

**HIGH-DENSITY PULSED CURRENT: A REVIEW OF ITS ROLE
IN HEALING MACROCRACKS IN METALS**

Vladimir Aleksandrovich Bryzgalov^{1,2}, *Alina Yuryevna Morkina*^{1,2}, *Dina Uralovna Abdullina*³,
*Aleksandr Sergeyevich Semenov*⁴, *Pavel Semenovich Tatarinov*⁴, *Ilya Anatolyevich Yakushev*⁴,
*Yuri Vladimirovich Bebikhov*⁴, *Konstantin Vladimirovich Kukudzhanov*⁵,
Elena Aleksandrovna Korznikova^{1,2,4}, *Sergey Vladimirovich Dmitriev*^{1,3,4}

¹ Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences, 39 St. Khalturina Str., 450001, Ufa, Russia

² Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

³ Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, 151 Oktyabrya pr., 450054, Ufa, Russia

⁴ Polytechnical Institute (branch) in Mirny, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 14, Oyunskogo st. 678170, Mirny, Russia

⁵ A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, 101, Vernadsky pr., h.1, 119526 Moscow, Russia

^a bryzgalovv2000@gmail.com

ABSTRACT

In the context of structural materials, the process of degradation and damage ultimately results in the formation of micro-cracks, which subsequently lead to the failure of the material in question. The reliability and service life of structural materials can be significantly increased if cracks are healed at the meso- and micro-level. It is therefore of great interest to researchers to study defect healing in various materials. In particular, research on the use of strong pulsed electromagnetic fields to heal cracks and pores in conductive materials has been intensified recently. This paper presents an overview of research on healing macrocracks in metals by applying a strong pulsed electromagnetic field inducing a pulsed electric current in the material. It describes the methods and materials used in the experiments, as well as the results obtained.

KEYWORDS

Macrocracks; healing; electromagnetic field; Joule heat; pulsed current; eddy current.

**ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЗАЛЕЧИВАНИЮ МАКРОТРЕЩИН В МЕТАЛЛАХ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ**

Владимир Александрович Брызгалов^{1,2}, *Алина Юрьевна Моркина*^{1,2},
*Дина Ураловна Абдуллина*³, *Александр Сергеевич Семенов*⁴, *Павел Семёнович Татаринов*⁴,
*Илья Анатольевич Якушев*⁴, *Юрий Владимирович Бебихов*⁴,
*Константин Владимирович Кукуджанов*⁵, *Елена Александровна Корзникова*^{1,2,4},
Сергей Владимирович Дмитриев^{1,3,4}

¹ Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Россия

² Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди 32, 450076, Уфа, Россия

³ Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, пр. Октября, 151, 450054, Уфа, Россия

⁴ Политехнический институт (филиал) в г. Мирном Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. ул. Ойунского, 14, 678170, Мирный, Россия

⁵ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, пр. Вернадского, 101, к.1, 119526 Москва, Россия

^a bryzgalovv2000@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В конструкционных материалах деградация и повреждения приводят к образованию микро-трещин, а затем к разрушению. Если трещины залечить на мезо- и микроуровне, надежность и срок службы конструкционных материалов можно значительно увеличить. Поэтому исследование залечивания дефектов в различных материалах вызывает большой интерес исследователей. В частности, в последнее время активизировались исследования по использованию сильного импульсного электромагнитного поля для залечивания трещин и пор в проводящих материалах. В данной статье представлен обзор исследований по залечиванию макротрещин в металлах с помощью воздействия на них сильным импульсным электромагнитным полем, индуцирующим в материале импульсный электрический ток. Описаны методы и материалы, используемые в экспериментах, а также полученные результаты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Макротрещины; залечивание; электромагнитное поле; джоулево тепло; импульсный ток; вихревой ток.

Введение

В конструкционных материалах под воздействием различных внешних факторов накапливаются повреждения, часто приводящее к последовательному образованию микро-, мезо- и макротрещин, а затем и к разрушению [1]. Разрушение материалов часто приводит к серьезным авариям и большим материальным потерям. Если разработать методы залечивания трещин, надежность и срок службы конструкционных материалов и изделий из них можно значительно увеличить. Поэтому изучение залечивания дефектов в материалах вызывает большой интерес со стороны исследователей.

В данной сфере было проведено ряд исследований, в частности, залечивания трещин в биоматериалах, полимерах и керамических материалах, где использовались различные методы [1–3], включая применение плазменных покрытий [4, 5] и т.д. Но залечивание трещин в металлических материалах намно-

го более трудоемкий процесс, чем в других материалах из-за прочности атомных связей и низкой скорости диффузии атомов в металлах [6]. Основным методом избавления от трещин в металлах и сплавах на данный момент является термическая и термомеханические обработки [7]. Главными недостатками подобных методов является возможное ухудшение свойств материала, нежелательные структурные и фазовые переходы из-за высоких температур, а также большая длительность, трудоемкость и энергоемкость процесса.

В последнее время появился ряд исследований по использованию сильного импульсного электромагнитного поля для залечивания трещин и пор в металлах. Такое залечивание дефектов в металлах основано на явлении концентрации электрического поля в вершинах дефектов в проводящем материале. О самом явлении концентрации электрического поля на острых кончиках

различных предметов было известно давно, в том числе, его описание попало в учебники [8]. Тем не менее, на концентрацию электрического поля в вершинах макротрещин в проводящем материале и возможность их залечивания таким образом впервые было обращено внимание сравнительно недавно в работах советских исследователей [9, 10]. Под макротрещинами понимаются трещины с одним из размеров (длиной) порядка 1 мм и более в тонких образцах, которые можно наблюдать в микроскоп на поверхности образцов.

В экспериментальных работах [9, 10] было показано, что воздействие высокоэнергетического электромагнитного поля на металл приводит к резкому повышению температуры в вершинах микро- и макротрещин. В результате этого в вершине трещины могут протекать такие процессы как плавление, испарение, микровзрыв, и формирование кратера. В частности, было показано, что в вершине трещины в металлической пластине в результате воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля скорость роста температуры составила 10^7 °C/сек, возник градиент температуры 10^6 – 10^7 °C/м, в то время как вдали от трещины нагрев металла составил всего лишь 10 °C [9].

Воздействие на образец с трещиной сильным импульсным электромагнитным полем индуцирует в материале импульс электрического тока. Как сообщалось выше, электрическое поле концентрируется в вершине трещины и вызывает в окрестности вершины трещины импульсный ток с плотностью, значительно превышающей в данной области плотность тока в других точках образца. Концентрация тока в свою очередь приводит в значительной диссипации электромагнитной энергии в тепло в соответствии с законом Джоуля-Ленца. Это вызывает локально неоднородное распределение температуры в образце с концентрацией температуры в области вершины трещины, быстрый локальный нагрев и температурное расширение материала в этой области. Поэтому в зави-

симости длительности импульса и величины плотности индуцированного электрического тока, геометрии трещины и образца в вершине происходят или быстрые нагрев, плавление и испарение материала (что приводит к микровзрыву с образованием кратера), или нагрев, плавление металла и возникновение сжимающих механических напряжений, сближающих берега трещины (что приводит к свариванию берегов в вершине расплавленным металлом после окончания импульса). Заваривание берегов трещины в вершине расплавленным металлом, так же как образование кратера (отверстия) в вершине, можно трактовать как различные способы залечивания трещины, поскольку и ее заваренные берега, и образовавшейся кратер создают препятствия для дальнейшего распространения трещины.

В данной статье представлен обзор исследований по залечиванию макротрещин с помощью воздействия на них сильным импульсным электромагнитным полем, индуцирующим в материале импульсный электрический ток.

1. Использование импульсного электрического тока

1.1. Залечивание трещин в сталях импульсами тока.

Авторы работы [11] создали макротрещины в листе титанового сплава в результате пластической деформации. Поврежденный лист обрабатывался электроимпульсным методом (максимальная плотность тока $(4,75$ – $5,32) \times 10^3$ А/мм², длительность импульса 110 мкс). Для изучения изменений микроструктуры до и после электроимпульсной обработки использовались оптический микроскоп и сканирующий электронный микроскоп. Степень восстановления пластичности листа титанового сплава изучена с помощью испытаний на одноосное растяжение. Экспериментальные результаты показывают, что пластичность образцов, подвергавшихся предварительной пластической деформации на 8%, практически полностью

восстанавливается при электроимпульсной обработке при должном выборе параметров. Микротрещины, образовавшиеся в результате пластической деформации, после электроимпульсной обработки затягиваются, происходит локальная рекристаллизация.

В работах [12, 13], была залечена трещина в среднеуглеродистой стали при помощи джоулевого нагрева, вызванного пропусканием высокоплотного электрического тока. В статье [14] была разработана методика заживления усталостной трещины в нержавеющей стали путем управления электрическим полем высокой плотности. Ток высокой плотности инициировался вблизи вершины трещины с помощью близко расположенных электродов. Из экспериментальных результатов следует, что после приложения к образцу импульсного тока высокой плотности вблизи вершины трещины происходило закрытие трещины и образование мостиков между берегами трещины.

В статье [15] были проведены исследования по использованию импульсного электрического тока для залечивания трещин в нержавеющей аустенитной стали SUS316. Авторами была изготовлена заготовка из стали с надрезом, которая затем была подвергнута отжигу для того, чтобы снять остаточные напряжения, появившиеся во время механической обработки. Также был произведен отжиг заготовки: заготовка нагревалась до 1173 К на протяжении 4 часов, затем температура держалась постоянной на протяжении 10 минут, после чего заготовка охлаждалась в печи до комнатной температуры. Чтобы облегчить наблюдение за состоянием поверхности образцов, она была отполирована до зеркального блеска с помощью шлифовальной машины. Затем в образце была выращена усталостная трещина при помощи гидравлической испытательной машины. Все параметры испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры испытаний

Table 1. Test parameters

Название образца: / Sample name:	Образец A / Sample A	Образец B / Sample B	Образец C / Sample C	Образец D / Sample D
Коэффициент нагрузки, R / Load coefficient, R	0,05	0,05	0,05	0,05
Частота f , Hz / Frequency f , Hz	10	10	10	10
Длина трещины a , мм / Crack length a , mm	3,0	6,0	8,0	0
Диапазон коэффициентов интенсивности напряжений dK , МПа/м ² / Stress intensity coefficient range dK , МПа/м ²	35	15	25	15–35

Для очистки поверхности трещины от оксидного слоя заготовка была протравлена при помощи активации поверхности путем опускания заготовки в электролит (HCl), а затем проводилось осаждение на поверхности (берегу) трещины специального состава на основе Ni. Данный состав использовался для того, чтобы стимулировать процесс заживания.

Для заживания усталостной трещины применялась обработка электрическими импульсами высокой плотности. Электрические импульсы осуществлялись с помощью источника тока транзисторного типа в диапазоне 0,5–10 кА. Импульсы подавались через два электрода с длительностью в диапазоне 0,5–10 мс. Электроды были непосредственно прикреплены к образцу. Параметры импульсного тока приведены в табл. 2. Электрические импульсы пропускались через образец несколько раз, и состояние трещины на поверхности образца наблюдалось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) до и после применения нескольких импульсов.

На рис. 1 показаны РЭМ-изображения закрытия трещины в образце А после применения различного количества импульсов электрического тока высокой плотности. Можно заметить, что трещина была постепенно залечена. Наблюдалась адгезия между поверхностями трещин, а также отмечается, что электроимпульсное воздействие оказывает влияние на участки образца, удаленные от вершины трещины. Ширина трещины измерялась по РЭМ-изображениям до и после применения электрических импульсов. На рис. 2 показано изменение ширины трещины с увеличением числа импульсов. При сравнении ширины до электроимпульсного воздействия и после 35-го импульса видно, что ширина трещины вблизи надреза уменьшилась примерно с 18,1 до 3,7 мкм, что соответствует закрытию трещины на 79–89%. Ширина трещины после электроимпульсного воздействия составила менее 5,0 мкм. Соединение поверхностей трещин было подтверждено вертикальным разрезом образца в направлении распространения трещины.

Таблица 2. Параметры импульсного тока

Table 2. Pulsed current parameters

Название образца: / Sample name:	Образец А / Sample A	Образец В / Sample B	Образец С / Sample C
Сила тока (кА) / Current (kA)	9,0	6,0	8,0
Длительность импульса (мс) / Pulse time (ms)	2,0	2,0	4,0
Количество примененных импульсов / Number of applied pulses	35	25	20

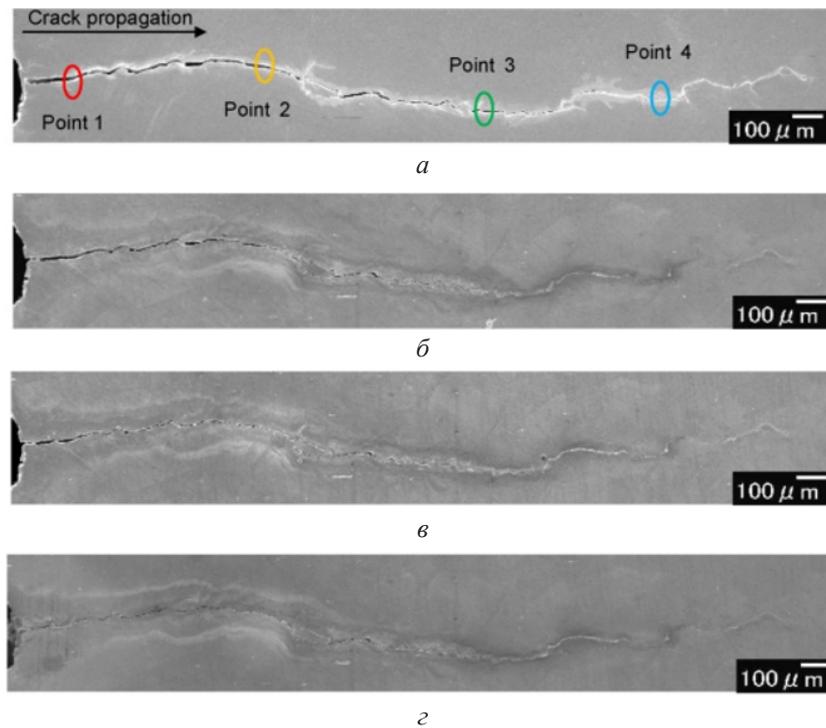


Рис. 1. Залечивание трещины в образце А в результате воздействия импульсов электрического тока: а) до, б) после 15 импульсов, в) после 25 импульсов, г) после 35 импульсов. По результатам работы [15]

Fig. 1. Crack healing in sample A as a result of the action of electric current pulses: а) prior to, б) after 15 pulses, в) after 25 pulses, г) after 35 pulses, according to [15]

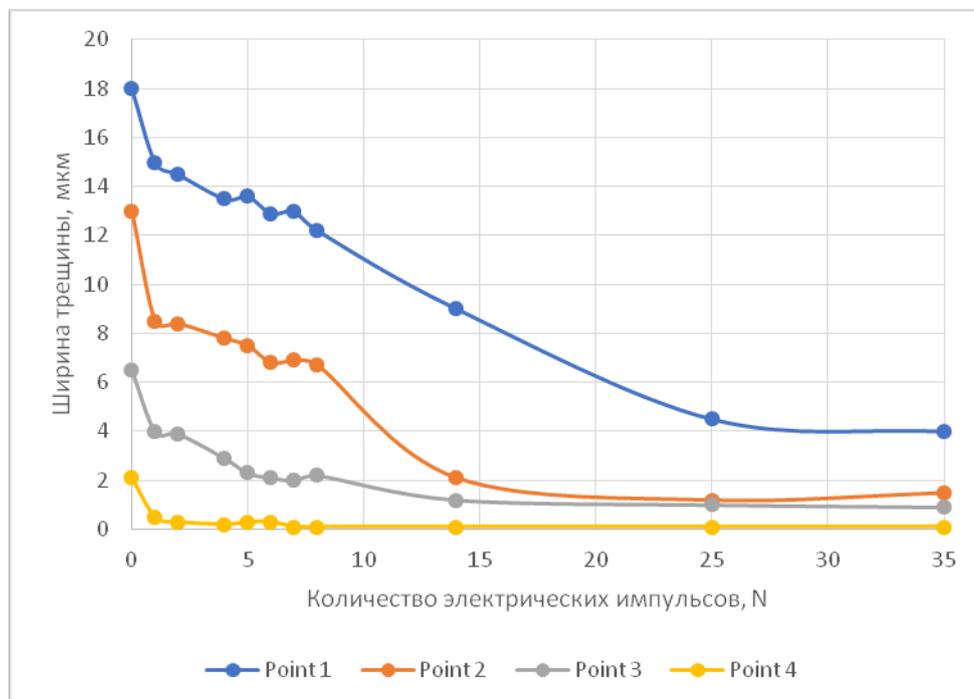


Рис. 2. Ширина трещины в различных точках измерения, представленных на рис. 2, как зависимость от количества импульсов на образце А. По результатам работы [15]

Fig. 2. Crack width in different measurement points shown in Fig. 2 as a function of the number of pulses on sample A, according to [15]

В работе [16] также были проведены похожие исследования со стальной пластиной, полученной в ходе горячей прокатки. Для эксперимента в пластине был сделан V-образный надрез глубиной 3 мм на одной из краев пластины. Затем в образце была сделана трещина путем усталостного нагружения.

В результате пропускания через образец электрических импульсов высокой плотности (100 A/mm^2) трещина полностью залечилась (рис. 3, *е*), поскольку раскрытие трещины вблизи надреза уменьшилось с 20 мкм почти до нуля. Между краями трещин произошла микросварка (рис. 3, *д*). Также заметно, что импульсный электрический ток повлиял на микроструктуру об-

разца вблизи трещины, но оказал незначительное влияние на микроструктуру вдали от трещины.

Аналогичная работа была выполнена на образцах из нержавеющей аустенитной стали SUS304 [17]. Как показано на рис. 4, в центральной части прутка из нержавеющей стали диаметром 35 мм и высотой 80 мм было просверлено отверстие диаметром 4 мм. Колонна была сжата по вертикали до высоты 56 мм в условиях окружающей среды. Затем были вырезаны прямоугольные образцы с помощью электроэрозионной обработки, и конечный размер образцов составил 1,3 мм толщиной, 11,8 мм шириной и 56 мм длиной. Готовые образцы подвергались ультразвуковой очистке в ацетоне.

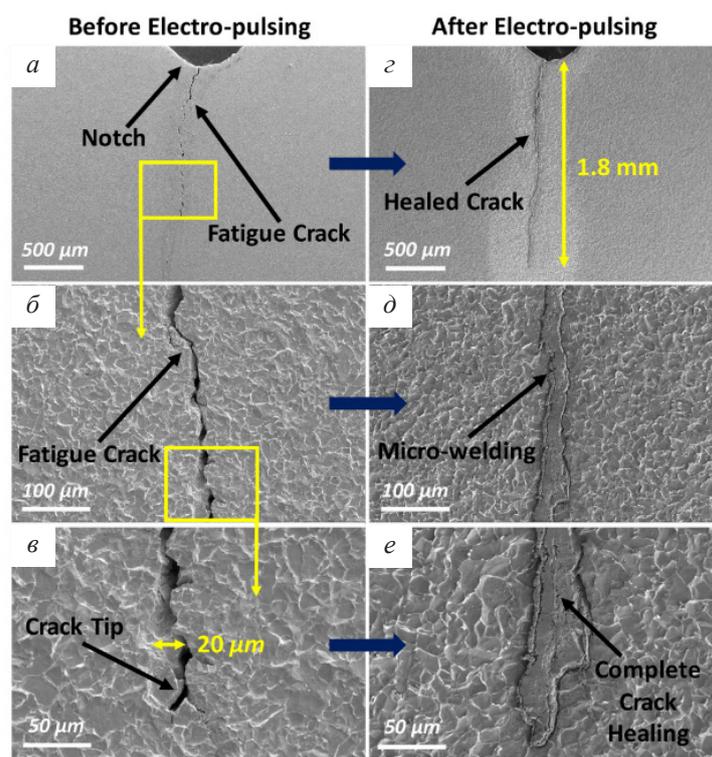


Рис. 3. СЭМ-микрофотография трещины до (*а, б, в*) и после (*г, д, е*) применения импульсного электрического тока. По результатам работы [16]

Fig. 3. SEM microphotograph of the crack prior to (*a, б, в*) and after (*г, д, е*) the application of pulsed electric current, according to [16]

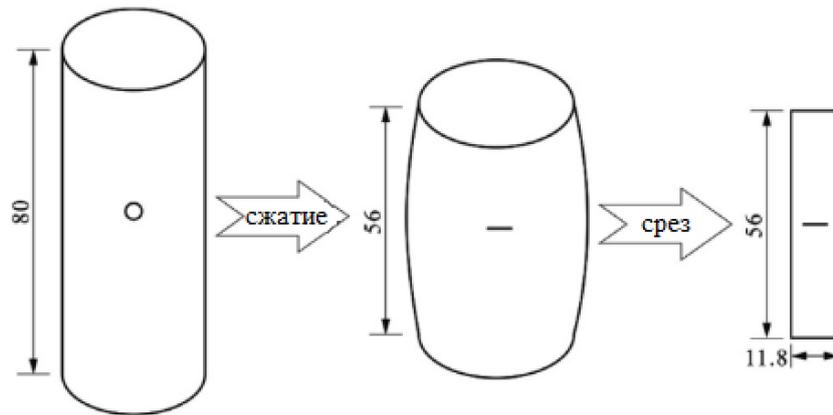


Рис. 4. Схематическое изображение подготовки образцов (размеры даны в мм). По результатам работы [17]

Fig. 4. Schematic illustration of the sample preparation (dimensions are given in mm), according to [17]

Обработка образцов электрическими импульсами с током высокой плотности была проведена на самодельной установке при комнатной температуре (более подробно в [17]). В ходе эксперимента батареи конденсаторов заряжались под контролем зарядного устройства. Затем срабатывал высоковольтный выключатель для подачи импульсного тока на образец. Величина зарядного напряжения и время срабатывания высоковольтного выключателя определялись блоком управления. Основные параметры устройства приведены в табл. 3. В эксперименте использовалось напряжение заряда 6000 В и конденсатор 100 мкФ. Пиковая плотность тока в эксперименте составляла 4,1 кА/мм². Образец подвергался семикратной электроимпульсной разрядке, интервал между зарядками составлял 2 мин.

После электроимпульсной обработки образовались непрерывные участки залечивания трещин. Область залечивания состояла

из столбчатых кристаллов, а вокруг области залечивания наблюдалась зона рекристаллизации. Морфология участков залечивания представлена на рис. 5. На рис. 5 а, б можно обнаружить семь четких овальных участков залечивания. Участки залечивания перекрывают друг друга, что означает, что часть участков залечивания, сформированных ранее, перекрывается вновь сформированными участками. Участки залечивания вблизи вершины трещины выглядят длиннее и больше по сравнению с участками, расположенными на расстоянии от вершины трещины. В зонах залечивания можно наблюдать некоторые дефекты пористости. На рис. 5, в вокруг областей залечивания наблюдается зона тонкой рекристаллизации. На рис. 5, г показаны мелкие кристаллы на стыке между двумя зонами залечивания и на стыке между зонами залечивания и матрицей. В этих местах не видно явных дефектов, что очень важно для качества залечивания трещин.

Таблица 3. Параметры эксперимента

Table 3. Experiment parameters

Параметры / Parameters	Значения / Values
Напряжение / Voltage	3–10 кВ / 3–10 kV
Емкость / Capacitance	20–200 мкФ / 20–200 μ F
Максимальная сила тока / Maximum current	100 кА / 100 kA
Время импульса / Pulse time	40–150 мкс / 40–150 μ s

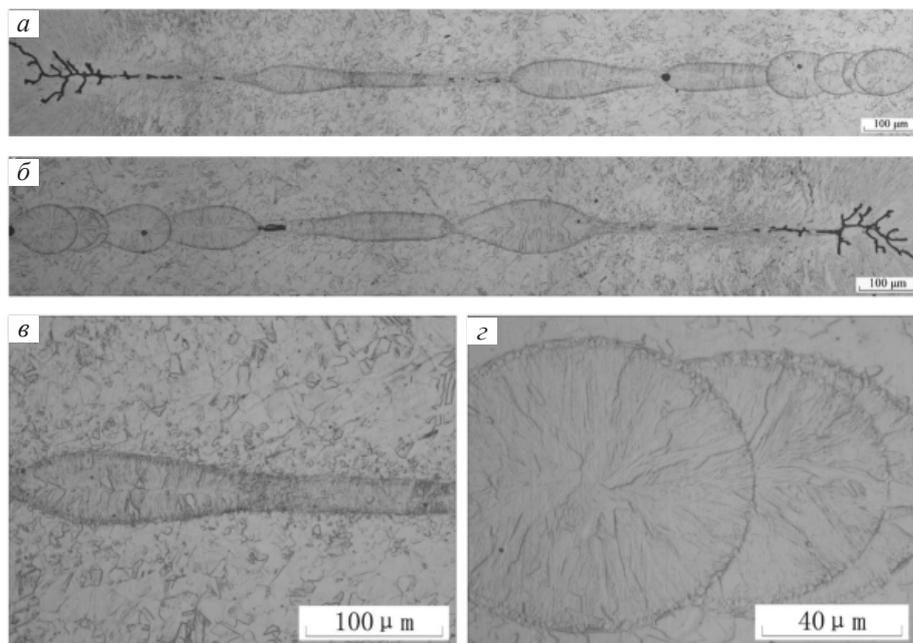


Рис. 5. Морфология участков залечивания (*a*, *б*) и увеличенное изображение (*в*, *г*). По результатам работы [17]

Fig. 5. Morphology of the healing areas (*a*, *b*) and an enlarged image (*c*, *d*), according to [17]

EBSD-анализ участков залечивания показал, что в процессе импульсного разряда происходило быстрое плавление и затвердевание (рис. 6). На изображении можно выделить три различные подобласти, названные соответственно областями А, В и С. В области А можно выделить три отчетливые овальные области залечивания, которые состояли в основном из столбчатых кристаллов. Это объясняется тем, что во время затвердевания тепло быстро распространялось в окружающий материал и столбчатые кристаллы быстро росли снаружи внутрь. Различные ориентации роста кристаллов отражают различные направления теплового потока. Области рядом со столбчатыми кристаллами (область В) представляют собой зону рекристаллизации с мелкими зернами. Ее образование можно объяснить следующими факторами: во-первых, относительно высокая температура в этой области превышала температуру, необходимую для рекристаллизации. Во-вторых, электрические импульсы уменьшили плотность дислокаций, ускоряя их движение и приводя к значительному увеличению скорости зарождения за очень короткое время [18–20]. В-третьих, короткое

время электроимпульсной обработки (около 800 мс) и высокая скорость охлаждения не дали достаточного времени для роста рекристаллизованных зерен. Область, расположенная относительно далеко от трещины (область С), не претерпела явных изменений из-за незначительного повышения температуры, поэтому механические свойства матрицы не изменились после электроимпульсной обработки.

В статье [21] помимо эксперимента было проведено моделирование методом конечных элементов для более углубленного анализа механизма, отвечающего за процесс залечивания трещин при помощи электрических импульсов. Модель была создана при помощи программы Abaqus 2022. Механизм залечивания исследовался в вершине трещины после одного электрического импульса. Трехмерная электротермомеханическая модель показана на рис. 7, *a*. К сетке в Abaqus был применен «термо-электро-структурный» элемент, что позволило ввести в модель степени свободы по деформации, температуре и электрическому потенциалу. В анализе учитываются джоулев нагрев, нагрев за счет пластической диссипации и тепловое размягчение.

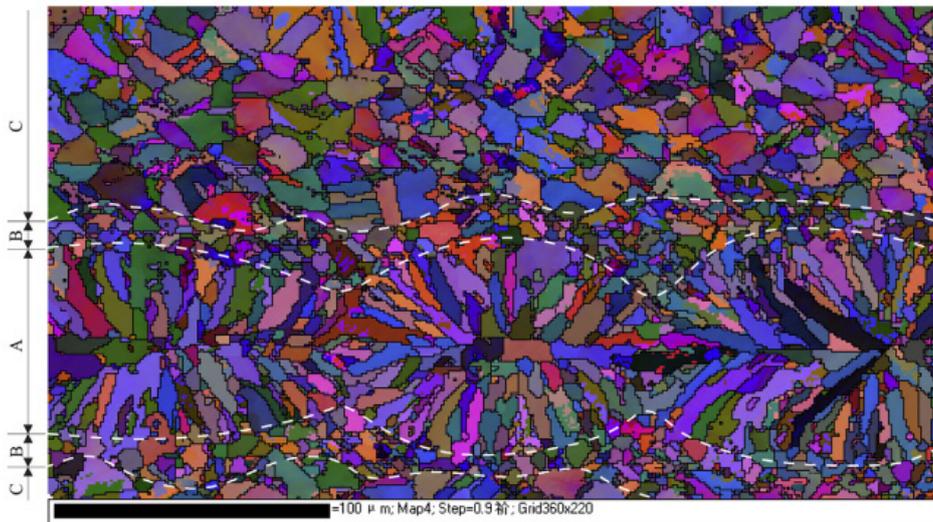


Рис. 6. EBSD-анализ структуры после электроимпульсной обработки. По результатам работы [17]

Fig. 6. EBSD analysis of the structure after the electric pulse treatment, according to [17]

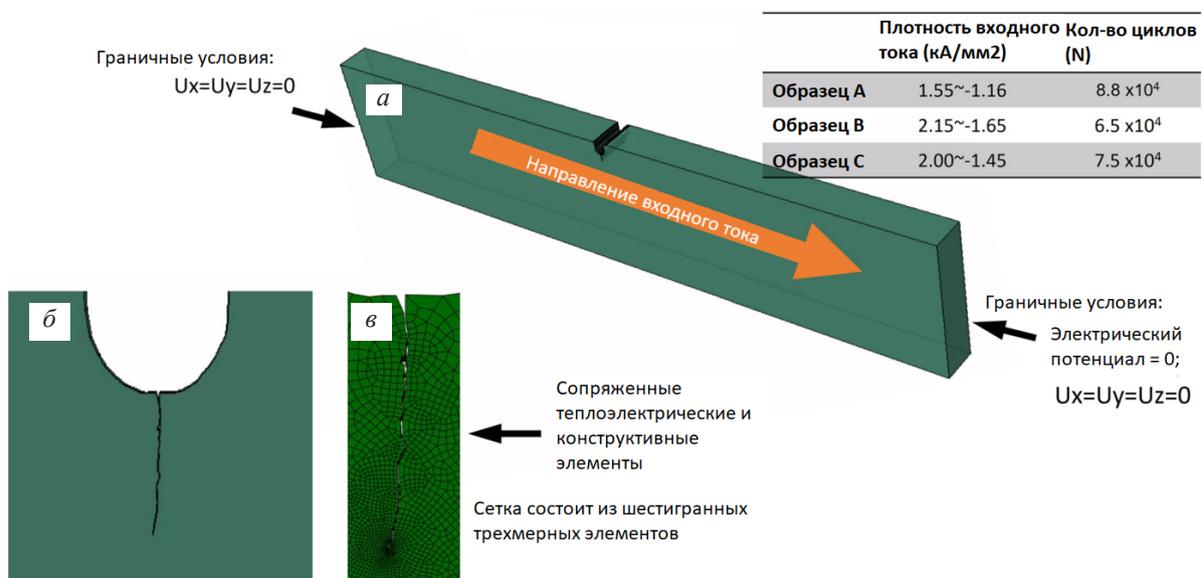


Рис. 7. Обзор 3D модели (а), усталостная трещина (образец А) крупным планом (б), сетка конечных элементов вокруг трещины (в). По результатам работы [21]

Fig. 7. Overview of the 3D model (a), fatigue crack (sample A) in a close up (b), finite element mesh around the crack (c), according to [21]

Геометрия трещины моделируется в Abaqus на основе РЭМ-изображений трещины в каждом образце. РЭМ-изображение получено при малом увеличении, и некоторые мелкие особенности трещины не учитываются. Определение размера ячейки основано на геометрии трещины. Размер ячейки значительно меньше вблизи вершины трещины и значительно больше вблизи надреза, чтобы сбалансировать время расчета и точность

температурного поля. Тепловая и электрическая проводимость трещины определялась как функция зазора между соприкасающимися поверхностями трещины. При нулевом зазоре теплопроводность (1×10^{10} В/м*К) и электропроводность (1×10^{10} А/м*В) имели чрезвычайно высокое значение; иными словами, предполагалось, что после смыкания поверхностей трещины тепло- и электропроводность будут полными. Учитывался

эффект скрытого тепла, при этом коэффициент скрытой теплоты плавления определялся как 285 кДж/кг в диапазоне температур от 1350 °С до 1550 °С.

На рис. 8, а–в показаны СЭМ-изображения усталостных трещин, полученные в ходе эксперимента. Процент залечивания рассчитывался путем деления длины зажившей трещины после ЭИ на общую длину трещины до ЭИ. В образце А после 50 импульсов при минимальной пиковой плотности тока 1,55 кА/мм² плавления не наблюдается, вместо этого происходит уменьшение ширины трещины и ее полное закрытие, как показано на рис. 8, а. Плавление металла в окрестности трещины, а также разбрызгивание плавящихся шариков в образце В можно наблюдать на рис. 8, б. Хотя в образце В после

50 импульсов при максимальной пиковой плотности тока 2,15 кА/мм² залечено 49% трещины, ширина трещины изменилась очень незначительно. Это говорит о том, что слишком высокая плотность тока способна расплавить металл вблизи трещины, однако сжимающее напряжение для ее закрытия недостаточно велико. Постепенное залечивание образца С показано на рис. 8, в, на что указывает склеивание плавящихся шариков внутри трещины. В образце С 50 импульсов при средней пиковой плотности тока 2 кА/мм² привели к полному закрытию трещины и залечиванию 78% усталостной трещины. Эти результаты показывают, что для одновременного закрытия и залечивания трещины необходимо правильно выбрать плотность тока.

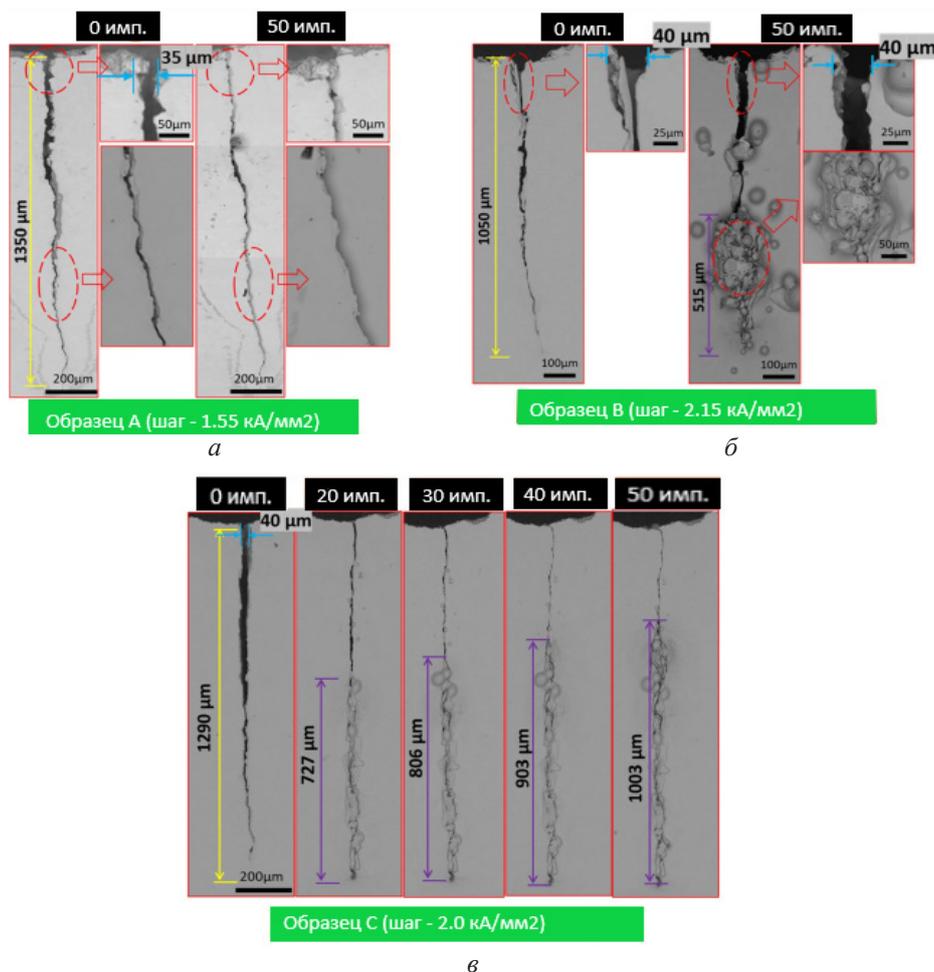


Рис. 8. СЭМ-изображения, показывающие изменения характеристик усталостной трещины до и после электрических импульсов в зависимости от количества импульсов при низкой (а), высокой (б) и средней (в) плотности тока. По результатам работы [21]

Fig. 8. SEM images demonstrating the changes in the characteristics of the fatigue crack prior to and after the electric pulses as a function of the number of pulses at a low (a), high (б) and medium (в) current density, according to [21]

Исходя из вышеописанных результатов, авторами был сделан вывод, что для полного залечивания трещины требуется изменение плотности тока с номером импульса. Для этого был использован образец D, в котором начальная плотность импульсов составляет 2 кА/мм^2 , а спустя 20 шагов ее увеличивали до $2,15 \text{ кА/мм}^2$. В этих условиях трещина была полностью закрыта за 50 импульсов.

Микротомография была применена для подтверждения окончательного залечивания трещин, как показано на рис. 9. Видно, что трещина почти полностью залечена со стороны надрезов. На изображениях, полученных внутри области залечивания, имеется

лишь несколько черных точек или волнистых черных линий. Это указывает на некоторую пористость и дефекты затвердевания, которые неизбежно остаются после залечивания трещин.

Моделирование, описанное выше, согласуется с экспериментом. Так, в образце А не хватило температуры для сплавления трещин; у образца В расплавилась поверхность, но из-за обилия тепловой энергии, что смягчило металл в области трещины, она не закрылась. Образец С показал залечивание трещины, в частности, область сплавления и большие сжимающие напряжения (рис. 10).

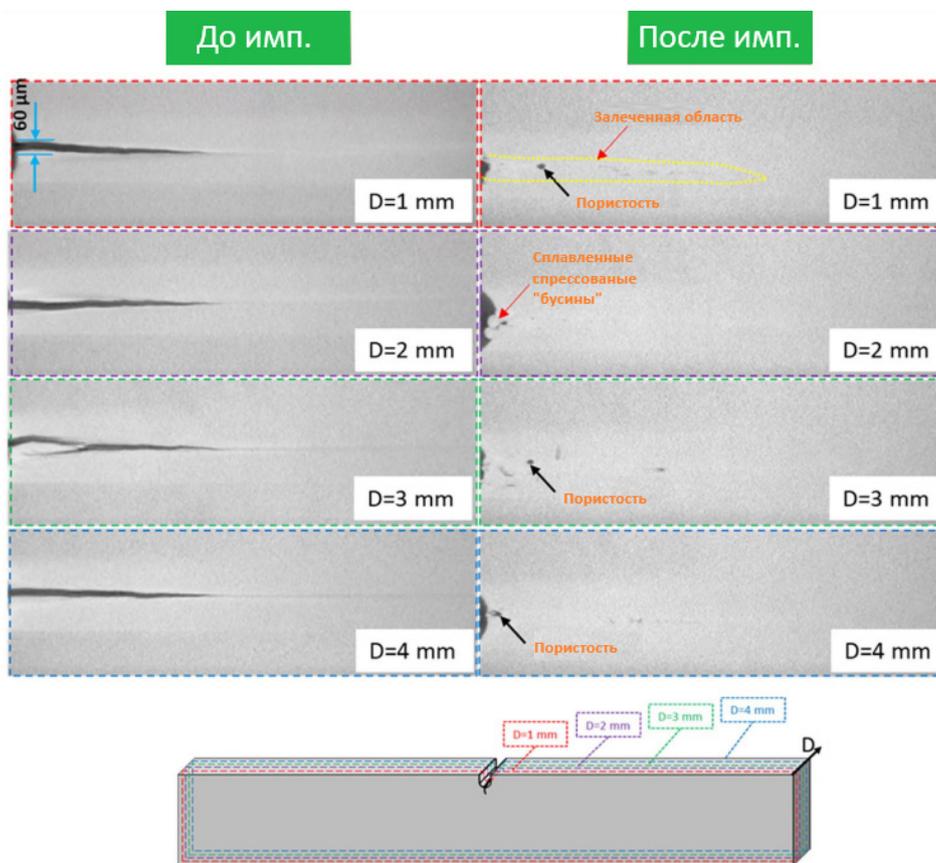


Рис. 9. Изображения, полученные с помощью микротомографа на образце D на различной глубине до и после обработки электрическими импульсами. По результатам работы [21]

Fig. 9. Images obtained using a microtomograph on sample D at different depths prior to and after electric pulse treatment, according to [21]

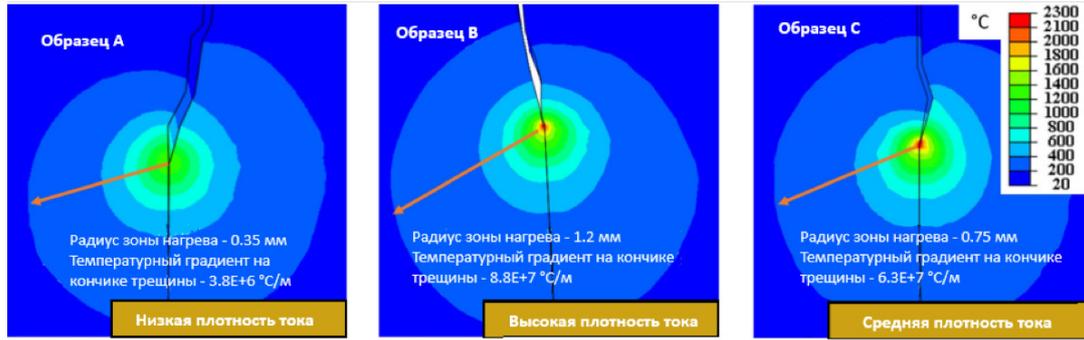


Рис. 10. Температурное поле образца А, образца В и образца С после первого электрического импульса [21]

Fig. 10. Temperature field of sample A, sample B and sample C after the first electric pulse [21]

1.2. *Использование импульсного тока для снижения скорости роста усталостных трещин в электротехнической меди.*

В работе [22] электрические импульсы были использованы для заживления усталостных трещин в чистой меди марки CuETP (JIS C1100). CuETP – это медь, очищенная электролитом, которая широко используется в электротехнике и электронике. Исследователями были использованы образцы, чертеж которых представлен на рис. 11, в середине заготовки была выращена усталостная трещина.

Реверсивные усталостные испытания проводились при комнатной температуре с частотой 10 Гц на электрогидравлической испытательной машине с сервоуправ-

лением (SHIMADAZU 4830, SHIMADAZU Corporation, Nagoya University, Nagoya, Japan). Амплитуда циклического напряжения, прикладываемого к образцу, поддерживалась постоянной. Уровень нагрузки контролировался в соответствии с номинальным напряжением на дне U-образного надреза. Для испытаний на усталостные свойства использовались шесть различных уровней нагрузки с амплитудой напряжения $\pm 50, \pm 70, \pm 90, \pm 111, \pm 120$ и ± 138 МПа (21%, 29%, 38%, 46%, 50% и 58% от предела прочности при растяжении). Три образца использовались для усталостных испытаний с током и без него при каждом уровне нагрузки. В работе использовались следующие параметры тока, представленные в табл. 4.

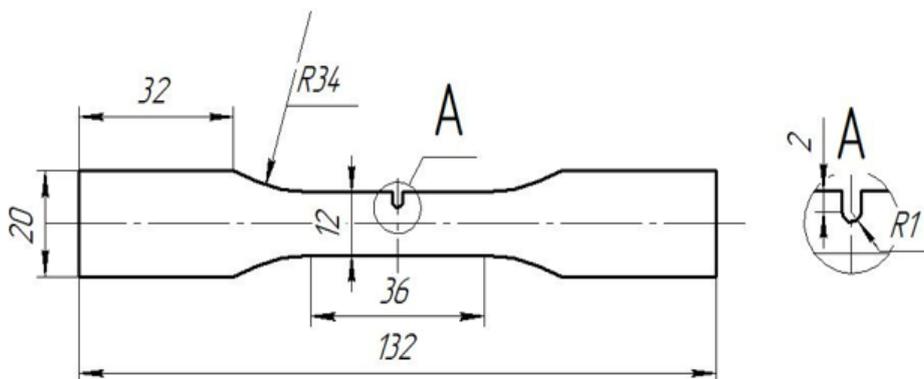


Рис. 11. Чертеж заготовки для испытаний. По результатам работы [22]

Fig. 11. Drawing of the test workpiece, according to [22]

Таблица 4. Параметры электроимпульсных испытаний в образцах усталостных испытаний

Table 4. Parameters of the electric pulse tests in the fatigue test samples

Уровень напряжений, МПа / Stress level, MPa	±50	±90
Плотность тока, А/мм ² / Current density, A/mm ²	150	150
Длительность импульса, мс / Pulse time, ms	0,5	0,5
Количество импульсов за 5 секунд / Number of pulses in 5 seconds	4	4

В результате испытаний авторами был получен срок службы усталостного разрушения N_f образцов с надрезом при шести различных уровнях нагрузки. На рис. 12 показана зависимость (кривая S-N) между средним количеством циклов напряжения до разрушения и номинальной амплитудой напря-

жения. Из рисунка видно, что усталостная долговечность уменьшается с увеличением амплитуды напряжения при нагружении, а кривые σ_N - N_f медных образцов с надрезом демонстрируют равномерную зависимость Мэнсона-Кохфина от областей с низким и высоким числом циклов.

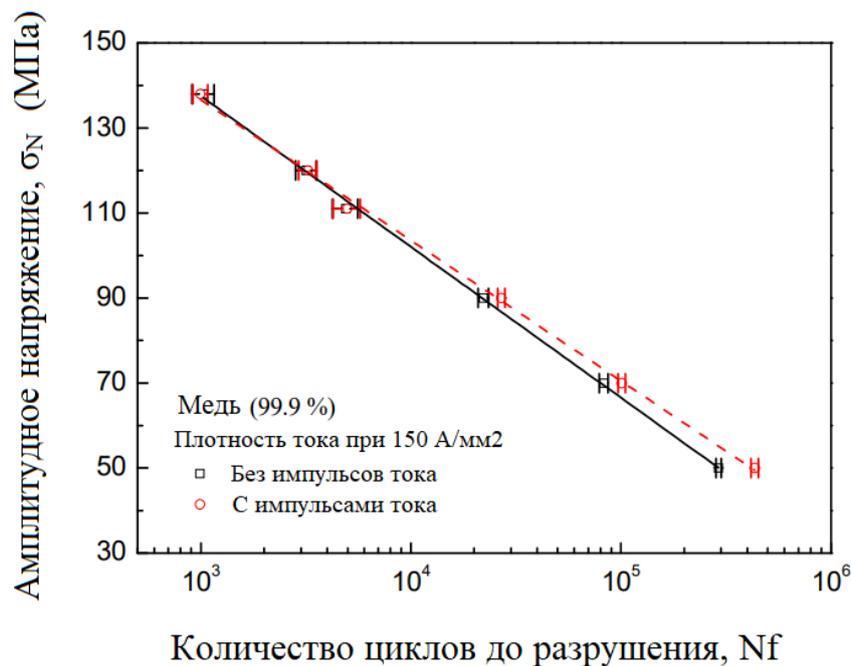


Рис. 12. Кривые зависимости напряжения от количества циклов для образцов с использованием электрических импульсов и без них. По результатам работы [22]

Fig. 12. Curves showing the dependence of stress on the number of cycles for samples with and without the use of electric pulses, according to [22]

Отношение Мэнсона-Коффина рассчитывается как

$$(\Delta\sigma/2)^m N_f = C_1,$$

где $\Delta\sigma$ – диапазон усталостных напряжений, N_f – количество циклов до разрушения, а C_1 и m – константы материала. Зависимости Мэнсона-Коффина для образцов с импульсным током и без него выглядят следующим образом:

$$(\Delta\sigma/2)^{5,68} N_f = 1,95 \times 10^{15},$$

$$(\Delta\sigma/2)^{6,09} N_f = 1,43 \times 10^{16}.$$

Кривая зависимости напряжения от числа циклов с электрическими импульсами находится выше кривой без тока. Константа материала увеличивается с 5,68 до 6,09, что коррелирует с уменьшением наклона после применения импульсного тока. Для образцов с нагрузкой более чем ± 90 МПа усталостная прочность практически не отличается вне зависимости от использования электрических импульсов. При напряжении в ± 50 МПа усталостная прочность была практически в 1,5 раза выше при применении электрического тока, чем без него. Положительное влияние электрического тока на усталостную прочность уменьшается при увеличении напряжений σ_N , что было отмечено Конрадом и его коллегами [23].

Рис. 13, а, б показывает зависимость между скоростью роста усталостной трещины и диапазоном коэффициентов интенсивности напряжений, полученных при приложении нагрузки в ± 50 МПа и ± 90 МПа соответственно. Пунктирная линия же обозначает результат испытаний образца, не подвергнутого электроимпульсной обработке при тех же условиях нагружения. Полые символы показывают поведение материала до электрического импульса, а сплошные символы показывают поведение после ЭИ.

Результат при уровне нагрузки ± 50 МПа показывает, что скорость роста трещин снизилась только после обработки электрическими импульсами. После применения импульсной обработки, как показано на рис. 14, а стрелкой, сплошные символы снизились и находились ниже пунктирной линии до тех пор, пока половинный коэффициент интенсивности напряжений не достиг примерно $7 \text{ МПа}/\text{м}^{1/2}$. Скорость роста трещины уменьшилась в области, выделенной квадратом. Расстояние между сплошными символами и пунктирной линией больше, чем расстояние, вызванное разбросом ошибок, особенно для последующих нескольких тысяч циклов нагружения после электроимпульсной обработки.

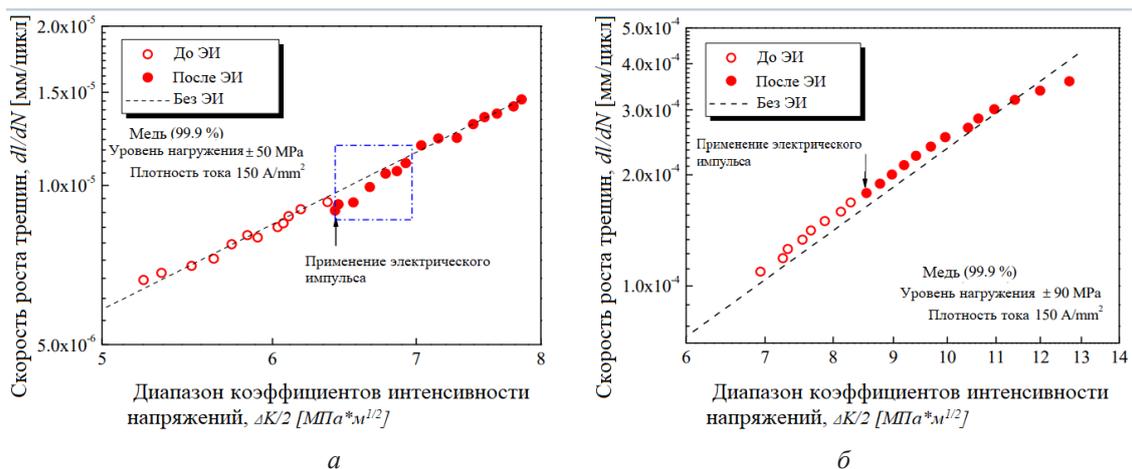


Рис. 13. Скорость роста усталостной трещины в зависимости от диапазона коэффициента интенсивности напряжений для образцов после электроимпульсной обработки и без нее:

(а) уровень нагрузки ± 50 МПа; (б) уровень нагрузки ± 90 МПа. По результатам работы [23]

Fig. 13. Fatigue crack growth rate as a function of the stress intensity coefficient range for samples after electric pulse treatment and without treatment: (a) load level ± 50 МПа; (б) load level ± 90 МПа, according to [23]

В ходе вышеописанного эксперимента авторами было выяснено, что воздействие сильным электромагнитным полем положительно влияет на усталостную прочность и снижает рост трещин, однако, в свою очередь, данная положительная динамика сохраняется при относительно небольших напряжениях (± 50 МПа), а при увеличении нагрузки до ± 90 МПа электрические импульсы практически не влияют на свойства материала.

2. Использование вихревого тока для заживления трещин

2.1. Сочетание вихревого тока и термической обработки для заживления трещин в трубах из магниевого сплава.

Помимо обработки электрическими импульсами, заживление трещин возможно при помощи вихревых токов. В работе [24] исследуется заживление трещин в магниевых сплавах при помощи вихревых токов. Магниевые сплавы достаточно широко распространены и нашли свое применение в автомобильной, аэрокосмической сферах, а также зарекомендовали себя как биоматериалы [25]. В частности, стоит отметить магниевые сплавы, состоящие из редкоземельных материалов (далее Mg-RE), которые славятся своей высокой пластичностью, а также высокой прочностью по сравнению с общеизвестными сплавами на основе Mg [26, 27].

В процессе формовки трубных заготовок из магниевых сплавов возникают микротрещины. Хотя распространение трещин может быть эффективно приостановлено в процессе горячей формовки благодаря наличию процесса заживления при высокой температуре и давлении, некоторые трещины все

равно остаются в формованных заготовках [28]. В холоднодеформированных заготовках ситуация обычно более серьезная. Эти трещины, имеющиеся в металлических изделиях, снижают механические характеристики и остаточный ресурс трубных деталей, что ограничивает их широкое применение и затрудняет дальнейшие операции формовки. В случае термообработки, помимо заживления трещин, имеется риск образования достаточно серьезных дефектов, а также возможно кардинальное изменение свойств металла, вследствие чего он может быть непригоден для дальнейшего использования.

В данной работе материалом заготовки является сплав Mg-RE, состав которого представлен на табл. 5. Из слитка данного материала были сделаны несколько заготовок в форме трубы. После обработки размеры труб были следующие: длина ~ 300 мм, толщина $= 1,7 \pm 0,10$ мм. Затем они были разделены на несколько равных заготовок по 30 мм.

Для пропускания вихревого тока через сплав была создана заготовка, схема которой показана на рис. 14. Трубочатые образцы были закреплены на валу из нержавеющей стали внутри медной катушки. Медная катушка была подключена к высоковольтному импульсному источнику питания, включающему конденсаторную батарею с максимальным напряжением разряда 15 кВ, и конденсатор мог выделять максимальную энергию около 50 кДж. Когда происходил разряд конденсатора в импульсном источнике питания, внутри медных катушек возникала затухающая волна. Трубочатый образец был расположен вне вала из нержавеющей стали, чтобы подавить радиальное сжатие трубчатого образца, как показано на рис. 14.

Таблица 5. Химический состав сплава Mg-RE (вес.%)

Table 5. Chemical composition of the Mg-RE alloy (wt.%)

Состав / Composition	Mg	Gd	Y	Zn	Zr	Mn	Fe
Вес.% / Wt.%	86,46	6,84	5,06	0,62	0,96	0,04	0,02

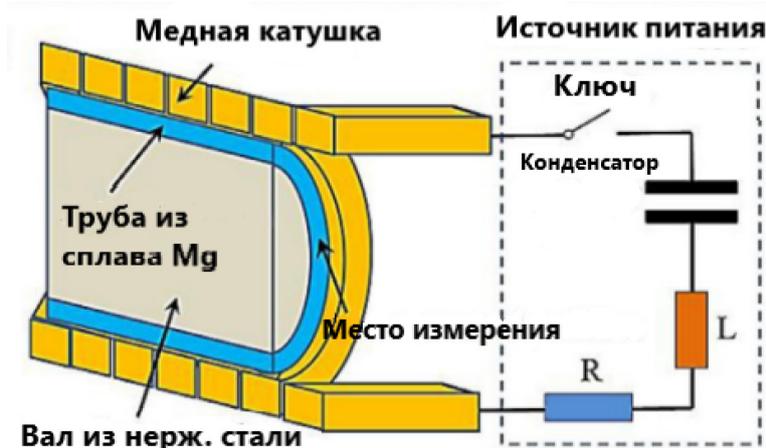


Рис. 14. Схема установки для обработки вихревым током. По результатам работы [24]

Fig. 14. Scheme of the eddy current treatment facility, according to [24]

В табл. 6 представлены параметры эксперимента по обработке образцов из магниевого сплава вихревым током и термообработке. Трубчатые образцы А1-А4, взятые из одной и той же трубы, были подвергнуты различным видам вихретоковой (ВО) обработки. Для сравнения, образец трубки А1 не подвергался ВО, а образцы А2-А4 подвергались ВО до 15 раз при разрядном напряжении 7 кВ. Параметры ВО, такие как напряжение разряда и время обработки, были подобраны таким

образом, чтобы обеспечить эффект залечивания микротрещин и избежать локального плавления. Во время процесса ВО трубчатый образец А2 охлаждался, и его торцевая поверхность наблюдалась с помощью РЭМ после 5, 10 и 15 раз ВО соответственно. Трубчатый образец А3 охлаждался, и торцевая поверхность наблюдалась после 7 и 15 раз ВО соответственно, а образец А4 охлаждался, и торцевая поверхность наблюдалась только после 15 раз ВО.

Таблица 6. Параметры эксперимента по вихретоковой обработке

Table 6. Parameters of the eddy current treatment experiment

Труба 1/ Pipe 1	Количество ВО/ Number of eddy current treatments	Труба 2/ Pipe 2	Количество ВО/ Number of eddy current treatments	Термообработка/ Heat treatment	Труба 2/ Pipe 2	Количество ВО/ Number of eddy current treatments	Термообработка/ Heat treatment
A1	–	B1	5-5-5	–	C1	–	–
A2	5-5-5	B2	5-5-5	Растворное упрочнение/ Solution strengthening	C2	–	Растворное Упрочнение/ Solution strengthening
A3	7-8	B3	5-5-5	Растворное упрочнение/ старение / Solution strengthening/aging	C3	–	Растворное упрочнение/ старение/ Solution strengthening/ aging
A4	15	B4	5-5-5	Старение / Aging	C4	–	Старение / Aging

В ходе обработки вихревым током все микротрещины в образцах практически полностью залечились. При уменьшении интервала охлаждения трещины закрывались быстрее и на большей площади, а также было замечено улучшение механических свойств, таких как прочность и удлинение, что свидетельствует о положительном влиянии температуры на процесс залечивания трещин.

Помимо же обычных заготовок, в эксперименте были задействованы образцы, которые были подвергнуты старению перед обработкой вихревым током. Использование данной термической обработки перед проведением через образец вихревых токов способствовало значительному улучшению прочности, а снижение пластичности было незначительным по сравнению с образцами, которые не были подвергнуты вихревой обработке. К тому же, после растворного упрочнения снижение прочности и улучшение пластичности было достаточно заметным для случая с вихревой обработкой, чем без нее, что обусловлено снижением плотности дислокаций при обработке током.

Чжоу и др. [29] исследовали рекристаллизованную микроструктуру и механические свойства латуни, обработанной при низкой температуре. Результаты показали, что при использовании электроимпульсной обработки можно получить более мелкие рекристаллизованные зерна; таким образом, механические свойства материала могут быть улучшены. Авторы обсуждают механизм образования более мелких рекристаллизованных зерен. Было высказано мнение, что очень короткое время обработки, повышенная скорость зарождения и замедленный рост зерен являются причинами получения более мелких зерен при использовании электроимпульсной обработки.

При нагреве по Джоулю может происходить локальный отжиг, рекристаллизация и плавление металла. Растягивающее остаточное напряжение вокруг вершины тре-

щины окончательно снимается локальным отжигом [30].

2.2. Анализ результатов.

Во всех вышеописанных выше статьях основным механизмом залечивания трещин является Джоулев нагрев, возникающий на вершинах макротрещин в металлических материалах. Учитывая, что воздействие импульсным ЭМП проводится в течение чрезвычайно короткого времени, ее можно рассматривать как адиабатический процесс. Принцип воздействия импульсов тока на трещину схематично представлен на рис. 15. Когда электрический ток течет в образце, в вершине трещины он течет вдоль поверхности трещины, поскольку электрическая проводимость трещины (полости) равна нулю. Поэтому вокруг вершины трещины образуется поле электрического тока высокой плотности, в котором происходит более интенсивный локальный нагрев материала в соответствии с законом Джоуля-Ленца. В зависимости от параметров импульса в вершине трещины может начаться не только плавление, но и испарение металла, сопровождаемое микровзрывом. Термическое сжимающее напряжение возникает из-за быстрого локального теплового расширения в окрестности вершины трещины, в то время как в остальных точках образца материал нагревается значительно меньше.

Чтобы успешно залечить трещину при помощи рассматриваемого воздействия, требуется достижение оптимальной температуры для того, чтобы расплавить вершину трещины, привести к образованию зоны сплавления и достичь нужного температурного сжимающего механического напряжения, смыкающего ее берега. Для достижения данных целей следует тщательно подбирать нужные параметры для электромагнитного воздействия: плотность тока, количество импульсов, а также, как было отмечено в статье [21], подбирать оптимальный способ ЭИ обработки.

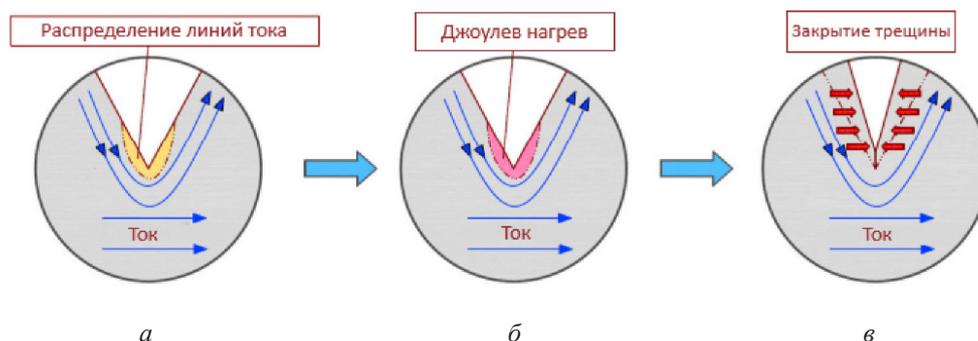


Рис. 15. Схематическое описание воздействия импульсного тока на образец с трещиной: (а) концентрация электрического тока вокруг вершины трещины; (б) локальный нагрев, вызванный током, локализованным у вершины трещины; (в) закрытие трещины в результате теплового расширения и термического сжатия. По результатам работы [22]

Fig. 15. Schematic description of the pulse current action on a sample with a crack: (a) electric current concentration around the crack tip; (б) local heating caused by the current localized at the crack tip; (в) crack closure as a result of heat expansion and thermal compression, according to [22]

Заключение

Использование рассмотренных методов позволяет с определенным успехом залечивать макротрещины в металлических образцах. Следует отметить, что для достижения этого следует тщательно подбирать параметры электромагнитного воздействия.

В представленном обзоре в основном рассмотрены экспериментальные исследования. Вопросы моделирования подобных процессов описаны, например, в статьях [31–38]. Способ измерения импульсных токов большой величины предложен в работе [39]. Обзор последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением можно найти в [40, 41].

Благодарности / Acknowledgments

Работа Бебихова Ю.В. поддержана грантом РНФ № 24-22-00092. Работа 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 научной исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях».

The work of Yu.V. Bebikhov was supported by Russian Science Foundation grant

No. 24-22-00092. This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the state assignment of the Youth Research Laboratory “Metals and Alloys under Extreme Impacts” of Ufa University of Science and Technology (No. 075-03-2024-123/1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов, Д. А., Рааб, Г. И., Асфандияров, Р. Н., Пейкин, Л., & Сюэюань, Ч. (2021). Структурные изменения в сплаве системы Cu-Ni-Si после РКУП при разной температуре. *Materials. Technologies. Design*, 3(4 (6)), 5–10. https://doi.org/10.54708/26587572_2021_3465
2. Tan, J., Wang, S., Fan, Z., Zhang, Z., Jiang, K., Wang, T., Liu, Z., Zhang, G., Jin, W. Reverse cation segregation and crack self-healing of $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{Fe}_{0.9}\text{Mo}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ perovskite four-channel hollow fiber membrane // *Journal of Membrane Science* - 2021. – V. 639. – P. 119753.
3. Yin, K., Luo, Z., Liu, X., Pan, H., Zhi, T., Feng, H., Song, Y., Su, Y. Preparation and application of $\text{Na}_2\text{SiO}_3@$ EC microcapsules for self-healing alkali-activated slag // *Construction and Building Materials*. – 2023. – V. 400. – P. 132651.
4. Men, S.W., Xie, J.M., Liu, X., Yang, Y., Yang, K., Zhang, S.H. A novel crack healing in sprayed FeCrBSi coatings by plasma nitriding // *Vacuum* – 2023. – V. 209 – P. 111768.
5. 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. – V. 43. – P. 3684–3693.

6. Moghadam, A. D. et al. Functional metal matrix composites: self-lubricating, self-healing, and nanocomposites-an outlook // *JOM*. – 2014. – V. 66. – P. 872–881.
7. Wei, D.B., Han, J.T., Tieu, A.K., Jiang, Z.Y. An Analysis on the Inhomogeneous Microstructure in Crack Healing Area // *KEM*. – 2004. – V. 274–276. – P. 1053–1058.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VIII. Электродинамика сплошных сред, 1-е изд., -М.: Гл. изд. физ.-мат. лит., 1959. – 532 с.
9. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока // *Докл. АН СССР*. – 1976. – Т. 227. № 4. – С. 848–851.
10. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. Разрушение вершины трещины силовым электромагнитным полем // *Док. АН СССР*. – 1977. – Т. 237. № 2. С. 325–327.
11. Song, H. and Wang, Z.-J. Microcrack healing and local recrystallization in pre-deformed sheet by high density electropulsing. *Mater. Sci. Eng. A: Struct.* – 2008. – V. 490. – P. 1–6.
12. Zhou, Y.; Zeng, Y.; He, G.; Zhou, B. The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing // *J. Mater. Res.* – 2001. – V. 16. – P.17–19.
13. Zhou, Y.; Guo, J.; Gao, M.; He, G. Crack healing in a steel by using electropulsing technique // *Mater. Lett.* – 2004. – V. 58. – P.1732–1736.
14. Hosoi, A.; Nagahama, T.; Ju, Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field // *Mater. Sci. Eng. A Struct.* – 2012. – V. 533. – P. 38–42.
15. 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. – V. 6. – P. 4213–4225.
16. Kumar, A., Paul, S.K. Healing of fatigue crack in steel with the application of pulsed electric current // *Materialia*. – 2020. – V. 14 – P.100906.
17. Yu, T., Deng, D., Wang, G., Zhang, H. Crack healing in SUS304 stainless steel by electropulsing treatment // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – V.113. – P. 989–994.
18. Hu, G., Zhu, Y., Tang, G., Shek, C., Liu, J. Effect of Electropulsing on Recrystallization and Mechanical Properties of Silicon Steel Strips // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2011. – V. 27. – P.1034–1038.
19. Song, H., Wang, Z.-J. Microcrack healing and local recrystallization in pre-deformed sheet by high density electropulsing // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – V. 490. – P. 1–6.
20. Xiao, S.H., Guo, J.D., Wu, S.D., He, G.H., Li, S.X., Recrystallization in fatigued copper single crystals under electropulsing // *Scripta Materialia*. – 2002. – V. 46. – P. 1–6.
21. Cai, Q., Zhou, M., Bagherpour, E., Hosseini, S., Mendis, C., Chang, I., Assadi, H. New insight into crack-healing mechanism via electropulsing treatment // *Metall Mater Trans A*. – 2023. – V.54. – P.2960–2974.
22. Yin, Y., Chen, H., Morita, Y., Toku, Y., Ju, Y. Effect of electropulsing treatment on the fatigue crack growth behavior of copper // *Materials* – 2018. – V. 11. – P. 2168.
23. Conrad, H.; White, J.; Cao, W.D.; Lu, X.P.; Sprecher, A.F. Effect of electric current pulses on fatigue characteristics of polycrystalline copper // *Mater. Sci. Eng. A Struct* – 1991. – V. 145. – P. 1–12.
24. Xu, W., Yang, C., Yu, H., Jin, X., Yang, G., Shan, D., Guo, B. Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube // *Journal of Magnesium and Alloys* – 2021. – V. 9. – P. 1768–1781.
25. Peron, M., Torgersen, J., Berto, F. Mg and its alloys for biomedical applications: Exploring corrosion and its interplay with mechanical failure. *Metals* – 2017. – V. 7. – P. 252.
26. Luo, K., Zhang, L., Wu, G., Liu, W., Ding, W. Effect of Y and Gd content on the microstructure and mechanical properties of Mg–Y–RE alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2019. – V. 7. – P. 345–354.
27. Zhang, J., Liu, S., Wu, R., Hou, L., Zhang, M. Recent developments in high-strength Mg-RE-based alloys: Focusing on Mg-Gd and Mg-Y systems // *Journal of Magnesium and Alloys* – 2018. – V. 6. – P. 277–291.
28. Wei, D., Han, J., Jiang, Z.Y., Lu, C., Tieu, A.K. A study on crack healing in 1045 steel // *Journal of Materials Processing Technology* – 2006. – V.177. – P. 233–237.
29. Zhou, Y., Xiao, S., Guo, J. Recrystallized microstructure in cold worked brass produced by electropulsing treatment // *Mater. Lett.* – 2004. – V.58. – P.1948–1951
30. Lin, S., Beom, H.G., Cui, C.B. Electric field intensity factors for conducting paths in anisotropic dielectric bimerials. // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* – 2013. – V. 14. – P. 439–44.
31. Kukudzhанov, K.V. Modeling of self-healing of microcracks in the process of longitudinal electroplastic rolling (2022) *Journal of Physics: Conference Series*, 2231 (1), 012022.
32. Kukudzhанov, K.V., Levitin, A.L., Ugurchiev, U.Kh. Healing of cracks in plates by strong electromagnetic field (2021) *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 25 (1), pp. 193–202.

33. Kukudzhanov, K.V., Levitin, A.L. Modelling of some mechanism of metal electroplasticity under pulsed high-energy electromagnetic field action (2019) *Journal of Physics: Conference Series*, 1205 (1), 012032.
34. Kukudzhanov, K.V., Levitin, A.L. Healing of damaged metal by a pulsed high-energy electromagnetic field (2018) *Journal of Physics: Conference Series*, 991 (1), 012049.
35. Kukudzhanov, K.V., Levitin, A.L. Phase transformations in metals stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field (2017) *Procedia IUTAM*, 23, pp. 84-100.
36. Kukudzhanov, K.V. On healing metal damages using high-energy pulsed electromagnetic field (2017) *PNRPU Mechanics Bulletin*, (2), pp. 99-124.
37. Kukudzhanov, K.V. Modeling the treatment of high-energy pulsed electromagnetic field of the micro-cracks in a polycrystalline metal (2015) *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015 (4), pp. 138-158.
38. Kukudzhanov, K.V., Levitin, A.L. Deformation processes of elastoplastic material with defects under electrodynamic loading (2015) *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015 (1), pp. 106-120.
39. Татаринов В.П., Татаринов П.С., Бебихов Ю.В., Семёнов А.С., Дмитриев С.В. Разработка способа измерения импульсных токов большой величины. *Вестник СВФУ*. 2024, Т. 21, №1. С. 81–88. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88
40. Абдуллина Д.У., Бебихов Ю.В., Татаринов П.С., Дмитриев С.В. Обзор последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Т. 20, № 4. С. 469–483. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006.
41. S.V. Dmitriev, A.Y. Morkina, D.V. Tarov, G.R. Khalikova, D.U. Abdullina, P.S. Tatarinov, V.P. Tatarinov, A.S. Semenov, O.B. Naimark, A.V. Khokhlov, V.V. Stolyarov. Effect of repetitive high-density current pulses on plastic deformation of copper wires under stepwise Loading. // *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*. – 2024. – V. 1 (1). <https://doi.org/10.31181/smeor1120243>