры). Эти дефекты снижают механические характеристики изделий, увеличивает их дисперсию, что делает аддитивные материалы (АМ) менее качественными и ограничивает возможности применения по сравнению с материалами, изготовленными традиционными методами, например, такими как литье.

Для улучшения характеристик деталей, изготовленных по технологии СЛП, используются термические (возврат, отжиг), термомеханические методы (высокотемпературный отжиг, горячее пластическое деформирование, горячее изостатическое прессование) и методы электроимпульсной обработки. Термические и термомеханические методы повышают пластичность за счет снятия остаточных напряжений и уменьшения пористости, но снижают предел прочности и усталостные характеристики. При этом происходит термическая деградация микроструктуры. Механизм залечивания пористости при применении термомеханических методов обработки основан на термодиффузии атомов при высоких температурах. Они требуют значительных затрат энергии и времени, что делает их менее эффективными.

Под залечиванием микродефектов в АМ, далее понимается восстановление сплошности материала за счет уменьшения в нем объема внутренних пор и трещин, а также сглаживание формы этих дефектов, уменьшающее концентрацию механических напряжений в их острых вершинах.

Методы электроимпульсной обработки (ЭИО) стали предполагать индуцирование в проводящем материале импульсов токов высокой плотности за счёт воздействия внешним интенсивным электромагнитным полем (ЭМП). При этом для изделий из сталей, изготовленных традиционными методами, используются широкий диапазон режимов ЭИО с импульсами длительности 10^{-5} – 10^{-2} с и плотностями токов порядка 10^7 – 10^9 А/м². Это приводит к рассеиванию в материале удельной энергии в диапазоне 10^5 – 10^9 Дж/м³.

Далее будем называть импульсное электромагнитное поле (ЭМП) высокоэнергетическим (далее — ВЭМП) в случае рассеивания в сталях удельной энергии в диапазоне 10^7 – 10^9 Дж/м³ при сравнительно малых длительностях единичных импульсов 10^{-5} – 10^{-4} с [1]. Электроимпульсную обработку образцов импульсами ВЭМП далее будем сокращённо называть — высокоэнергетической электроимпульсной обработкой (ВЭИО). Другие виды ЭИО будем называть низкоэнергетическими (НЭИО). Данное разделение основано на наблюдениях за значительными различиями в механизмах залечивания микродефектов при НЭИО и ВЭИО [1].

Следует заметить, что вопрос улучшения механических свойств аддитивных материалов посредством ЭИО является малоизученным. Исследованию воздействия ЭМП на механические свойства аддитивных материалов посвящено незначительное число работ [2–6]. Все они посвящены исследованиям в области НЭИО. Материалы для исследований не только сталь 316L, но и с другие АМ. Технологии изготовления также не ограничиваются СЛП, но и другими методами аддитивного производства.

Отдельно отметим работы [7] и [8], в которых их авторы не уделяли внимания исследованиям изменений пластических и прочностных свойств, однако наблюдали явления, схожие с исследуемыми в настоящей работе. В [7] при электромеханической обработке (одновременном действии НЭИО и прижимающего усилия) в образце из сплава Ti-6Al-4V авторы наблюдали сглаживание границ дефектов в образце из АМ после электромеханической обработки. В [8] при ВЭИО с последовательно возрастающими импульсами тока (всего 75 импульсов) в 2-х образцах из композитного АМ TiC/316L удалось частично залечить длинные макротрещины путем сварки их берегов. Кумулятивный нагрев, вызванный многократными импульсами тока, приводил к сильному термическому сжатию берегов трещин и способствовал их сварке и залечиванию. Улучшение механических свойств образцов после ВЭИО в [8] не изучалось.

В вышеуказанных работах наблюдались качественные изменения тонкой микроструктуры аддитивных материалов под действием НЭИО, вызванные кумулятивным высокотемпературным нагревом образцов, действие которого было аналогичным отжигу. Их авторы подтверждают значительный рост температуры и отмечают сходство воздействия НЭИО с термомеханической обработкой, как в части изменений микроструктуры, так и в части улучшения механических свойств. Более подробный обзор этих работ приведен в [9].

В аддитивных материалах (впрочем, как и в материалах, изготовленных традиционными методами) под действием ВЭИО будут происходить иные эволюционные изменения, чем при термомеханической обработке или НЭИО. В частности, при ВЭИО залечивание дефектов, приводящее к улучшению механических характеристик, протекает по иному механизму, нежели при термомеханической обработке или электромеханической обработке (НЭИО + механическое сжатие). Так, при воздействии импульсов ВЭМП в острых вершинах внутренних

микротрещин и микропор происходит сильная концентрация электромагнитного поля, интенсивное выделение Джоулева тепла в короткий промежуток времени, возникновение сжимающих термических напряжений с одновременным разупрочнением и плавлением металла в этих областях. В совокупности это приводит к тому, что внутренние микротрещины и микропоры изменяют форму, уменьшаются в объеме, а их берега свариваются расплавленным металлом [10].

Результаты моделирования [10–12] подтверждают реальность именно такого механизма залечивания внутренних дефектов в проводящем материале при ВЭИО. В данных работах на основе связанной конечноэлементной электротермоупругопластической модели [10] было показано, что при ВЭИО металла с микродефектами в нем происходит уменьшение объема микродефектов и, как следствие, пористости материала, вплоть до полного залечивания некоторых микропор и микротрещин посредством сварки их берегов расплавленным металлом. Экспериментальное подтверждение залечивания микротрещин в цинке при ВЭИО приводится [13]. Численное исследование залечивания макротрещин в стали 316L при ВЭИО по другой конечноэлементной модели [14] также косвенно подтверждают вышеописанный механизм. Сварка берегов и залечивание макротрещин при ВЭИО наблюдались в экспериментах с АМ TiC/316L [8] и в нержавеющей сталях, изготовленных традиционными методами [13–15].

При отжиге, термомеханической обработке (горячем изостатическом прессовании, горячей пластической деформации) и электромеханической обработке (одновременное воздействие механического сжатия и НЭИО), когда тепловая энергия выделяется в течение более продолжительных интервалов времени по сравнению с ВЭИО, залечивание дефектов происходит по иному механизму – за счет термодиффузии атомов между берегами дефектов при высоких температурах нагрева. При этом происходит образование связей (мостиков) между берегами дефектов. Интенсивное плавление в вершинах микродефектов и сварка их берегов при НЭИО не происходит.

Таким образом, исследования воздействия ВЭМП на АМ с целью улучшения их механических свойств не проводились. Возможность залечивания в них внутренних микродефектов в процессе ВЭИО также не изучалась.

Безотносительно ВЭИО, также следует отметить чрезвычайно широкий диапазон параметров импульсов (плотностей токов, форм и длительностей импульсов) используемый в исследованиях по НЭИО [9].

Кроме того, в [2–8, 14, 16] авторы никак не объясняли и не обосновывали выбор ими тех или иных значений параметров проведенной ЭИО (далее – режима ЭИО). То есть выбор режима ЭИО осуществлялся ими чисто эмпирическим путем.

Настоящая работа является попыткой восполнить эти пробелы. В работе используется новый подход для определения режима ВЭИО, ориентированный

на залечивание внутренних микродефектов в металлических материалах. Развиваемый подход применен для определения предпочтительного режима ВЭИО нержавеющей стали 03X16H15M3 (AISI 316L) изготовленной аддитивным методом (СЛП). Эта марка стали популярна в промышленности благодаря отличным физико-механическим свойствам, высокой стойкости к окислению и хорошей свариваемости. Она широко используется в СЛП печати. Стальные образцы для экспериментов имеют низкое качество печати с крупными дефектами, такими как несплавления с линейными размерами до $250\mu\text{m}$. Наличие этих дефектов предпочтительно для демонстрации возможностей ВЭИО по их залечиванию.

Цели работы:

- 1) экспериментально подтвердить залечивание микропор и микротрещин (в широком диапазоне линейных размеров 5-250мкм) в аддитивной стали 03X16H15M3, при предпочтительном режиме ВЭИО (ранее таких подтверждений не было);
- 2) исследовать изменения пористости и морфологии микродефектов при предпочтительном режиме ВЭИО и их влияние на макроскопические механические свойства стали 03X16H15M3.

Изучение тонкой микроструктуры было факультативным, так как оно влияло на механические свойства.

Материалы и методы. В работе исследовались образцы, изготовленные из порошка нержавеющей стали 03X16H15M3. Образцы с шейкой в центральной части имели размеры $120 \times 6 \times 3$ мм (рис. 1А). Образцы были изготовлены методом СЛП на 3D-принтере SLM Kings 3D Printer M280HD (Китай). Для целей эксперимента 10 случайных образцов были поровну разделены на две группы.

Первая группа тестировалась на разрыв без предварительной ВЭИО. Вторая группа проходила ВЭИО, а затем тестировалась на разрыв.

Все образцы подвергали растяжению до разрыва на испытательной машине ГОСТ МИМ.2-100 (Россия) со скоростью деформации 0,15 мм/мин (начальное расстояние между зажимами $l_0 = 35$ мм).

Для изготовления шлифов использовали 2 образца. От каждого отрезали кусочки размером $10 \times 6 \times 3$ мм до ВЭИО, затем образец обрабатывали током и вырезали аналогичные кусочки.

Шлифы для микроструктурного исследования делали вдоль широкой грани образцов (параллельно плоскости YZ на рис. 1А). Дефекты исследовали в 3 случайно выбранных плоскостях, суммарная площадь которых составила $9,9 \text{ мм}^2$.

Микроструктуру до и после ВЭИО исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Coхem EM-30AX Plus (Китай), а также оптического микроскопа Zeiss Axio Imager.D1m (Германия). Образцы, жестко зафиксированные в медных зажимах-электродах (38 мм между электродами),

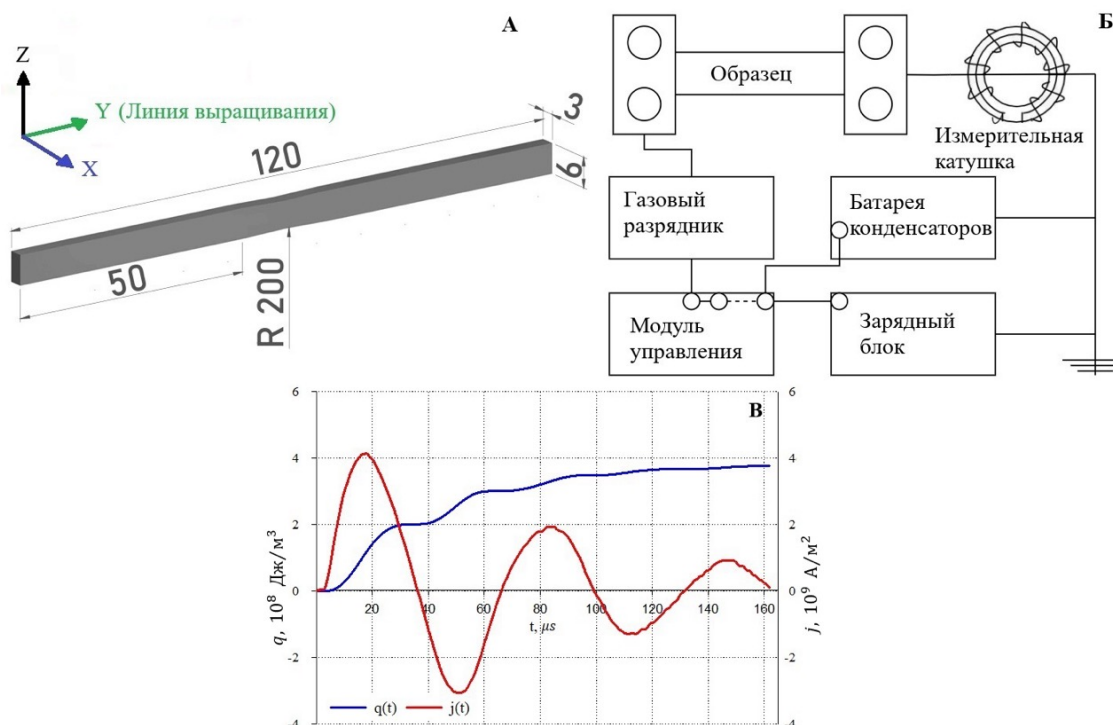


Рис. 1. Печатные образцы (размеры в мм) для экспериментов из стали 03X16H15M3(А), принципиальная схема экспериментальной установки (Б), измеренная в экспериментах зависимость плотности тока и рассчитанная зависимость удельной рассеянной энергии в образце от времени (В)

подвергались ВЭИО с помощью импульсного генератора ГИТ-20-40 (Россия) на специально разработанной лабораторной установке, схематично показанной на рис.1Б. Изменение силы тока в цепи от времени измерялась с помощью откалиброванной катушки Роговского, подключенной к осциллографу. В процессе ВЭИО в образцах индуцировались импульсы тока, имеющие форму, показанную на рис.1В.

Экспериментальная зависимость плотности тока $j_{\infty}(t)$ может быть аппроксимирована затухающей синусоидальной функцией

$$j_{\infty}(t) = j_{\max} e^{-\zeta \omega t} \sin(\omega t),$$

где ω — собственная угловая частота колебаний, ζ — коэффициент затухания, а время t изменяется в диапазоне $0 \leq t \leq \tau_0$.

Для импульсного генератора ГИТ-20-40 частота составляет

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 14,76 \text{ кГц},$$

коэффициент затухания равен $\zeta = 0,15$, а длительность импульса $\tau_0 = 162$ мкс.

В проводимых экспериментах амплитуда плотности тока в импульсах $j_{\max}$ варьировалась, тогда как длительность всех импульсов оставалась одинаковой.

Интервал времени между импульсами составлял 120 с. За этот период образец полностью остывал до начальной температуры T_0 , вследствие чего кумулятивный эффект нагрева отсутствовал.

Режим высокоэнергетического импульсного воздействия (ВЭИО) был выбран в соответствии с подходом, предложенным в работе [1]. Данный подход использует единственный параметр управления — удельную энергию импульса тока q , вместо одновременного подбора нескольких параметров, таких как плотность тока $j_{\infty}(t)$, длительность импульса $t = \tau_0$ и форма импульса, что практиковалось в предшествующих исследованиях.

Удельная энергия импульса тока рассчитывалась по выражению

$$q = \int_0^{\tau_0} \frac{j_{\infty}^2(t)}{\sigma^E} dt, \quad (1)$$

где σ^E — коэффициент электропроводности материала.

Значительные различия размеров и форм дефектов создают существенные трудности при неэмпирическом определении параметров ВЭИО, необходимых для их заживления и улучшения пластических макроскопических характеристик материала.

Анализ внутренних дефектов показывает, что для подавляющего большинства из них (за исключением газовых пор) характерным является негладкая форма с острыми выступами или вершинами. См.рис.2.

Одной из особенностей подхода, направленного на заживление дефектов и изложенного в работе [1], является необходимость знания конкретной формы и относительных геометрических размеров заживляемых дефектов.

В настоящей работе для упрощения будем считать, что все дефекты в материале образцов имеют форму эллиптических цилиндров с образующей, ориентированной вдоль оси Z (см.рис.1А). Основанием таких цилиндров являются эллипсы с большой полуосью a и малой полуосью b . Все эллипсы считаются одинаково ориентированными таким образом, что электрический ток в образце направлен вдоль их малой полуоси, то есть вдоль оси Y .

Для определения режима заживления используются уравнения (31) и (32), приведённые в работе [1]. Как следует из указанных уравнений, связь удельной энергии импульса тока q с температурой металла T в вершине эллиптического дефекта, радиусом кривизны в вершине

$$R = \frac{b^2}{a}$$

, длиной дефекта a , средним расстоянием между центрами дефектов $2W$, а также с физическими свойствами материала, описывается следующим образом:

$$q = \frac{R}{a} \left(1 - \sqrt{\frac{R}{a}} \right)^2 \frac{\pi a}{2W} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{a}{W} \right) \rho c (T - T_0), \quad (2)$$

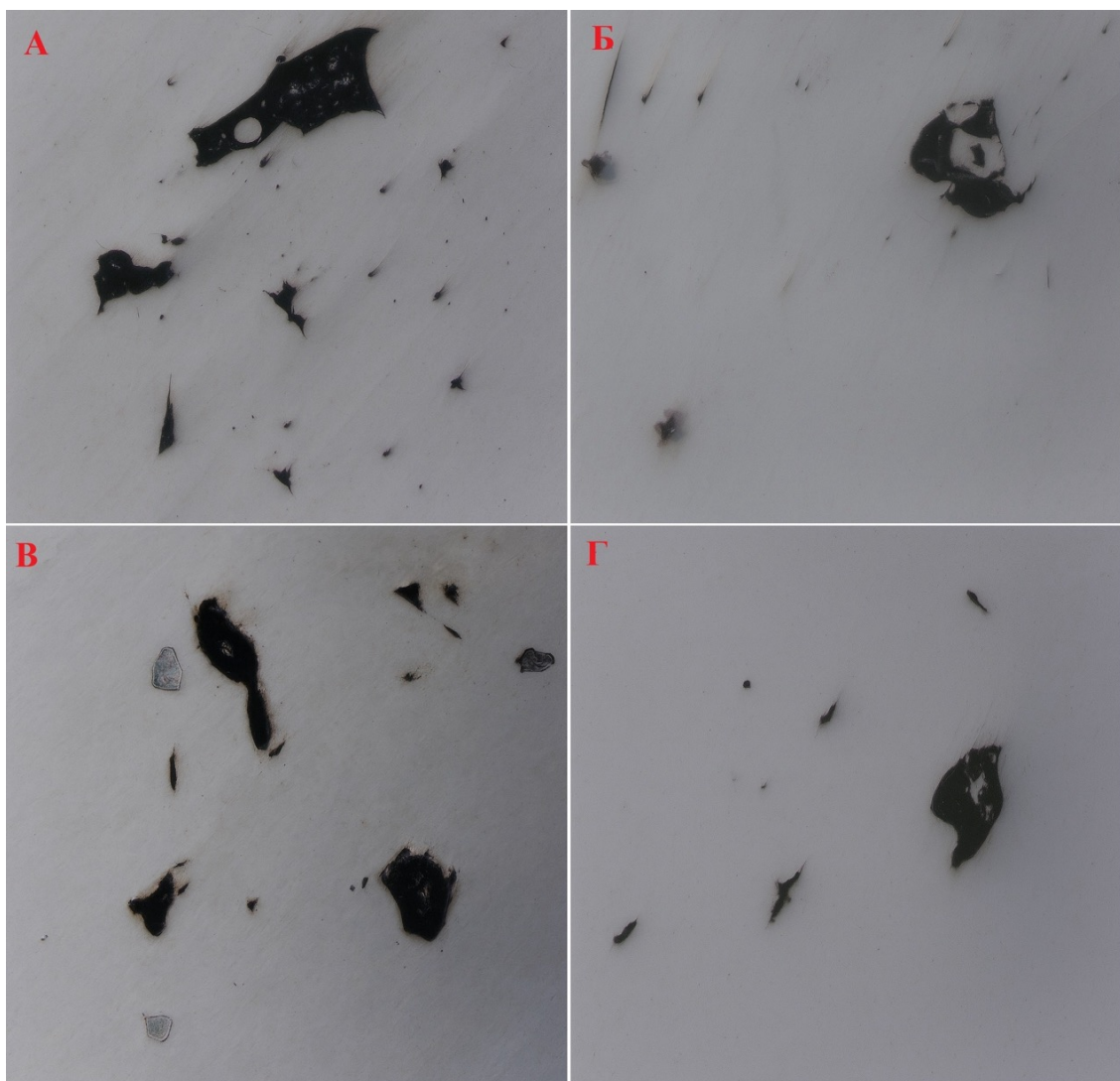


Рис. 2. Различные типы дефектов в материале образцов. Снимки оптического микроскопа с увеличением $\times 200$. Минимальная цифровая обработка - удаление дефектов шлифовки

где s — удельная теплоёмкость материала, ρ — плотность, а T_0 — начальная температура в вершине дефекта.

При этом зависимость (2) является автомодельной по отношению к безразмерным параметрам R/a и a/W . Первый параметр определяет форму микродефектов (далее — параметр формы), тогда как второй характеризует взаимное расположение микродефектов в материале. В дальнейшем все дефекты в исследуемых образцах будут описываться исключительно этими двумя параметрами.

Будем считать, что дефекты имеют вытянутую форму, то есть $b/a < 1$, так что $b^2/a^2 = R/a \ll 1$, и, следовательно, в выражении (2) можно пренебречь

членами порядка $o(R/a)$. Кроме того, будем предполагать, что среднее расстояние между дефектами значительно превышает их максимальный размер a , то есть $a/W \ll 1$, вследствие чего в формуле (2) можно также пренебречь членами порядка $o(a/W)$.

Данные предположения, с учётом наблюдаемой на шлифах геометрии дефектов в материале образцов и расстояний между ними, соответствуют действительности (см. рис.2).

Во введении отмечалось, что залечивание дефектов путём сварки их берегов происходит преимущественно в областях острых вершин дефектов, где импульс тока вызывает одновременное плавление металла и его сжатие. Процесс протекает пошагово: с каждым импульсом вершина дефекта смещается к центру эллипса вдоль его большой полуоси.

Пусть режим ВЭИО состоит из $N + 1$ импульсов с номерами $n = 0, 1, \dots, N$. В работе [1] предложено поддерживать для каждого импульса $n = 0, 1, \dots, N$ постоянную внутреннюю энергию в вершине дефекта, равную энергии первого импульса, что обеспечивает последовательные плавление и сварку дефекта.

Для этого энергия первого по порядку импульса из последовательности импульсов ВЭИО, q_0 , должна выбираться таким образом, чтобы при прохождении данного импульса залечивание в вершине дефекта заведомо происходило. Иными словами, в конкретных экспериментах энергия q_0 должна быть достаточной для обеспечения залечивания дефекта. Такой режим (или совокупность режимов в зависимости от выбранного значения q_0) далее будем называть предпочтительным.

Мерой внутренней энергии в вершине дефекта является температура $(T - T_0)$, входящая в уравнение (2). Тогда, с учётом сделанных выше допущений, из уравнения (2) следует, что предпочтительный режим описывается соотношением, аналогичным уравнению (35) в работе [1]:

$$\frac{q_{n+1}}{q_n} = \frac{R_{n+1} a_n}{R_n a_{n+1}}, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (3)$$

Здесь q_{n+1} и q_n — энергии двух последовательных импульсов тока, R_{n+1} и R_n , а также a_{n+1} и a_n — соответствующие геометрические параметры дефекта, изменяющиеся в процессе прохождения этих импульсов. Уравнение (3) отношение энергий импульсов тока с изменяемыми в процессе залечивания геометрическими размерами дефекта.

Будем считать, что дефект залечивается равномерно: за каждый импульс заваривается одинаковый малый участок Δa в вершине дефекта, и через n импульсов его начальная длина a_0 уменьшится до $a_n = a_0 - n \cdot \Delta a$, при $\Delta a/a_0 \ll 1$.

Также будем считать, что с каждым n -м импульсом размер малой полуоси дефекта b_n изменяется незначительно, т. е. считаем $b_n = b_0$, где b_0 — начальный размер малой полуоси. Данное предположение соответствует результатам расчётов [11–13]. Поэтому на n -ом шаге для радиуса кривизны R_n в новой вершине дефекта имеем:

$$R_n = \frac{b_n^2}{a_n} = \frac{R_0}{1 - n(\Delta a/a_0)}, \quad n = 0, 1, \dots, N, \quad (4)$$

где $R_0 = b_0^2/a_0$ — начальный радиус кривизны в вершине дефекта.

С учётом сделанных предположений, для того чтобы при каждом n -ом импульсе в вершинах происходило плавление и, соответственно, могло происходить заваривание берегов дефекта, из уравнений (3) и (4) следует, что энергия каждого n -го импульса q_n должна увеличиваться в соответствии с зависимостью:

$$q_n = \frac{q_0}{(1 - n(\Delta a/a_0))^2}, \quad (5)$$

где q_0 — энергия начального импульса.

Если выполняется условие $n(\Delta a/a_0) \ll 1$, то выражение (5) можно аппроксимировать линейной зависимостью

$$q_n = q_0 (1 + 2n(\Delta a/a_0)), \quad (6)$$

где q_0 — энергия начального импульса.

Для конкретизации выражения (5) применительно к дефектам в исследуемых образцах воспользуемся следующими соображениями.

В исследуемых образцах выявлены микродефекты с различными параметрами формы R_0/a_0 . В соответствии с уравнением (2), чем меньше R_0/a_0 (т. е. чем острее дефект), тем меньшая начальная энергия q_0 требуется для его заживления.

В наших экспериментах мы будем заживать микродефекты с параметром формы, лежащим в диапазоне $1,6 \cdot 10^{-3} \leq R_0/a_0 \leq 1,2 \cdot 10^{-1}$. Его нижняя граница соответствует по параметру формы усталостным трещинам [16], а верхняя — овальным порам.

По известным свойствам стали 316L, используя уравнение (2), определяем энергии импульсов, соответствующие нижней и верхней границам диапазона параметра формы R_0/a_0 :

$$1,1 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3 < q_n < 3,8 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3.$$

Из экспериментов по заживлению макротрещин в пластинах из нержавеющей стали с отношением $R_0/a_0 = (1,2-1,8) \cdot 10^{-3}$ нам известна начальная энергия импульса, при которой в вершине таких трещин начинается заживление путём сварки их берегов, $q_0 = 1,88 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3$ [16].

Исходя из этих экспериментальных данных, скорректируем диапазон энергий импульсов:

$$1,37 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3 \leq q_n \leq 4,75 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3.$$

Таким образом, для зависимости (5) имеем $q_0 = 1,37 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3$, $q_N = 4,75 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3$. При $N = 9$ из уравнения (5) определяем, что для предпочтительного режима $\Delta a/a_0 = 0,083$.

Для простоты разделим залечиваемые микродефекты в материале образцов на две большие группы: с острыми вершинами, для которых $R_0/a_0 = 1,6 \cdot 10^{-3} - 2,25 \cdot 10^{-2}$, и с тупыми вершинами, для которых $R_0/a_0 = 2,25 \cdot 10^{-2} - 1,2 \cdot 10^{-1}$. Для этих двух групп аппроксимируем зависимость (5) двумя прямыми:

Для их залечивания используем режим ВЭИО с двумя линейными ветвями вида (5):

$$q_n = q'_0 \left(1 + \frac{2n\Delta a'}{a_0} \right), \quad n = 0, 1, \dots, 4,$$

где $q'_0 = 0,14 \cdot 10^8$ Дж/м³, $\Delta a'/a_0 = 1,33 \cdot 10^{-2}$.

$$q_n = q''_0 \left(1 + \frac{2(n-5)\Delta a''}{a_0} \right), \quad n = 5, \dots, 9,$$

где $q''_0 = 1,51 \cdot 10^8$ Дж/м³, $\Delta a''/a_0 = 2 \cdot 1,33 \cdot 10^{-2}$.

Изменение единственного параметра предпочтительного режима q_n представлено в табл. 1.

n	$q_n, 10^9$ Дж/м ³
0	0,014
1	0,027
2	0,042
3	0,058
4	0,074
5	0,151
6	0,221
7	0,301
8	0,376
9	0,475
Итого	1,739

Таблица 1. Изменение удельной энергии импульсов q_n в предпочтительном режиме ВЭИО

Результаты и обсуждение Для иллюстрации результатов эксперимента на рис. 3 приведены кривые номинальное напряжение–деформация. В табл. 2 указаны результаты испытаний на разрыв.

С помощью воздействия электромагнитным полем в предпочтительном режиме ВЭИО удалось увеличить показатель средней предельной пластической деформации до разрушения $\bar{\varepsilon}_F$ на 30% (с 24,73% до 32,30%) при незначительном снижении среднего предела прочности $\bar{\sigma}_b$ на 4% (с 0,655 кН/мм² до 0,629 кН/мм²). То есть в результате ВЭИО пластичность материала существенно возрастает при незначительных потерях в прочности материала.

Кроме того, в экспериментах наблюдается снижение показателей стандартного отклонения ε_F на 70% и σ_B на 32% соответственно. Снижение дисперсии говорит о том, что в результате предложенного воздействия ВЭМП пластические свойства образцов стали более предсказуемыми и менее изменчивыми от образца к образцу.

Группа	$\overline{\sigma_B}$, кН/мм ²	$\overline{\varepsilon_F}$, %	s_{σ_B} , кН/мм ²	s_{ε_F} , %	$\sum q_i$, 10 ⁹ Дж/м ³
Обработанные (5 шт.)	0,655	24,73	0,041	7,78	—
Необработанные (5 шт.)	0,629	32,30	0,028	2,29	1,739

Таблица 2. Результаты испытаний на разрыв обработанных ВЭМП и необработанных образцов

$\overline{\sigma_B}$ — средний предел прочности, $\overline{\varepsilon_F}$, % — среднее относительное удлинение, s_{σ_B} — стандартное отклонение предела прочности, s_{ε_F} — стандартное отклонение относительного удлинения, $\sum q_i$ — суммарная удельная рассеянная энергия.

Одной из целей настоящей работы является экспериментальное подтверждение заживления при ВЭИО в предпочтительном режиме микропор и микротрещин в широком диапазоне размеров (от 5 мкм до 250 мкм), образовавшихся в АМ в результате изготовления методом СЛП. До настоящего времени такие экспериментальные подтверждения отсутствовали. При этом объектом исследования являются непосредственно изменения пористости и микроструктуры дефектов АМ.

Для достижения данной цели был проведён анализ микроструктуры изломов (см. рис. 4). Исследование микростроения изломов необработанных образцов показывает, что их микроструктура характеризуется существенной неоднородностью. На изломах необработанных образцов наблюдаются многочисленные микродефекты-несплавления неправильной формы с острыми вершинами, внутри них видны нерасплавленные частицы порошка (рис. 4А). Вокруг этих пустот видны границы ванн расплава. Границы ванн расплава являются предпочтительными путями разрушения при растяжении по вязкому механизму, о чём свидетельствуют равноосные и вытянутые ямки на изломе (рис. 4А). Дефекты неправильной формы служат концентраторами напряжений и способствуют катастрофическому образованию макротрещин, распространяющихся по границам ванн расплава перпендикулярно направлению растяжения. В этом смысле механизм разрушения необработанных образцов имеет квазивязкий характер.

В обработанных образцах изломы отличаются значительной однородностью, с равноосными ямками и глубокими порами овальной формы, что указывает на чисто вязкий механизм разрушения (рис. 4Б).

Таким образом, в результате применения предпочтительного режима ВЭИО изменился механизм разрушения образцов. Если до обработки разрушение было

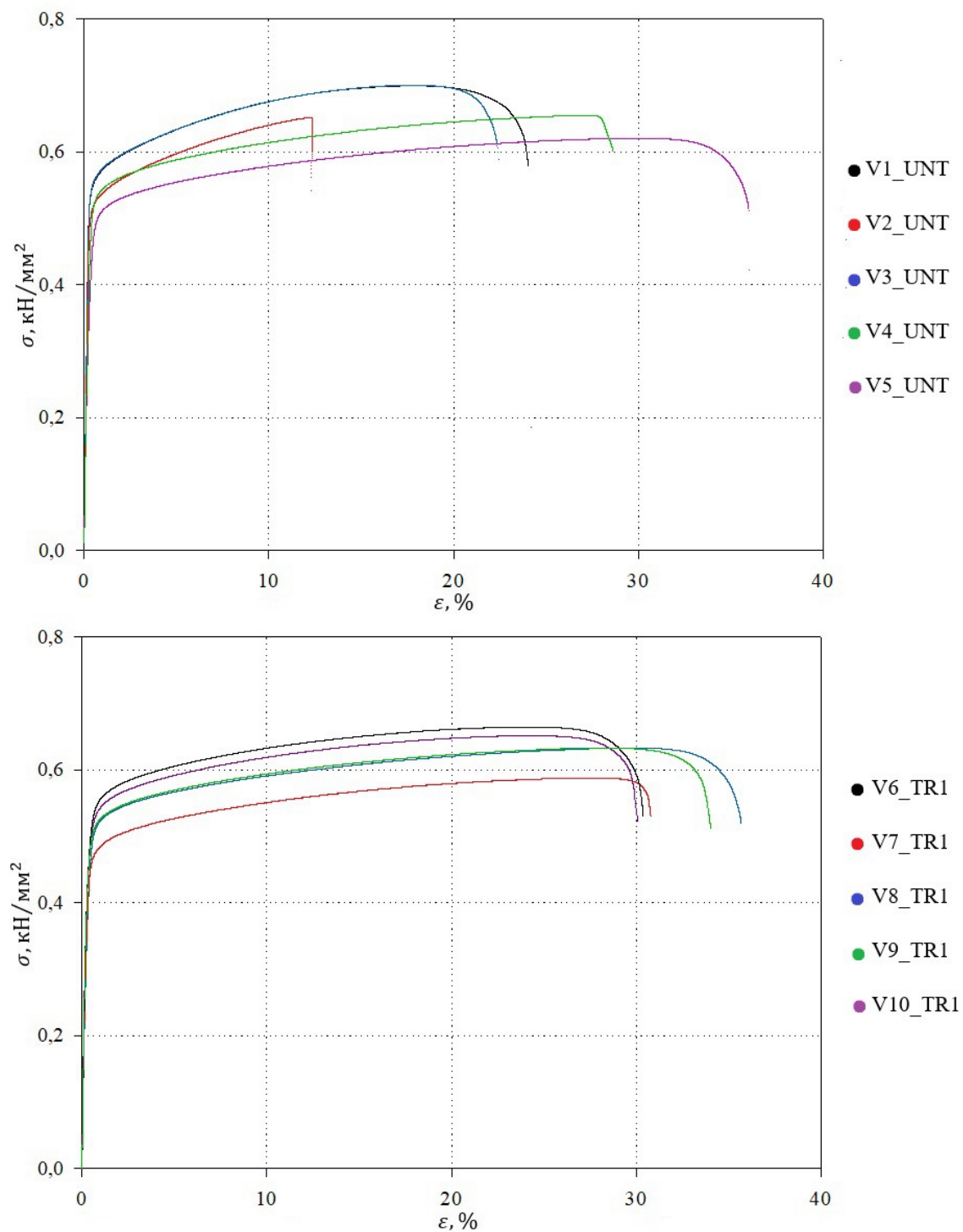


Рис. 3. Кривые номинальное напряжение-деформация необработанных образцов (сверху) и образцов, обработанных ВЭМП (снизу)

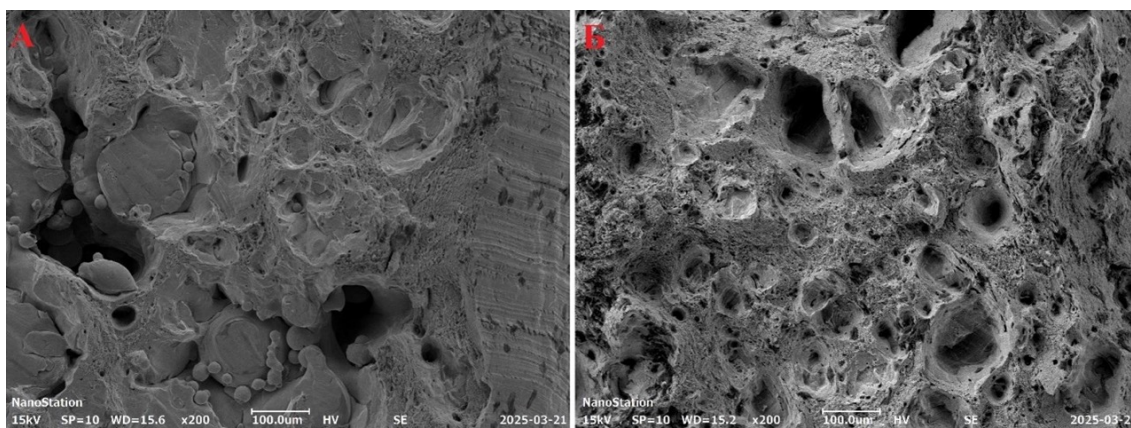


Рис. 4. Типичное микростроение изломов до (А) и после ВЭИО (Б)

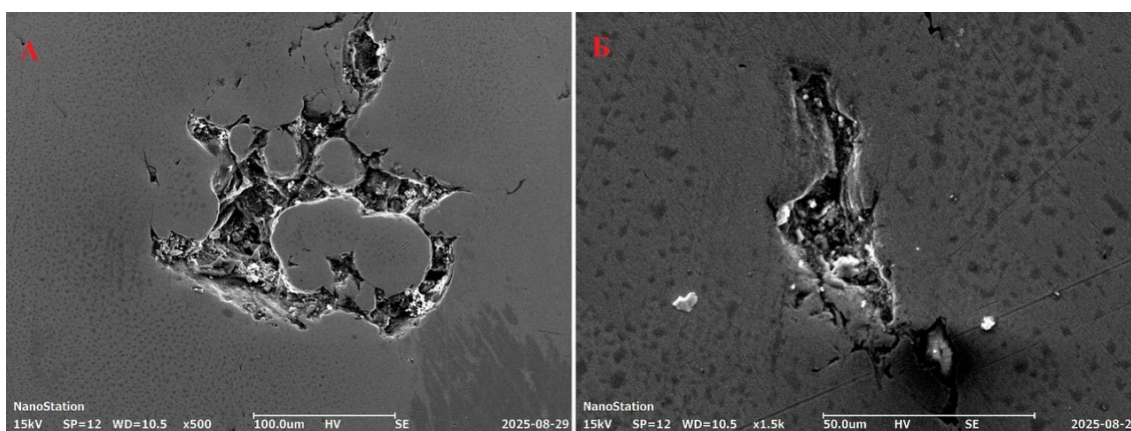


Рис. 5. Типичные внутренние микродефекты в образцах до ВЭИО (А) и после ВЭИО (Б)

квазивязким, то после ВЭИО оно стало чисто вязким. В том числе это связано с уменьшением количества и изменением формы концентраторов напряжений. Данный результат подтверждает, что предпочтительный режим ВЭИО способствует заживлению микродефектов в материале.

Исследование микроструктуры в оптическом микроскопе показало, что в необработанных образцах до ВЭИО содержится множество микродефектов различных форм и размеров: от 0,2 мкм до 250 мкм. Большинство дефектов имеют неправильные формы с острыми вершинами. Типичные формы микродефектов в образцах представлены ранее на рис. 2. Среди них: крупные несплавления (50–250 мкм), крупные поры и трещины (10–50 мкм), мелкие трещины и поры (< 10 мкм), а также газовые поры (0,2–2 мкм). После ВЭИО микродефекты

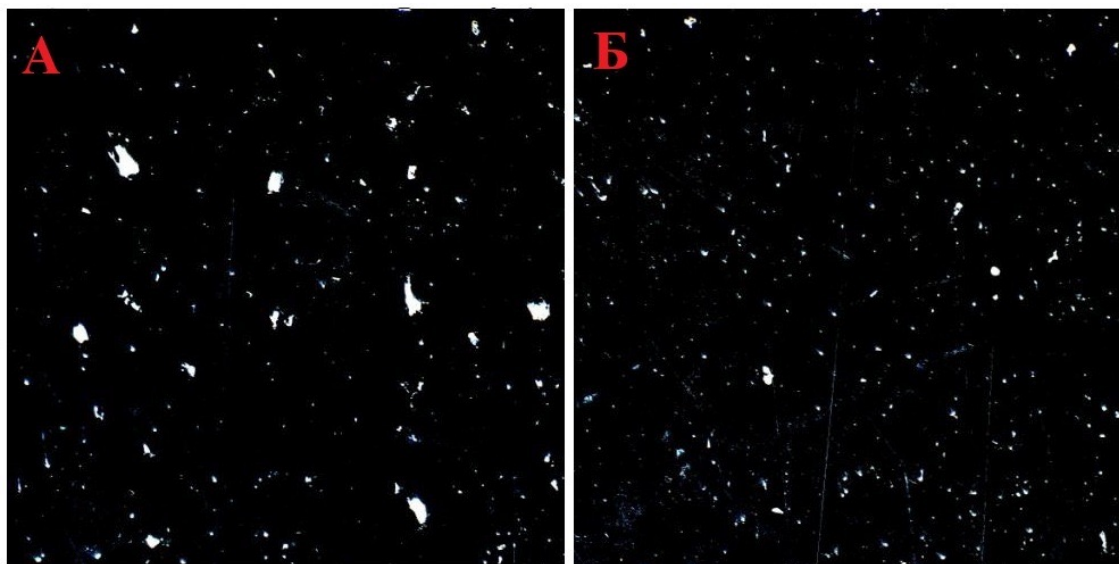


Рис. 6. Панорамные фотографии типичного шлифа, полученные в оптическом микроскопе: (А) до ВЭИО, (Б) после ВЭИО. Размер снимка (тёмного поля) составляет 1825 мкм × 1825 мкм.

существенно изменяются: их формы становятся более гладкими, без острых вершин (см. рис. 5).

Отметим, что после ВЭИО в стали произошли твердотельные фазовые переходы с образованием новой фазы (тёмные пятнышки на светлом фоне на рис. 5А). Тогда как в окрестности дефектов новая фаза отсутствует (светлая область вокруг дефекта на рис. 5Б). По нашему мнению, это свидетельствует о плавлении, произошедшем в окрестности дефекта, и залечивании микродефектов по механизму, описанному во введении.

Возможно предположить, что изменение фазового состава также повлияло на изменение типа разрушения обработанной стали, однако данное утверждение требует дальнейшего исследования.

На рис. 6А показана микроструктура шлифа необработанного образца, а на рис. 6Б — обработанного после ВЭИО. Микродефекты видны как белые области на чёрном фоне. Сравнение рис. 6А и 6Б показывает, что количество и распределение микродефектов существенно различаются. До ВЭИО образец более пористый и содержит больше крупных микродефектов (рис. 6А), тогда как после ВЭИО их количество значительно меньше (рис. 6Б). Визуально заметно, что предпочтительный режим ВЭИО эффективно снижает пористость и количество крупных микродефектов.

Для количественного анализа было использовано открытое программное обеспечение Porosity Calculator Matlab. С помощью Porosity Calculator рассчитывалась пористость по фотографиям поверхностей шлифов, аналогичным показанным на рис. 6. Всего с помощью Porosity Calculator было обработано и

рассчитана пористость на суммарной площади шлифов $9,9 \text{ мм}^2$ сечений образцов до и после ВЭИО (в трёх произвольно выбранных сечениях образцов).

Расчёты пористости показали, что в результате ВЭИО пористость залечилась с 0,93% до 0,63%, т. е. произошло уменьшение пористости на 32%.

Таким образом, проведённые исследования подтверждают, что в результате воздействия ВЭИО при предложенном определении параметров предпочтительного режима в СЛМ-стали 03X16H15M3 происходит залечивание микродефектов. Механизм этого залечивания следующий: при воздействии импульсом ВЭМП в острых вершинах внутренних микротрещин и микропор происходит сильная концентрация электромагнитного поля, интенсивное выделение джоулева тепла в короткий промежуток времени, возникновение сжимающих термических напряжений с одновременным разупрочнением и плавлением металла в этих областях. В совокупности это приводит к тому, что внутренние микротрещины и микропоры изменяют форму, уменьшаются в объёме, а их берега свариваются расплавленным металлом.

Выводы ВЭИО в предложенном предпочтительном режиме способна залечивать микротрещины и микропоры с линейными размерами 5–250 мкм в нержавеющей стали 03X16H15M3, изготовленной методом СЛП. Вследствие залечивания внутренних микродефектов произошло существенное улучшение механических характеристик образцов.

Проведённые исследования показывают, что высокоэнергетическая ЭИО даже при низком качестве печати позволяет улучшить механические характеристики АМ, повысить предсказуемость и уменьшить вариабельность его макроскопического поведения.

Полагаем, ВЭИО обладает большим потенциалом для применения при залечивании внутренних микродефектов и улучшения механических характеристик деталей из АМ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. К. К. Кукуджанов: Автор внёс вклад во все этапы подготовки статьи. Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Источник финансирования. Работа выполнена по теме государственного задания ИП-Мех РАН (номер госрегистрации 124013000674-0).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. K. K. Kukudzhанov: The author contributed to all stages of the study.

Competing interests. The author declares that he has no competing interests.

Funding. The study was supported by the Government program (contract 124013000674-0).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kukudzhанov K. V., Chentsov A. V. The energy of short current pulses required for healing cracks in conductive materials // *Mechanics of Solids*. – 2024. – Т. 59, № 8. – С. 3929–3948. – DOI: 10.1134/S0025654424607031. – EDN: CDXWYM.
2. Noell P. J. Microstructural modification of additively manufactured metals by electropulsing // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Т. 33. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101128. – EDN: RGZJOQ.
3. Xue L., Liao C. Improvement of mechanical properties and corrosion resistance of SLM- AlSi10Mg alloy by an eco-friendly electric pulse treatment // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Т. 439. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140864. – EDN: DFKLCI.
4. Guo H., Liu P. Electroshock treatment dependent microstructural evolution and mechanical properties of near- β titanium alloy manufactured by directed energy deposition // *Materials & Design*. – 2021. – Т. 212. – DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110286. – EDN: NECCVS.
5. Liu C., Yin F. Evolution of grain boundary and texture in TC11 titanium alloy under electroshock treatment // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Т. 904. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.163969. – EDN: BVDPZB.
6. Shijing F., He B. Effect of pulse current density on microstructure of Ti-6Al-4V alloy by laser powder bed fusion // *Metals*. – 2022. – Т. 12, № 8. – DOI: 10.3390/met12081327. – EDN: XZRAFU.
7. Yan X., Xu X. a. A novel electropulsing treatment to improve the surface strength and repair the pore of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Т. 458. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129364. – EDN: CCXPFO.
8. Cai Q., Rodriguez P. R. Crack healing via electropulsing treatment applied to additive-manufactured TiC/316L stainless steel composites // *Materials Letters*. – 2024. – Т. 365. – DOI: 10.1016/j.matlet.2024.136410. – EDN: QWBZJE.
9. Кукуджанов К. К. Обзор исследований по улучшению пластических характеристик аддитивных материалов под действием сильного импульсного тока // *Механика твердого тела*. – 2025. – Т. 60, № 4. – С. 2353–2369. – DOI: 10.1134/S0025654425600114. – EDN: CWZCNG.
10. Кукуджанов К. В. Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2015. – № 4. – С. 138–158. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09. – EDN: VBWYKV.
11. Кукуджанов К. В., Левитин А. Л. Процессы трансформации и взаимодействия микротрещин в металле под воздействием высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2016. – № 2. – С. 89–110. – DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07. – EDN: WBWQAX.
12. Кукуджанов К. В. Моделирование заживления поврежденности металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем // *Письма о материалах*. – 2018. – Т. 8, № 1. – С. 27–32. – DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-27-32. – EDN: YRTPXY.
13. Kukudzhанov K. V., Khalikova G. Healing of long fatigue cracks in steel plates by high-density current pulses // *Mechanics of Solids*. – 2024. – Т. 59. – С. 3223–3234. – DOI: 10.1134/S0025654424605949. – EDN: KGIOUR.

14. Cai Q. New insight into crack-healing mechanism via electropulsing treatment // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2023. – Т. 54, № 7. – С. 2960–2974. – DOI: 10.1007/s11661-023-07073-1. – EDN: DRCNYR.
15. Kukudzhanov K. V., Korznikova. A novel approach to determining the parameters of electric pulse healing of fatigue cracks // Materials Letters. – 2025. – DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139565. – EDN: HYNPQC.
16. Kukudzhanov K. V. Healing of discontinuities in metal by the strong electromagnetic field treatment // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Т. 2817, № 1. – DOI: 10.1088/1742-6596/2817/1/012032. – EDN: DVJXCK.

REFERENCES

1. Kukudzhanov K. V., Chentsov A. V. The energy of short current pulses required for healing cracks in conductive materials // Mechanics of Solids. – 2024. – Vol. 59, no. 8. – P. 3929–3948. – DOI: 10.1134/S0025654424607031. – EDN: CDXWYM.
2. Noell P. J. Microstructural modification of additively manufactured metals by electropulsing // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 33. – P. 101128. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101128. – EDN: RGZJQJ.
3. Xue L., Liao C. Improvement of mechanical properties and corrosion resistance of SLM-AlSi10Mg alloy by an eco-friendly electric pulse treatment // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 439. – P. 140864. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140864. – EDN: DFKLCI.
4. Guo H., Liu P. Electroshock treatment dependent microstructural evolution and mechanical properties of near- β titanium alloy manufactured by directed energy deposition // Materials & Design. – 2021. – Vol. 212. – P. 110286. – DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110286. – EDN: NECCVS.
5. Liu C., Yin F. Evolution of grain boundary and texture in TC11 titanium alloy under electroshock treatment // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 904. – P. 163969. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.163969. – EDN: BVDPZB.
6. Shijing F., He B. Effect of pulse current density on microstructure of Ti-6Al-4V alloy by laser powder bed fusion // Metals. – 2022. – Vol. 12, no. 8. – DOI: 10.3390/met12081327. – EDN: XZRAFU.
7. Yan X., Xu X. A novel electropulsing treatment to improve the surface strength and repair the pore of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 458. – P. 129364. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129364. – EDN: CCXPFO.
8. Cai Q., Rodriguez P. R. Crack healing via electropulsing treatment applied to additive-manufactured TiC/316L stainless steel composites // Materials Letters. – 2024. – Vol. 365. – P. 136410. – DOI: 10.1016/j.matlet.2024.136410. – EDN: QWBZJE.
9. Kukudzhanov K. K. Review of studies on improving plastic properties of additively manufactured materials under strong pulsed current // Mechanics of Solids. – 2025. – Vol. 60, no. 4. – P. 2353–2369. – DOI: 10.1134/S0025654425600114. – EDN: CWZCNG. – (in Russian).
10. Kukudzhanov K. V. Modeling of the effect of a high-energy pulsed electromagnetic field on microcracks in a polycrystalline metal // Vestnik of Perm National Research

- Polytechnic University. Mechanics. – 2015. – No. 4. – P. 138–158. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09. – EDN: VBWYKV. – (in Russian).
11. *Kukudzhanov K. V., Levitin A. L.* Transformation and interaction processes of microcracks in metal under high-energy pulsed electromagnetic field // Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. – 2016. – No. 2. – P. 89–110. – DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07. – EDN: WBWQAX. – (in Russian).
 12. *Kukudzhanov K. V.* Modeling of damage healing in metal by a high-energy pulsed electromagnetic field // Letters on Materials. – 2018. – Vol. 8, no. 1. – P. 27–32. – DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-27-32. – EDN: YRTPXY. – (in Russian).
 13. *Kukudzhanov K. V., Khalikova G.* Healing of long fatigue cracks in steel plates by high-density current pulses // Mechanics of Solids. – 2024. – Vol. 59. – P. 3223–3234. – DOI: 10.1134/S0025654424605949. – EDN: KGIOUR.
 14. *Cai Q.* New insight into crack-healing mechanism via electropulsing treatment // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2023. – Vol. 54, no. 7. – P. 2960–2974. – DOI: 10.1007/s11661-023-07073-1. – EDN: DRCNYR.
 15. *Kukudzhanov K. V., Korznikova E. A.* A novel approach to determining the parameters of electric pulse healing of fatigue cracks // Materials Letters. – 2025. – P. 139565. – DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139565. – EDN: HYNPQC.
 16. *Kukudzhanov K. V.* Healing of discontinuities in metal by the strong electromagnetic field treatment // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2817, no. 1. – P. 012032. – DOI: 10.1088/1742-6596/2817/1/012032. – EDN: DVJXCK.