

К. В. Кукуджанов¹, Г. Р. Халикова^{2,3}, Е. А. Корзникова⁴, А. В. Ченцов^{1,5},
С. В. Дмитриев^{6,7}

ЗАЛЕЧИВАНИЕ ДЛИННЫХ ТРЕЩИН В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х15Г9НД С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

¹ *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

² *Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*

³ *Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия*

⁴ *Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

⁵ *Московский государственный строительный университет, Москва, Россия*

⁶ *Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия*

⁷ *Уфимский государственный нефтяной технологический университет, Уфа, Россия*

Аннотация. Представляется актуальной возможность восстанавливать сплошность металлов и сплавов, залечивая трещины в них с помощью сильных импульсных электромагнитных полей. Это позволяет увеличить надёжность и продлить срок службы материалов и изделий из них. Хотя электроимпульсное воздействие и имеет большое практическое значение, до сих пор не создан метод, который позволил бы залечить наибольший объем (длину) дефекта. Особенно сложно залечивать длинные макротрещины в тонких пластинах путём сварки их краёв с помощью электроимпульсного воздействия. Цель данной работы — изучить возможность подбора режима электроимпульсного воздействия для решения этой задачи. Описан метод, который позволяет залечивать длинные макротрещины в плоских образцах. Он представляет собой многоэтапную электроимпульсную обработку. Благодаря этому методу удалось залечить значительную часть длинной усталостной макротрещины в стальной пластине. Исследования микроструктуры образцов, которые проводились в поперечных сечениях, подтвердили механизм залечивания. Он заключается в сваривании краёв трещины с помощью расплавленного материала. Чтобы это произошло, во время импульса в вершине трещины были одновременно созданы значительные сжимающие напряжения и высокая температура, которая привела к плавлению стали. Эксперименты выявили существенные различия в процессах залечивания по длине макротрещины и по глубине. Тем не менее, качество залечивания улучшалось с увеличением расстояния от поверхности пластины. В области залечивания вдоль краёв трещины можно наблюдать вытянутые зёрна и центральную зону с равноосными зёрнами. Это отражает процесс остывания расплавленной области образца под воздействием импульса тока.

Ключевые слова: электроимпульсное воздействие, трещина, сталь

Кукуджанов Константин Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; e-mail: kconstantin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9060-2838>; AuthorID: 5979

Халикова Гульнара Рашитовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование»; e-mail: gulnara.r.khalikova@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6712-8469>; AuthorID: 222370

Корзникова Елена Александровна, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, профессор, научно-исследовательская лаборатория экстремальных воздействий на металлы и сплавы; e-mail: elenaakorznikova@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849>; AuthorID: 158475

Ченцов Александр Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент; e-mail: chentsov@ipmnet.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4760-1738>; AuthorID: 157206

Дмитриев Сергей Владимирович, доктор технических наук, заведующий лабораторией, профессор, лаборатория компьютерного моделирования, кафедра оборудования и технологий сварки и контроля; e-mail: dmitriev.servey.v@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>; AuthorID: 37154

для цитирования: Кукуджанов К. В., Халикова Г. Р., Корзникова Е. А., Ченцов А. В., Дмитриев С. В. Залечивание длинных трещин в нержавеющей стали 12Х15Г9НД с помощью электроимпульсной обработки // Вестник Чувашия государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2024. № 4(62). С. 16–39. DOI: 10.37972/chgpu.2024.62.4.002 EDN: RBRTDI

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

K. V. Kukudzhanov¹, G. R. Khalikova^{2,3}, E. A. Korznikova⁴, A. V. Chentsov^{1,5},
S. V. Dmitriev^{3,6}

HEALING OF LONG CRACKS IN STAINLESS STEEL 12CH15G9ND USING ELECTRIC PULSE TREATMENT

¹*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

²*Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences, Ufa,
Russia*

³*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*

⁴*Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia*

⁵*Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

⁶*Institute of Molecule and Crystal Physics, UFRS of Russian Academy of Sciences, Ufa,
Russia*

Abstract. It seems relevant to restore the continuity of metals and alloys by healing cracks in them with the help of strong pulses of electromagnetic field. This allows you to increase the reliability and extend the service life of materials and products made from them. Although the electric pulse effect is of great practical importance, a method has not yet been developed that would allow healing the largest volume (length) of the defect. It is especially difficult to heal long macro cracks in thin plates by welding their edges using electric pulse action. The purpose of this work is to study the possibility of selecting an electric pulse mode to solve this problem. A method is described that makes it possible to heal long microcracks in flat samples. It is a multi-stage electric pulse treatment. Thanks to this method, it was possible to heal a significant part of the long fatigue macrofracture in the steel plate. Studies of the microstructure of the samples, which were carried out in cross sections, confirmed the healing mechanism. It consists in welding the edges of the crack using molten material. In order for this to happen, the significant compressive stresses and high temperatures were simultaneously created at the crack tip during the pulse, which led to the melting of the steel. Experiments have revealed significant differences in the healing processes along the length of the macrofracture and in depth. However, the healing quality improved with increasing distance from the plate surface. In the healing area, elongated grains and a central zone with equiaxed grains can be observed along the edges of the crack.

Keywords: crack healing, steel, high density electric pulse.

Konstantin V. Kukudzhanov, Cand. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher;
e-mail: kkonstantin@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-9060-2838>; AuthorID: 5979

Gulnara R. Khalikova, Cand. Tech., Senior Researcher, Assoc. Prof.;

e-mail: gulnara.r.khalikova@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-6712-8469>; AuthorID: 222370

Elena A. Korznikova, Doc. Sci. Phys. & Math., professor, Leading Researcher, Assoc. Prof.;

e-mail: elenaakorznikova@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-5975-4849>; AuthorID: 158475

Chentsov Alexander Viktorovich, Cand. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher, Assoc. Prof.;

e-mail: chentsov@ipmnet.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-4760-1738>; AuthorID: 157206

Sergey V. Dmitriev, Doc. Tech., Professor; e-mail: dmitriev.sergey.v@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>; AuthorID: 37154

to cite this article: Kukudzhanov K. V., Khalikova G. R., Korznikova E. A., Chentsov A. V., Dmitriev S. V. Healing of long cracks in stainless steel 12Ch15G9ND using electric pulse treatment // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2024. No 4(62). p. 16–39. DOI: 10.37972/chgpu.2024.62.4.002 EDN: RBRTDI

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

Введение. Износ конструкционных материалов часто является результатом воздействия внешних факторов, которые могут привести к образованию микро-, мезо- и макротрещин, что в конечном итоге приводит к разрушению [1–3]. Такие разрушения могут иметь серьезные последствия, включая аварии и значительные материальные потери. Разработка методов залечивания трещин потенциально может повысить надежность и продлить срок службы конструкционных материалов и изделий из них. Изучение процесса залечивания дефектов в материалах представляет значительный интерес для исследователей [4, 5]. Понимание механизмов залечивания, очевидно, будет способствовать разработке оптимальных практических методов их залечивания. В этой области проведен ряд исследований, в частности, в отношении залечивания трещин в биоматериалах, полимерах и керамических материалах [6, 7], где использовались различные методы, включая нанесение плазменного покрытия [8, 9]. Тем не менее, устранение трещин в металлических материалах является значительно более трудоемким процессом, чем в других материалах, из-за высокой прочности металлических связей и низкой скорости диффузии атомов в металлах [10].

В настоящее время наиболее распространенными методами устранения микротрещин в металлах и сплавах является термическая и термомеханическая обработка [11]. Однако эти методы имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что они приводят к ухудшению механических свойств металла, что связано с ростом зерен и другими эффектами, возникающими при повышенных температурах [12, 13]. Кроме того данные методы очень трудо- и энергозатратны и позволяют залечить только микроскопические трещины [14].

Альтернативой термической и термомеханической обработке является метод воздействия на материал постоянным или импульсным электрическим током. Если действие постоянного тока зачастую эквивалентно классической термообработке (отжигу), то воздействие на металлы и сплавы короткими интенсивными импульсами электрического тока улучшает их пластические и вязкостные характеристики, повышает их коррозионную стойкость и одновременно приводит к устранению (залечиванию) дефектов в материалах [15–18]. Уверенный рост интереса к использованию сильных импульсных электромагнитных полей в качестве средства (залечивания) как макротрещин, так и распределенных микродефектов в металлических материалах наблюдается в последнее время [5, 15, 19–28].

В общем случае, механизм залечивания дефектов в металлах основан на явлении концентрации электрического поля в вершинах дефектов в проводящих материалах, индуцировании электромагнитным полем тока высокой плотности в вершинах дефектов, рассеивании электромагнитной энергии в тепло в материале, локальном быстром повышении его температуры, температурном расширении материала в окрестности вершины, возникновении механических напряжений в вершине сжимающих берега трещины, плавлении, испарении (при определенных условиях) материала в вершине трещины, и как следствии, сварке берегов макротрещин.

Однако окончательный консенсус исследователей с этим механизмом еще предстоит достичь. В литературе [5, 19, 20, 29, 30] можно встретить разные мнения относительно механизмов сварки макротрещин в плоских образцах. Начиная от возникновения в вершине трещины низкотемпературной плазмы и перемещений атомов сплава и до некой «энергизации» (диффузии/плавления). Естественно, что в таких условиях, не сформировалось понимания, как подобрать режим сильного электроимпульсного воздействия, который позволял бы залечить наибольший объем трещины.

Вышеописанный механизм залечивания макротрещин в плоских образцах не зависит от метода индуцирования электрического тока в материале (контактного посредством присоединения электродов к образцу [15, 21, 25, 26, 31, 32] или индукционного посредством возбуждения в проводнике вихревых токов [27, 28]. В контактном методе при больших напряжениях всегда имеются существенные потери энергии в неидеальных контактах за счет возникновения дуговых разрядов. Индукционный метод возбуждения тока сложнее реализовать, он обходится дороже, чем контактный, поэтому применяется реже.

Впервые на возможность залечивания макротрещин в пластинах из черных и цветных металлов сильными импульсами электрического тока обратили внимание советские исследователи, начав изучать потенциальное использование этого эффекта со второй половины 1970-х годов [33–35].

В работе [29] был разработан метод залечивания длинных усталостных трещин в пластине из нержавеющей стали с помощью воздействия электрическим полем. Ток индуцировался в образце с помощью контактных электродов, расположенных в непосредственной близости друг от друга и от берегов трещины, а берега (фронт) трещины обрабатывались специальным составом, что облегчало их сварку. Эксперименты показывают, что такое воздействие на макротрещину привело к её залечиванию по всей длине путем образования перемычек между берегами (краями) трещины.

Исследование [5] представляет собой пример успешного залечивания короткой макротрещины усталостного происхождения в полосе из нержавеющей стали с помощью разработанного авторами двухэтапного режима воздействия импульсами тока. Отметим, что до этого не удавалось достичь такого качества залечивания усталостной макротрещины по всей её длине. Определение оптимальных параметров электроимпульсного воздействия, способного обеспечить сварку берегов трещины и одновременно предотвратить испарение металла и образование кратеров (отверстий) в вершинах макротрещин в пластинах, представляет собой очень трудоемкую задачу [5]. Образование кратера будет препятствовать закрытию трещины и сварке её берегов, а в некоторых условиях может привести к выходу изделия из строя (пример отрицательного результата электроимпульсного воздействия). Это явление было, в частности, рассмотрено в [5], где при высокой плотности тока и большом количестве импульсов в вершине макротрещины формировался высокий температурный градиент с

большим радиусом нагрева, что приводило к обильному плавлению, испарению, разупрочнению материала в окрестности вершины трещины и изменению формы её берегов, что, в свою очередь, не приводило к закрытию трещины и её сварке.

Основываясь на вышеупомянутых исследованиях, можно сделать вывод о том, что возможен подбор режимов воздействия импульсным электромагнитным полем, которые приведут к залечиванию макротрещин в металлах и сплавах при сохранении целостности микроструктуры в образце и улучшении его механических характеристик за счет сварки берегов дефекта. При этом важно выбрать оптимальные режим или режимы электроимпульсной обработки (амплитуды, формы и длительности импульсов тока, их повторяемость (количество, коэффициент заполнения) и т.д.) для данного материала, чтобы обеспечить максимальную длину залечивания (заваривания) макротрещины и одновременно предотвратить испарение или образование кратеров в пластинах, препятствующее закрытию трещины и сварке её берегов.

Следует отметить, что помимо режима воздействия электромагнитным полем, на успех залечивания макротрещин в плоских образцах существенное влияние оказывает геометрия трещины и образца, а также способ его закрепления и способ присоединения электродов (если речь идет о контактном методе). Особую сложность представляет залечивание длинных макротрещин в тонких пластинах. Исследованию такого случая посвящена настоящая работа.

Выше сообщалось, что залечивание длинных макротрещин в тонких пластинах представляет особую сложность. Упрощенно данную ситуацию можно объяснить следующим образом.

Длинными трещинами в плоском образце будем считать трещины, длина a которых больше толщины пластины h , $a > h$ (конечно, при условии что $h \ll W$ и L , где W , L – ширина и длина пластины, иначе образцы нельзя считать плоскими). При этом длину трещины следует считать от края пластины, т.е. включая вырез.

И наоборот, короткими считаются трещины, для которых $a < h$.

В первом случае (длинных трещин) можно приближенно считать, что в пластине в окрестности трещины реализуется плоское напряженное состояние. Во втором случае (коротких трещин) можно приближенно считать, что в полосе в окрестности трещины реализуется плоское деформированное состояние. Как сообщалось выше, залечивание макротрещин начинается в вершине, а для заваривания её берегов требуется, чтобы во время прохождения импульса в ней одновременно возникали значительные сжимающие напряжения (чтобы сблизить берега трещины в вершине) и плавление металла в вершине (чтобы сомкнутые берега трещины не разошлись после релаксации температуры). Если это одновременно происходит, тогда будем считать, что за один импульс залечивается (заваривается) небольшой участок трещины Δa в вершине. Предположим для простоты, что при каждом повторном импульсе залечивается одинаковый по длине участок трещины Δa (что обычно не соответствует экспериментам),

тогда через N импульсов длина трещины уменьшится до $a - N \cdot \Delta a$, а длина залечивания соответственно составит $a_1 = N \cdot \Delta a$. Таким образом, залечивание трещины в пластине – это динамический (постепенный) процесс перемещения новой вершины трещины вдоль её фронта от первоначальной вершины к вырезу. Подбор параметров импульса для достижения оптимальной величины Δa на каждом этапе залечивания представляется актуальной задачей.

Очевидно, что при одинаковой рассеянной электромагнитной энергии в материале в случае плоского напряженного состояния сжимающие напряжения в вершине будут меньше, чем сжимающие напряжения в случае плоского деформированного. Кроме того, результаты нашего моделирования по воздействию импульсом тока на длинную трещину в пластине [36] показывают, что плотность тока, нагрев и тепловое расширение внутри пластины (вблизи её срединной плоскости) оказываются выше, чем вблизи её поверхности (численное моделирование проводилось при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой). Поэтому в толстых пластинах (полосах) подобрать нужную плотность тока оказывается проще и трещина залечивается по глубине z качественнее (в смысле отсутствия в залеченной области большого количества несплошностей) и быстрее, чем в тонких. По этим же причинам залечивание в среднем происходит лучше внутри пластины (вблизи её срединной плоскости) нежели вблизи её поверхности. Авторы полагают, что проведение залечивания по всей длине короткой трещины в полосе в работе [5] ($h/a=5,0/3,32=1,51$), объясняется данными причинами. Приведенные в [5] томограммы сечений пластины в зависимости от глубины z подтверждают, что качество залечивания улучшается с глубиной и достигает максимума вблизи срединной плоскости пластины. Чем толще пластина и больше отношение h/a , тем ближе состояние в её вершине к плоской деформации и тем лучше будет залечиваться трещина в толще пластины.

Заметим, что при рассматриваемых временах воздействия можно обоснованно пренебречь конвекцией, но всё же имеет место лучистый теплообмен. Из-за лучистого теплообмена в приповерхностных слоях материала нагрев происходит медленнее, а релаксация температуры – быстрее, чем внутри. Это приводит к большей неоднородности температурного поля по глубине, меньшему тепловому расширению материала вблизи поверхности и, как следствие, меньшим сжимающим напряжениям в вершине вблизи поверхности, что также может приводить к ухудшению залечивания (заваривания) берегов трещины в приповерхностных слоях.

1. Материал и методика эксперимента. В качестве материала исследования служила нержавеющая сталь марки 12X15Г9НД (ближайший американский аналог an austenitic chromium nickel-manganese stainless steel- AISI201). Данная сталь является более экономичным вариантом/заменителем дорогостоящих хромоникелевых высоколегированных сталей. Образцы для исследований были вырезаны из промышленной ленты в состоянии поставки. Из ленты вырезались пластины размером $120,0 \times 18,2 \times 0,7$ мм. В пластинах на расстоянии

60мм от одного из концов электроискровым методом делался краевой вырез $0,3 \times 2,0 \times 0,7$ мм с закругленной вершиной (кончиком). Далее вырезанные пластины подвергались усталостным нагрузениям, методика которых приведена в более ранней работе авторов [37]. В результате от выреза в пластине прорастали (формировались) длинные усталостные макротрещины, имеющие длины 5,75-8,85 мм (рис. 1). Таким образом, вершина трещины находилась от края пластины на расстоянии 7,8-9,9 мм.



Рис. 1. Вид образца в области пророщенной длинной усталостной трещины. Система координат, XY – в плоскости пластины

Для оценки возможности заживания макротрещины путем воздействия на неё импульсным электромагнитным полем к образцам, жестко зафиксированным в медных зажимах-электродах, подводился импульсный ток. Расстояние между электродами составляло 38мм. Трещина располагалась посередине между электродами. Электроимпульсная обработка образцов проводилась с помощью генератора импульсного электромагнитного поля ГИТ-20-40 на специально разработанной лабораторной установке, схематично показанной на рис. 2(а). С помощью установки в образцах индуцировались импульсы тока с формой импульса, показанной на рис. 2(б). Таким образом, в наших экспериментах направление вектора плотности тока на электродах было перпендикулярно фронту (берегам) трещины, т.е. ток был направлен вдоль оси Y. Блок управления генератора настраивает параметры блока заряда в режиме заряда и замыкает его на батарею конденсаторов. В режиме разряда, как показано на схеме, батарея конденсаторов замкнута в цепь с образцом через газовый разрядник. Как только с блока управления на разрядник поступает импульс поджига, батарея

конденсаторов начинает разряжаться через зажимы-электроды и образец, до прерывания цепи разрядником.

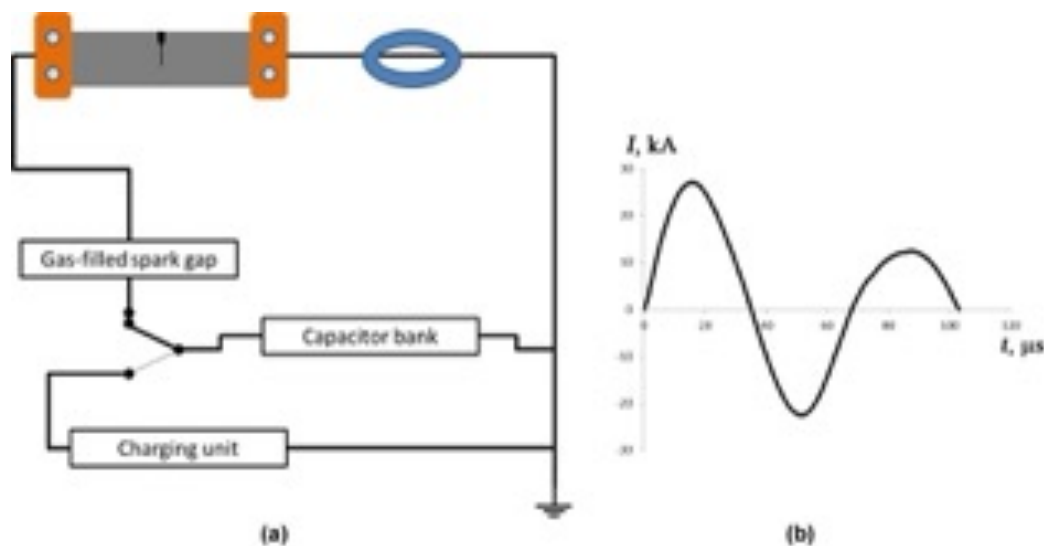


Рис. 2. Схема лабораторной установки (а), типичная форма импульса тока в образце (б)

Максимальный положительный ток в импульсах варьировался в широком диапазоне от 2,6 до 28,2 кА (плотность тока от 179 до 1937 А/мм²), а максимальный отрицательный ток - от -1,6 до -17,7 кА (плотность тока от -110 до -1216 А/мм²). Период по времени поддерживался в диапазоне 69-74 мкс (частота \sim 13,3 кГц). Промежуток времени между импульсами 60 сек.

С целью подобрать опытным путем оптимальный режим электроимпульсного воздействия к образцам прикладывались как одиночные импульсы тока одинаковой плотности, так и серии (последовательности одинаковых по максимальной амплитуде) импульсов с изменяющейся плотностью тока и повторяемостью. Возникновение локальных деформаций в области трещины или искровой пробой на её берегах контролировались оптическими микроскопами.

После пропускания импульсов поверхность пластины с двух сторон исследовалась на оптическом микроскопе Zeiss Axio Imager.D1m в дифференциально – интерференционном контрасте при увеличениях от x100 до x2000 на предмет оценки заваривания берегов трещин и геометрии (длины и ширины) залеченной области.

Исследование микроструктуры в исходном состоянии и после электроимпульсной обработки проводили со стороны поперченного сечения образцов (плоскость ZY). Кроме того, после электроимпульсной обработки анализ микроструктуры осуществляли в сечении пластины, сделанном в области новой вершины залеченной усталостной трещины (сечение А-А, рис. 3).

Детальное исследование микроструктуры и electron backscatter diffraction (EBSD) анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ)

TESCAN MIRA при ускоряющем напряжении 20 кВ. Статистический анализ данных, в том числе оценка среднего размера зерен, был проведен с использованием встроенного программного пакета «CHANNEL 5.0» при доверительной вероятности 95%. Карты EBSD для каждого состояния материала были получены с шагом сканирования 0,3 мкм, максимально допустимая ошибка в определении ориентировки составила 2°. Число линий Кикучи, используемых для индексации дифракционных картин, составляло не менее 5. Чтобы повысить надежность полученных EBSD данных при анализе кристаллографической разориентировки зерен, области, состоящие из пяти точек и менее, удалялись как ненадежные [38]. На полученных картах разориентаций различные кристаллографические ориентировки показаны различными цветами. Границы с разориентировками от 2 до 15° считались малоугловыми (LABs), а с разориентировками более 15° - высокоугловыми границами (HABs); двойниковые границы $\Sigma 3$ обозначены как ТВ. Количественный анализ структур проводили согласно рекомендациям (ГОСТ 21073.0-75). За размер зерна принимался эквивалентный диаметр без учета двойниковых границ.

2. Результаты экспериментов. В результате экспериментов для длинной трещины ($h/a=0,7/7,75=0,11$) был применен режим электроимпульсной обработки, параметры которой приведены в Таблице 1. Обратим внимание, что данные параметры отличаются по существу от приведенных в работе [5], в которой воздействие осуществлялось в два этапа (серии по 20 и 30 импульсов) с одинаковыми параметрами импульса, тогда как в нашем случае этих этапов оказывается 6 (это подтверждает вышеописанный механизм постепенного залечивания макротрещин в пластинах), с изменяющимися на каждом этапе параметрами импульса.

На последнем этапе в новой вершине трещины образовался кратер (рис. 3). Образование кратера подтверждает, что в области вдоль фронта трещины от её первоначальной вершины и до кратера проводимость материала между берегами трещины восстановлена, а трещина залечена. Необходимо отметить, что воздействие на длинную трещину импульсами (сериями импульсов) с плотностями тока порядка 10^3 А/мм² и длительностями более 500 мкс [5, 26, 31, 32, 39] приводит к образованию кратера в первоначальной вершине трещины и исключает дальнейшее заваривание её берегов.

При выбранном режиме воздействия удалось залечить 520 мкм усталостной трещины (при первоначальной длине – 5750 мкм), отсчитывая от её первоначальной вершины, что составляет 9,0% от первоначальной длины трещины. Хотя процент залечивания не велик, тем не менее, учитывая, что трещина длинная, абсолютная длина залечивания сопоставима с длинами залечивания трещин в [5, 19–21, 25–28, 31, 32, 39], которые составляли от 260 мкм до 1350 мкм. Исключение составляют работы [29, 30], в которых длина залечивания самой длинной трещины составила 2250 мкм. Однако прямое сравнение этих длин залечивания не корректно, поскольку в [29, 30], в отличие от настоящей работы, для облегчения залечивания были созданы специальные условия, а именно -

до воздействия током берега трещины были очищены от окислов и обработаны специальными никельсодержащими составами, а контактные электроды были подсоединены, так чтобы ток протекал вдоль всего фронта трещины в противоположных направлениях. В наших экспериментах берега трещины специально не подготавливались, а ток протекал перпендикулярно фронту (берегам) трещины (вдоль оси x), что затрудняло процесс залечивания.

Таблица 1. Условия электроимпульсного воздействия.

№ этапа воздействия	Максимальная плотность тока в импульсе Положительная/ Отрицательная (кА/мм ²)	Количество импульсов за этап	Длительность импульса (мкс)	Частота (кГц)
1.	179/-110	2	111	13,3
2.	211/-133	2	110	13,3
3.	453/-283	2	109	13,3
4.	1190/-556	3	107	13,3
5.	1383/-865	3	106	13,3
6.	1937/-1216	1	103	13,3

На рис. 4 видно, что заваривание берегов трещины на поверхности происходило местами, путем образования перемычек между берегами трещины, эти места обведены на рисунке кружками. В данных местах вблизи берегов трещины появились области с мелким зерном. Это новые зёрна, которые возникли после релаксации температуры и быстрой кристаллизации расплава. Вдали от трещины видны большие зёрна исходной микроструктуры стали. Исследование микроструктуры показало, что электроимпульсная обработка образца привела к частичному расплавлению материала по берегам усталостной трещины за счет концентрации электромагнитного поля в её новой вершине, поэтапному заполнению трещины расплавом и кристаллизации расплавленного материала.

Заваривание трещины лучше происходит внутри пластины и соответственно хуже на поверхности. Подтверждение этого факта выявлено экспериментально. Полностью заваренные участки трещины можно увидеть, если сошлифовать часть материала с поверхности вглубь по оси z или сделать разрез в области кратера (сечение А-А на рис. 3 (b)) пластины плоскостью перпендикулярной фронту трещины. Микроструктура материала в этом сечении показана на рис. 2.

На этом рисунке стрелками обозначены незалеченные участки трещины вблизи поверхности пластины. А также полностью залеченные - в глубине образца. Отсюда следует, что постепенное залечивание трещины происходит внутри образца, в то время как незалеченные участки трещины, выходящие на поверхность пластины, сохраняются. Наблюдается сильная неоднородность залечивания трещины по толщине пластины.

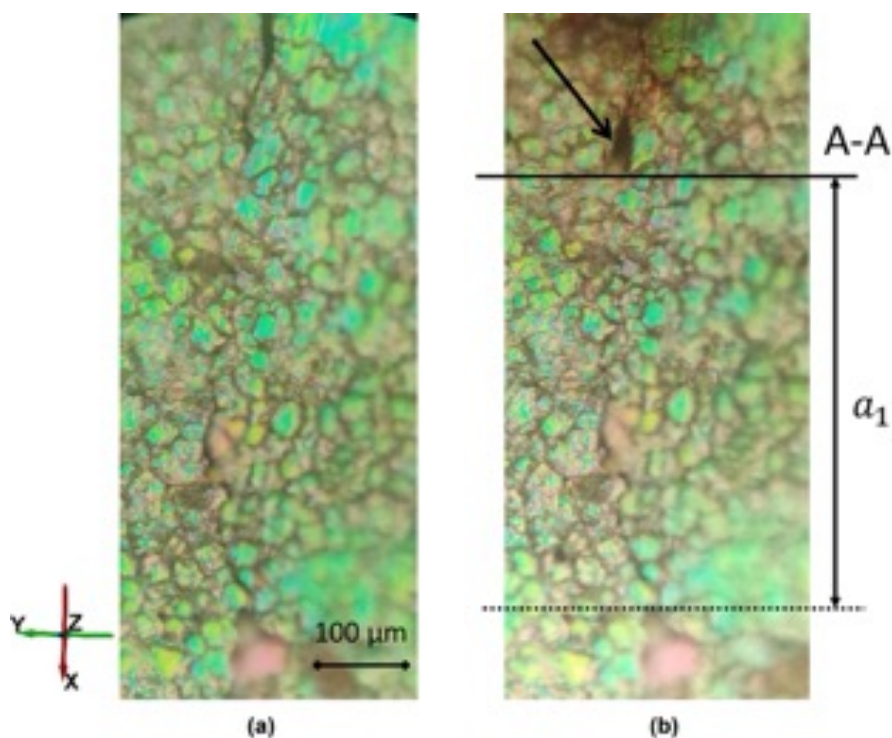


Рис. 3. Микроструктура на поверхности пластины в области залеченной трещины до электроимпульсной обработки (а) и после электроимпульсной обработки (b) (оптическая микроскопия). Стрелкой показан кратер (отверстие) в пластине, образовавшийся в результате электромагнитного воздействия

Поскольку разрез был сделан в области кратера, на нем видно оплавленное отверстие в области срединной плоскости пластины, в которой во время прохождения импульса имеет место максимальный нагрев, и, как следствие, происходит плавление и испарение материала в новой вершине, сопровождаемые выбросом расплавленного металла вдоль фронта трещины (подобный эффект наблюдался в работе [40]). Сила Лоренца в вершине направлена в сторону прямо противоположную направлению выброса, поэтому полагаем, что данное отверстие является результатом взрыва (из-за быстрого испарения материала во время прохождения импульса) в вершине трещины, в процессе которого окружающий расплавленный металл выбрасывается из вершины внутрь трещины. После взрыва и образования отверстия происходит достаточно быстрое последующее остывание окружающего материала за счет теплопроводности. Образование кратера существенно увеличивает радиус кривизны в вершине трещины и уменьшает плотность тока и концентрацию механических напряжений.

Квадратом на рис. 5 выделена залеченная область, для которой проводился анализ микроструктуры методом EBSD, см. рис. 8.

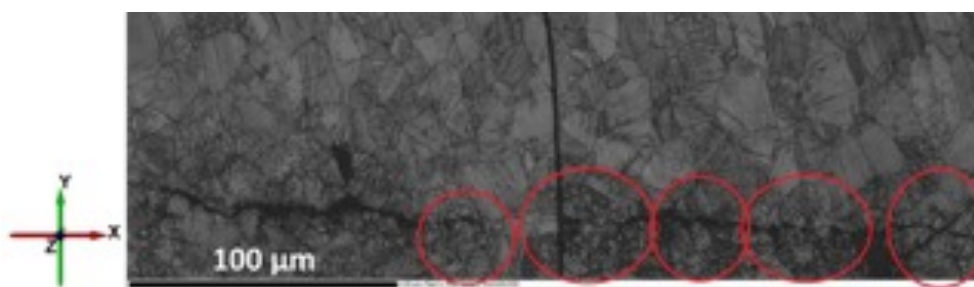


Рис. 4. Микроструктура на полированной поверхности пластины в области залеченной трещины после электроимпульсной обработки (контраст изображения иллюстрирует качество картин Кикучи в EBSD анализе: в более темных областях информации для определения разориентировок кристаллов недостаточно). Кружками обведены области с мелким зерном, в которых берега трещины оказались залечены закристаллизованным расплавом - образовались перемычки



Рис. 5. СЭМ микроструктура в поперечном сечении пластины после электроимпульсной обработки (BSE режим съемки). Стрелками показаны незалеченные участки усталостной трещин вблизи поверхности пластины. Квадратом выделена залеченная область, в которой проводился EBSD анализ

Исходная микроструктура в состоянии поставки представляет собой рекристаллизованные аустенитные зерна, близкие к равноосным (рис. 6). В этих зернах можно наблюдать единичные малоугловые границы и большое количество двойников деформации (рис. 6(b)), доля которых составляет $f_{TB}=29\%$ (рис. 6(c)). Также видно, что структура неоднородная и имеет бимодальный характер распределения зерен по размерам с локальными максимумами при 0,75 мкм и 24,5 мкм, причем основное количество зерен составляют зерна с размерами более 3 мкм (рис. 6). При этом средний размер зерен составляет 13.8 ± 0.6 мкм. На карте локальной разориентировки наблюдается цветовой контраст, который можно отнести к деформированному состоянию (рис. 6(d)).

На рис. 8 представлены результаты проведенного EBSD анализ для залеченной области, отмеченной квадратом на рис. 5. Видно, что по обеим сторонам от залеченной трещины (области А на рис. 8(a)) наблюдаются участки с развитой

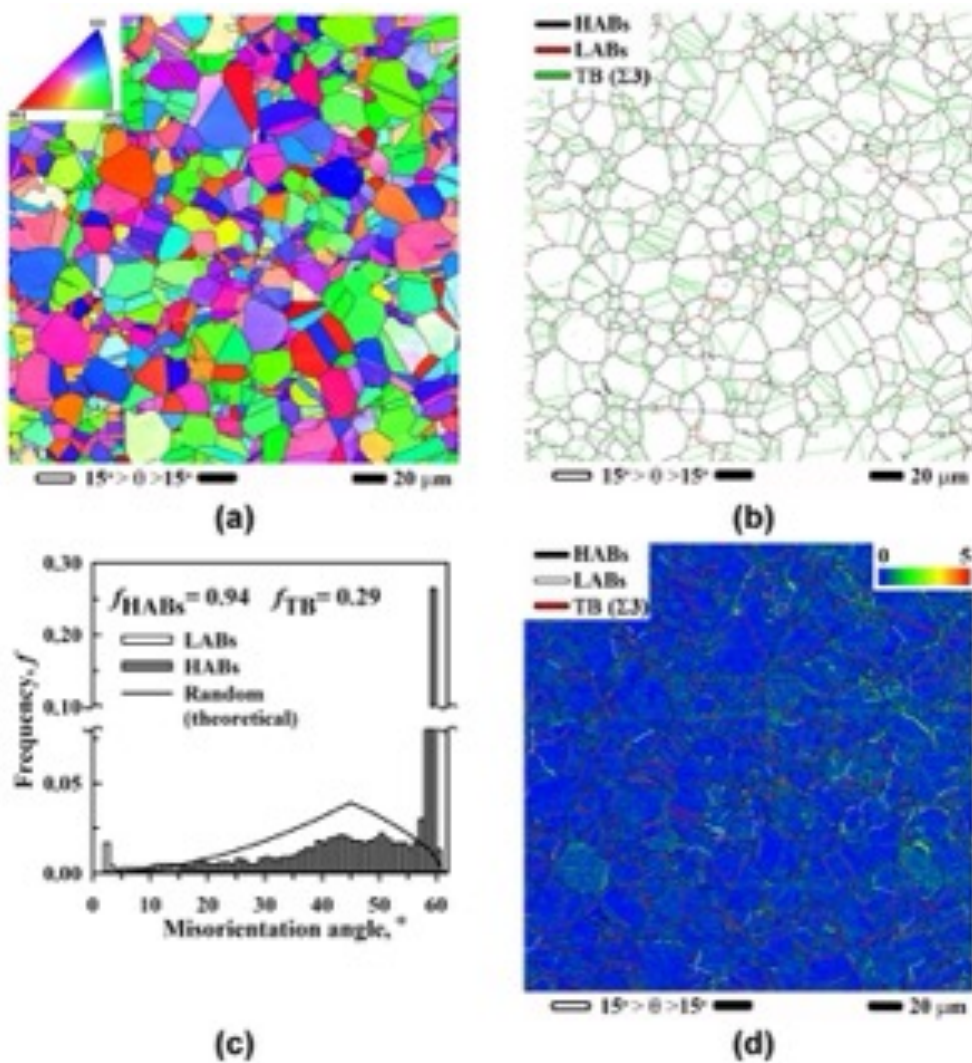


Рис. 6. Микроструктура стали AISI201 в исходном состоянии: ориентационная карта в цветах обратной полюсной фигуры (а), карта распределения границ по углам разориентировки (б), гистограмма распределения границ по углам разориентировки (с), карта локальной разориентировки (цвет, согласно приведённой шкале, показывает угол разориентировки для малоугловых границ, менее 5°) (д)

субструктурой внутри исходных аустенитных зерен (по сравнению с исходным состоянием доля HABs уменьшается с $f_{\text{HABs}}=94\%$ до $f_{\text{HABs}}=63\%$); в этих областях на картах локальной разориентировки зерен преобладает зелёный цвет, см. рис. 8(с). Кроме того, уменьшается доля двойниковых границ по сравнению с исходным состоянием (рис. 9(а)).

После электроимпульсной обработки (на месте усталостной трещины) формируется неоднородная мелкозернистая микроструктура кристаллизационного

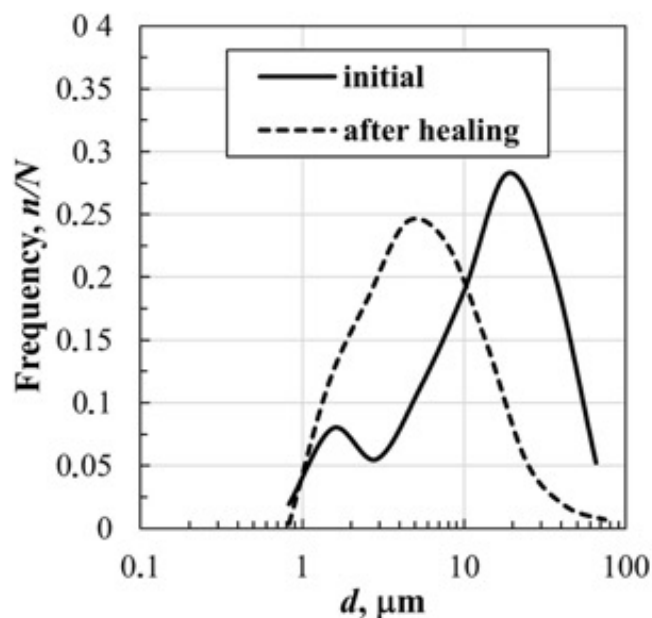


Рис. 7. Гистограммы распределения зерен по размерам в исходном состоянии и в области залеченной трещины после электроимпульсной обработки

происхождения (рис. 8). Наблюдается шлейф из преимущественно вытянутых в направлении залеченной трещины зерен по обоим берегам трещины и структура, близкая к равноосной, в центре залеченной трещины между шлейфами с вытянутыми зернами. Однако, несмотря на качественную неоднородность микроструктуры в зоне залеченной трещины, распределение зерен по размерам близко к нормальному (рис. 7). При этом средний размер зерен в области залеченной трещины составляет 6.1 ± 0.4 мкм. Внутри аустенитных зерен кристаллизационного происхождения наблюдаются единичные малоугловые границы (при этом доля HAVs остается на высоком уровне, $f_{\text{HAVs}} = 83\%$) и небольшое количество двойников роста, доля которых составляет $f_{\text{TB}} = 15\%$ (рис. 9(b)). При этом значимого цветового контраста на картах локальной разориентировки зерен в этой области не наблюдается (рис. 8(c)). Наблюдаемые в залеченной области по берегам трещины зона шлейфа с вытянутыми и центральная зона с равноосными зернами свидетельствует о постепенном остывании расплава в трещине. Наличие такой микроструктуры в залеченной области подтверждает, что берега трещины были сварены в результате электроимпульсного воздействия в соответствие с вышеописанным механизмом.

Таким образом, в области залеченной трещины образуется улучшенная микроструктура, которая является результатом рассматриваемого воздействия импульсным током, что благоприятно скажется на механических характеристиках материала в этой области.

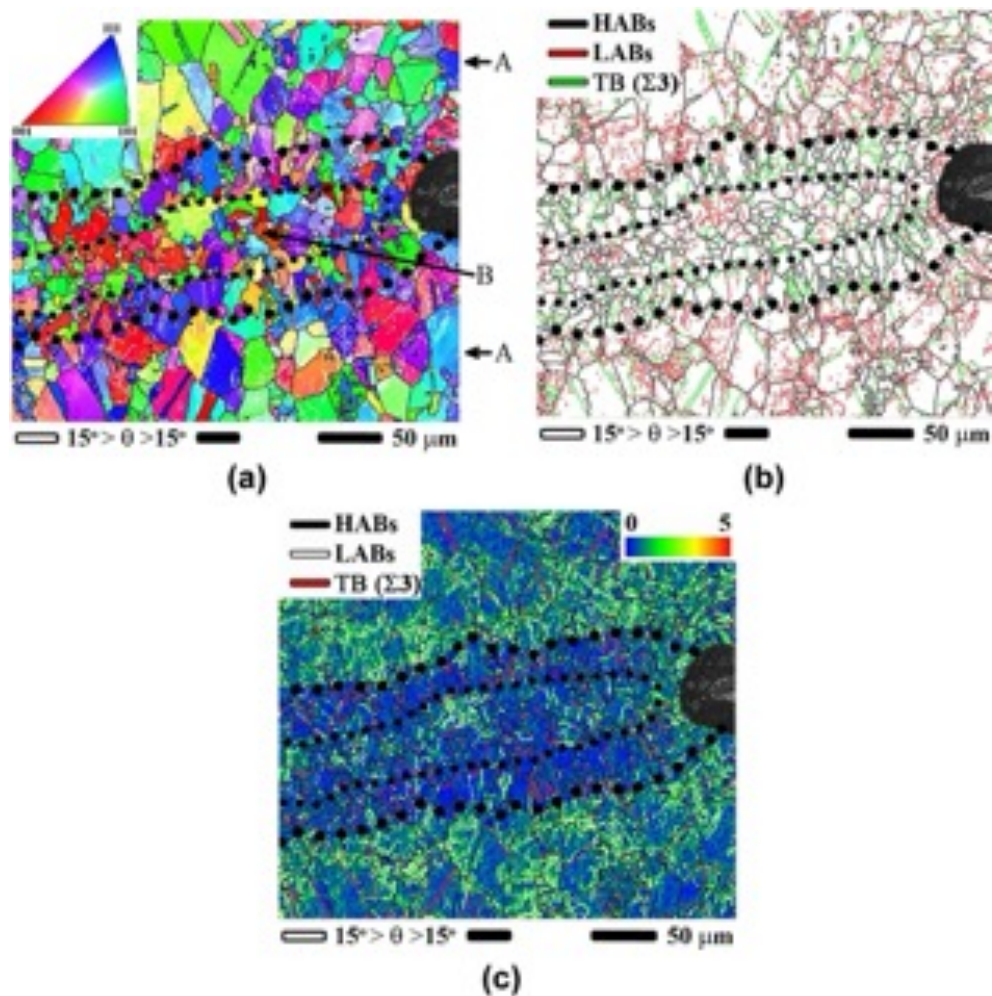


Рис. 8. Результаты EBSD анализа для залеченной области. Черными точками выделены зоны залеченной трещины, иллюстрирующие шлейф с вытянутыми зернами по берегам трещин и центральную область с зернами, близкими к равноосным. Показаны ориентационная карта в цветах обратной полюсной фигуры (а), карта распределения границ по углам разориентировки (b), карта локальной разориентировки (с)

В остальном объеме образца (за исключением залеченной области) сохраняется исходная микроструктура стали, которая в результате электромагнитного воздействия практически не изменилась.

Выводы. Залечивание трещин в металлических изделиях посредством заваривания их берегов в результате электроимпульсной обработки представляет значительный интерес, поскольку позволяет улучшить эксплуатационные

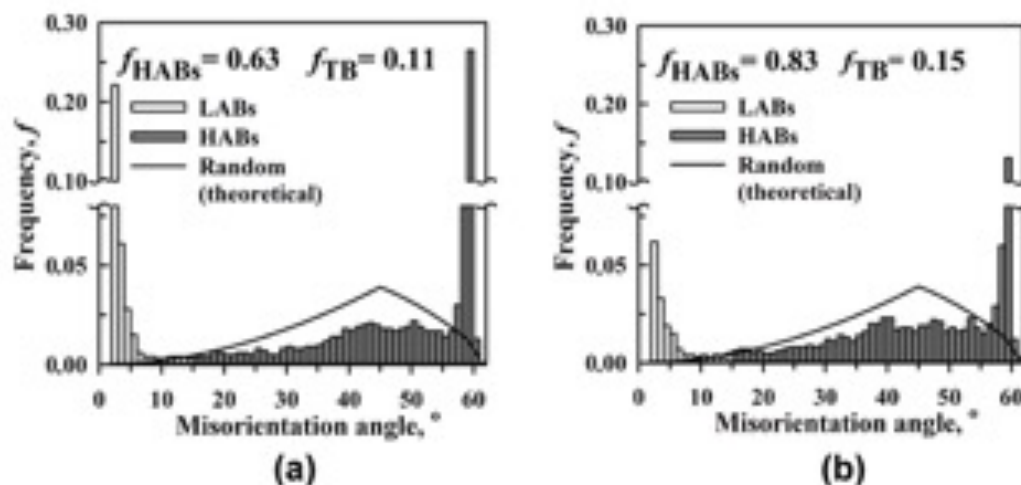


Рис. 9. Гистограмма распределения границ по углам разориентировки в (а) приграничной к усталостной трещине области А (рис. 8(а)) и (б) в области В (рис. 8(а)) залеченной трещины

характеристики изделий. В отличие от электроимпульсной обработки, традиционные термические и термомеханические методы не позволяют залечивать большие (макроскопические) трещины в образцах.

В настоящей работе рассмотрен механизм залечивания длинных макротрещин в тонких пластинах. Залечивание таких трещин представляет особую сложность. Предложенный многоэтапный метод электроимпульсной обработки позволяет залечить значительную длину такой трещины. Тогда как при воздействии на длинную трещину импульсами/сериями импульсов тока с параметрами, используемыми другими исследователями (плотности тока порядка 10^3 А/мм² и длительностями от 500 мкс) приведут к образованию кратера в первоначальной вершине трещины и исключат дальнейшее заваривание её берегов.

Проведенный анализ микроструктуры подтверждает, что залечивание происходит по механизму заваривания берегов трещины расплавленным материалом, для чего во время прохождения импульса через пластину в вершине трещины удалось одновременно создать значительные сжимающие напряжения и высокую температуру, вызывающую плавление стали. Однако эксперименты показали значительную неоднородность залечивания вдоль фронта и в глубину для длинной макротрещины, которая выражалась наличием несплошностей в залеченной области. При этом качество залечивания улучшалось в глубину с увеличением расстояния от поверхности пластины.

В результате предложенного воздействия в залеченной области формируется улучшенная микроструктура, которая благоприятно скажется на макроскопических свойствах стали в данной области.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Работа Г.Р.Х. выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований и государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ. EBSD анализ выполнен на оборудовании Центра коллективного пользования «Структурные и физико-механические исследования материалов» ИПСМ РАН. Работа Е.А.К. выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Уфимского университета науки и технологий (№ 075- 03-2024-123/1) молодежной научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях». Работа К.К.В. выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ИПМех РАН № FFGN-2024-0001. Работа Ч.А.В. выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ИПМех РАН № FFGN-2024-0006.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. The work of G.R.Kh. was supported by the Fundamental Research Program and the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. EBSD analysis was performed on the equipment of the Centre for Collective Use “Structural and Physical and Mechanical Investigations of Materials” of IMSP RAS. The work of E.A.K. was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task of the Ufa University of Science and Technologies (No. 075- 03-2024-123/1) of the youth research laboratory “Metals and Alloys under Extreme Impacts”. The work of K.V.K. was supported by the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the Russian State Assignment under contract No. FFGN-2024-0001. The work of A.V.C. was supported by the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the Russian State Assignment under contract No. FFGN-2024-0006.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Aksenov D. A., Nazarov A. A., Raab G. I. Effects of Severe Plastic Deformation and Ultrasonic Treatment on the Structure, Strength, and Corrosion Resistance of Mg-Al-Zn Alloy // *Materials*. 2022. no. 15. P. 7200. DOI: 10.3390/ma15207200.
- [2] Lapovok R., Ng H. P., Tomus D., Estrin Y. Bimetallic copper–aluminium tube by severe plastic deformation // *Scripta Materialia*. 2012. Vol. 66, no. 12. P. 1081–1084. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.03.004.
- [3] Zinovev A. V., Bapanina M. G., Babicheva R. I. et al. Deformation of nanocrystalline binary aluminum alloys with segregation of Mg, Co and Ti at grain

- boundaries // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. Vol. 118, no. 1. P. 65–74. DOI: 10.1134/s0031918x16110144.
- [4] Khaliq W., Ehsan M. B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 102. P. 349–357. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006.
- [5] Cai Q., Zhou M., Bagherpour E. et al. 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.
- [6] Tan J., Wang S., Fan Z. et al. Reverse cation segregation and crack self-healing of Ba_{0.3}Sr_{0.7}Fe_{0.9}Mo_{0.1}O₃ perovskite four-channel hollow fiber membrane // *Journal of Membrane Science*. 2021. Vol. 639. P. 119753. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119753.
- [7] Yin K., Luo Z., Liu X. et al. Preparation and application of Na₂SiO₃@EC microcapsules for self-healing alkali-activated slag // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 400. P. 132651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132651.
- [8] Men S. W., Xie J. M., Liu X. et al. A novel crack healing in sprayed FeCrBSi coatings by plasma nitriding // *Vacuum*. 2023. Vol. 209. P. 111768. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111768.
- [9] Bakan E., Vaßen R. Crack healing mechanisms in atmospheric plasma sprayed Yb-silicate coatings during post-process heat treatment // *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. Vol. 43, no. 8. P. 3684–3693. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.02.005.
- [10] Dorri Moghadam A., Schultz B. F., Ferguson J. B. et al. Functional Metal Matrix Composites: Self-lubricating, Self-healing, and Nanocomposites-An Outlook // *JOM*. 2014. Vol. 66, no. 6. P. 872–881. DOI: 10.1007/s11837-014-0948-5.
- [11] Wei D. B., Han J. T., Tieu A. K., Jiang Zheng Yi. An Analysis on the Inhomogeneous Microstructure in Crack Healing Area // *Key Engineering Materials*. 2004. Vol. 274–276. P. 1053–1058. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.274-276.1053.
- [12] Paladugu S. R. M., Sreekanth P. S. R., Sahu S. K. et al. A Comprehensive Review of Self-Healing Polymer, Metal, and Ceramic Matrix Composites and Their Modeling Aspects for Aerospace Applications // *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 23. P. 8521. DOI: 10.3390/ma15238521.
- [13] Xin R., Luo J., Ma Q. Effect of Parameters on Internal Crack Healing in 30Cr2Ni4MoV Steel for 600-Ton Ultra-Super Ingots // *Metals*. 2017. Vol. 7, no. 4. P. 149. DOI: 10.3390/met7040149.
- [14] Liverani E., Lutey A. H. A., Ascari A., Fortunato A. The effects of hot isostatic pressing (HIP) and solubilization heat treatment on the density, mechanical properties, and microstructure of austenitic stainless steel parts produced by selective laser melting (SLM) // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 107, no. 1–2. P. 109–122. DOI: 10.1007/s00170-020-05072-9.
- [15] Bryzgalov V. A., Morkina A. Y., Abdullina D. U. et al. High-Density Pulsed Current: A Review of Its Role in Healing Macrocracks in Metals // *Materials. Technologies. Design*. 2024. Vol. 6, no. 2(17). P. 38–58. DOI: 10.54708/26587572_2024_621738.
- [16] Dmitriev S. V., Morkina A. Y., Tarov D. V. et al. Effect of Repetitive High-Density Current Pulses on Plastic Deformation of Copper Wires under Stepwise Loading // *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*. 2024. Vol. 1, no. 1. P. 27–43. DOI: 10.31181/smeor1120243.
- [17] Абдуллина Д. У., Бебихов Ю. В., Татаринев П. С., Дмитриев С. В. Обзор последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Vol. 20, no. 4. P. 469–483. DOI: 10.25712/astu.1811-1416.2023.04.006.
- [18] Моркина А. Ю., Таров Д. В., Наумова Д. М. et al. Влияние повторяющихся импульсов тока высокой плотности на пластическую деформацию медных

- проводов // Известия Уфимского Научного Центра РАН. 2024. no. 3. P. 15–23. DOI: 10.31040/2222-8349-2024-0-3-15-23.
- [19] Zheng X. G., Shi Y.-N., Lu K. Electro-healing cracks in nickel // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 561. P. 52–59. DOI: 10.1016/j.msea.2012.10.080.
- [20] Sheng Y., Hua Y., Wang X. et al. Application of High-Density Electropulsing to Improve the Performance of Metallic Materials: Mechanisms, Microstructure and Properties // *Materials*. 2018. Vol. 11, no. 2. P. 185. DOI: 10.3390/ma11020185.
- [21] Yin Y., Chen H., Morita Y. et al. Effect of Electropulsing Treatment on the Fatigue Crack Growth Behavior of Copper // *Materials*. 2018. Vol. 11, no. 11. P. 2168. DOI: 10.3390/ma11112168.
- [22] Gallo F., Satapathy S., Ravi-Chandar K. Melting and crack growth in electrical conductors subjected to short-duration current pulses // *International Journal of Fracture*. 2010. Vol. 167, no. 2. P. 183–193. DOI: 10.1007/s10704-010-9543-0.
- [23] Кукуджанов К. В., Ченцов А. В. About healing of porosity in metal under high energy electromagnetic field // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2020. no. 2(44). P. 116–131. DOI: 10.37972/chgpu.2020.44.2.012.
- [24] Kukudzhanov K. V., Levitin A. L. Modelling of some mechanism of metal electroplasticity under pulsed high-energy electromagnetic field action // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1205. P. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1205/1/012032.
- [25] Kumar A., Paul S. K. Healing of fatigue crack in steel with the application of pulsed electric current // *Materialia*. 2020. Vol. 14. P. 100906. DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100906.
- [26] Yu T., Deng D., Wang G., Zhang Hongchao. Crack healing in SUS304 stainless steel by electropulsing treatment // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 113. P. 989–994. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.060.
- [27] Yang C., Xu W., Guo B. et al. Healing of Fatigue Crack in 1045 Steel by Using Eddy Current Treatment // *Materials*. 2016. Vol. 9, no. 8. P. 641. DOI: 10.3390/ma9080641.
- [28] Xu W., Yang C., Yu H. et al. Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9, no. 5. P. 1768–1781. DOI: 10.1016/j.jma.2020.08.022.
- [29] Hosoi A., Nagahama T., Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 533. P. 38–42. DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.024.
- [30] Hosoi A., Kishi T., Ju Y. Healing of Fatigue Crack by High-Density Electropulsing in Austenitic Stainless Steel Treated with the Surface-Activated Pre-Coating // *Materials*. 2013. Vol. 6, no. 9. P. 4213–4225. DOI: 10.3390/ma6094213.
- [31] Zhou Y., Qin R., Xiao S. et al. Reversing effect of electropulsing on damage of 1045 steel // *Journal of Materials Research*. 2000. Vol. 15, no. 5. P. 1056–1061. DOI: 10.1557/jmr.2000.0152.
- [32] Zhou Y., Guo J., Gao M., He Guanhu. Crack healing in a steel by using electropulsing technique // *Materials Letters*. 2004. Vol. 58, no. 11. P. 1732–1736. DOI: 10.1016/j.matlet.2003.10.049.
- [33] Финкель В. М., Головин Ю. И., Слетков А. А. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока // *ДАН СССР*. 1976. Vol. 227, no. 4. P. 848–851.
- [34] Финкель В. М., Головин Ю. И., Слетков А. А. Разрушение вершины трещины сильным электромагнитным полем // *ДАН СССР*. 1977. Т. 237, № 2. С. 325–327.
- [35] Финкель В. М., Головин Ю. И., Иванов В. М., Киперман В. А. Электротермическое разрушение металла электромагнитным полем // *Физика и химия обработки материалов*. 1985. № 2. С. 16–23.

- [36] Kukudzhanov Konstantin V., Levitin Aleksandr Leonidovich, Ugurchiev Umar Kh. Healing of cracks in plates by strong electromagnetic field // *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2021. Vol. 25, no. 1. P. 193–202. DOI: 10.14498/vsgtu1831.
- [37] Муругова О. В., Нагимов М. И., Халикова Г. Р., Дмитриев С. В. Методика оценки длины усталостных трещин при их залечивании импульсным током // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2024. Т. 21, № 3. С. 294–303. DOI: 10.25712/astu.1811-1416.2024.03.003.
- [38] Humphreys F. J. Characterisation of fine-scale microstructures by electron backscatter diffraction (EBSD) // *Scripta Materialia*. 2004. Vol. 51, no. 8. P. 771–776. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.05.016.
- [39] Yizhou Z., You Z., Guanhu H., Benlian Zhou. The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing // *Journal of Materials Research*. 2001. Vol. 16, no. 1. P. 17–19. DOI: 10.1557/jmr.2001.0005.
- [40] Gallo F., Satapathy S., Ravi-Chandar K. Melting and crack growth in electrical conductors subjected to short-duration current pulses // *International Journal of Fracture*. 2010. Vol. 167, no. 2. P. 183–193. DOI: 10.1007/s10704-010-9543-0.

REFERENCES

- [1] Aksenov D. A., Nazarov A. A., Raab G. I. Effects of Severe Plastic Deformation and Ultrasonic Treatment on the Structure, Strength, and Corrosion Resistance of Mg-Al-Zn Alloy // *Materials*. 2022. no. 15. P. 7200. DOI: 10.3390/ma15207200.
- [2] Lapovok R., Ng H. P., Tomus D., Estrin Y. Bimetallic copper–aluminium tube by severe plastic deformation // *Scripta Materialia*. 2012. Vol. 66, no. 12. P. 1081–1084. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.03.004.
- [3] Zinovev A. V., Bapanina M. G., Babicheva R. I. et al. Deformation of nanocrystalline binary aluminum alloys with segregation of Mg, Co and Ti at grain boundaries // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. Vol. 118, no. 1. P. 65–74. DOI: 10.1134/s0031918x16110144.
- [4] Khaliq W., Ehsan M. B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 102. P. 349–357. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006.
- [5] Cai Q., Zhou M., Bagherpour E. et al. 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.
- [6] Tan J., Wang S., Fan Z. et al. Reverse cation segregation and crack self-healing of Ba_{0.3}Sr_{0.7}Fe_{0.9}Mo_{0.1}O₃ perovskite four-channel hollow fiber membrane // *Journal of Membrane Science*. 2021. Vol. 639. P. 119753. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119753.
- [7] Yin K., Luo Z., Liu X. et al. Preparation and application of Na₂SiO₃@EC microcapsules for self-healing alkali-activated slag // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 400. P. 132651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132651.
- [8] Men S. W., Xie J. M., Liu X. et al. A novel crack healing in sprayed FeCrBSi coatings by plasma nitriding // *Vacuum*. 2023. Vol. 209. P. 111768. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111768.
- [9] Bakan E., Vaßen R. Crack healing mechanisms in atmospheric plasma sprayed Yb-silicate coatings during post-process heat treatment // *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. Vol. 43, no. 8. P. 3684–3693. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.02.005.
- [10] Dorri Moghadam A., Schultz B. F., Ferguson J. B. et al. Functional Metal Matrix Composites: Self-lubricating, Self-healing, and Nanocomposites-An Outlook // *JOM*. 2014. Vol. 66, no. 6. P. 872–881. DOI: 10.1007/s11837-014-0948-5.

- [11] Wei D. B., Han J. T., Tieu A. K., Jiang Zheng Yi. An Analysis on the Inhomogeneous Microstructure in Crack Healing Area // *Key Engineering Materials*. 2004. Vol. 274–276. P. 1053–1058. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.274-276.1053.
- [12] Paladugu S. R. M., Sreekanth P. S. R., Sahu S. K. et al. A Comprehensive Review of Self-Healing Polymer, Metal, and Ceramic Matrix Composites and Their Modeling Aspects for Aerospace Applications // *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 23. P. 8521. DOI: 10.3390/ma15238521.
- [13] Xin R., Luo J., Ma Q. Effect of Parameters on Internal Crack Healing in 30Cr2Ni4MoV Steel for 600-Ton Ultra-Super Ingots // *Metals*. 2017. Vol. 7, no. 4. P. 149. DOI: 10.3390/met7040149.
- [14] Liverani E., Lutey A. H. A., Ascari A., Fortunato A. The effects of hot isostatic pressing (HIP) and solubilization heat treatment on the density, mechanical properties, and microstructure of austenitic stainless steel parts produced by selective laser melting (SLM) // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 107, no. 1–2. P. 109–122. DOI: 10.1007/s00170-020-05072-9.
- [15] Bryzgalov V. A., Morkina A. Y., Abdullina D. U. et al. High-Density Pulsed Current: A Review of Its Role in Healing Macrocracks in Metals // *Materials. Technologies. Design*. 2024. Vol. 6, no. 2(17). P. 38–58. DOI: 10.54708/26587572_2024_621738.
- [16] Dmitriev S. V., Morkina A. Y., Tarov D. V. et al. Effect of Repetitive High-Density Current Pulses on Plastic Deformation of Copper Wires under Stepwise Loading // *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*. 2024. Vol. 1, no. 1. P. 27–43. DOI: 10.31181/smeor1120243.
- [17] Abdullina D. U., Bebikhov Yu. V., Tatarinov P. S., Dmitriev S. V. Review of recent achievements in the field of electroplastic metal forming (in Russ.) // *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*. 2023. Vol. 20, no. 4. P. 469–483. DOI: 10.25712/astu.1811-1416.2023.04.006.
- [18] Morkina A. Y., Tarov D. V., Naumova D. M. et al. Effect of repetitive high-density current pulses on plastic deformation of copper wires (In Russ.) // *Izvestia Ufimskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2024. no. 3. P. 15–23. DOI: 10.31040/2222-8349-2024-0-3-15-23.
- [19] Zheng X. G., Shi Y.-N., Lu K. Electro-healing cracks in nickel // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 561. P. 52–59. DOI: 10.1016/j.msea.2012.10.080.
- [20] Sheng Y., Hua Y., Wang X. et al. Application of High-Density Electropulsing to Improve the Performance of Metallic Materials: Mechanisms, Microstructure and Properties // *Materials*. 2018. Vol. 11, no. 2. P. 185. DOI: 10.3390/ma11020185.
- [21] Yin Y., Chen H., Morita Y. et al. Effect of Electropulsing Treatment on the Fatigue Crack Growth Behavior of Copper // *Materials*. 2018. Vol. 11, no. 11. P. 2168. DOI: 10.3390/ma11112168.
- [22] Gallo F., Satapathy S., Ravi-Chandar K. Melting and crack growth in electrical conductors subjected to short-duration current pulses // *International Journal of Fracture*. 2010. Vol. 167, no. 2. P. 183–193. DOI: 10.1007/s10704-010-9543-0.
- [23] Kukudzhanov K. V., Chentsov A. V. About healing of porosity in metal under high energy electromagnetic field (In Russ.) // *Bulletin of The Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Series: Mechanics of Limit State*. 2020. no. 2(44). P. 116–131. DOI: 10.37972/chgpu.2020.44.2.012.
- [24] Kukudzhanov K. V., Levitin A. L. Modelling of some mechanism of metal electroplasticity under pulsed high-energy electromagnetic field action // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1205. P. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1205/1/012032.
- [25] Kumar A., Paul S. K. Healing of fatigue crack in steel with the application of pulsed electric current // *Materialia*. 2020. Vol. 14. P. 100906. DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100906.

- [26] Yu T., Deng D., Wang G., Zhang Hongchao. Crack healing in SUS304 stainless steel by electropulsing treatment // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 113. P. 989–994. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.060.
- [27] Yang C., Xu W., Guo B. et al. Healing of Fatigue Crack in 1045 Steel by Using Eddy Current Treatment // *Materials*. 2016. Vol. 9, no. 8. P. 641. DOI: 10.3390/ma9080641.
- [28] Xu W., Yang C., Yu H. et al. Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9, no. 5. P. 1768–1781. DOI: 10.1016/j.jma.2020.08.022.
- [29] Hosoi A., Nagahama T., Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 533. P. 38–42. DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.024.
- [30] Hosoi A., Kishi T., Ju Y. Healing of Fatigue Crack by High-Density Electropulsing in Austenitic Stainless Steel Treated with the Surface-Activated Pre-Coating // *Materials*. 2013. Vol. 6, no. 9. P. 4213–4225. DOI: 10.3390/ma6094213.
- [31] Zhou Y., Qin R., Xiao S. et al. Reversing effect of electropulsing on damage of 1045 steel // *Journal of Materials Research*. 2000. Vol. 15, no. 5. P. 1056–1061. DOI: 10.1557/jmr.2000.0152.
- [32] Zhou Y., Guo J., Gao M., He Guanhu. Crack healing in a steel by using electropulsing technique // *Materials Letters*. 2004. Vol. 58, no. 11. P. 1732–1736. DOI: 10.1016/j.matlet.2003.10.049.
- [33] Finkel V. M., Golovin Yu. I., Sletkov A. A. Possibility of Braking Rapid Cracks by Pulses of Current // *Sov. Phys. Dokl.* 1976. Vol. 21, no. 4. P. 848–851.
- [34] Finkel V. M., Golovin Yu. I., Sletkov A. A. Fracture of crack tip by high-energy electromagnetic field // *Sov. Phys. Dokl.* 1977. Vol. 22. P. 683–685.
- [35] Finkel V. M., Golovin Yu. I., Ivanov V. M., Kiperman V. A. Electro thermal destruction of the metal by electromagnetic field (In Russ.) // *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*. 1985. no. 2. P. 16–23.
- [36] Kukudzhanov Konstantin V., Levitin Aleksandr Leonidovich, Ugurchiev Umar Kh. Healing of cracks in plates by strong electromagnetic field // *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2021. Vol. 25, no. 1. P. 193–202. DOI: 10.14498/vsgtu1831.
- [37] Murugova O. V., Nagimov M. I., Khalikova G. R., Dmitriev S. V. Method for Estimating the Length of Fatigue Cracks During their Healing by Pulsed Electric Current (In Russ.) // *Fundamentalnye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya (Basic Problems of Material Science)*. 2024. Vol. 21, no. 3. P. 294–303. DOI: 10.25712/astu.1811-1416.2024.03.003.
- [38] Humphreys F. J. Characterisation of fine-scale microstructures by electron backscatter diffraction (EBSD) // *Scripta Materialia*. 2004. Vol. 51, no. 8. P. 771–776. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.05.016.
- [39] Yizhou Z., You Z., Guanhu H., Benlian Zhou. The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing // *Journal of Materials Research*. 2001. Vol. 16, no. 1. P. 17–19. DOI: 10.1557/jmr.2001.0005.
- [40] Gallo F., Satapathy S., Ravi-Chandar K. Melting and crack growth in electrical conductors subjected to short-duration current pulses // *International Journal of Fracture*. 2010. Vol. 167, no. 2. P. 183–193. DOI: 10.1007/s10704-010-9543-0.