

DOI: 10.15593/2224-9982/2020.61.05

УДК 539.3

К.В. Кукуджанов, А.В. Ченцов

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЗАЛЕЧИВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ЦИНКЕ

Представлены результаты эксперимента по обработке цинковых образцов короткоимпульсным высокоэнергетическим электромагнитным полем с целью изучения залечивания микропор и микротрещин внутри материала. Описаны использованная установка, методика экспериментов, проведен анализ полученных данных. Подтверждается гипотеза о том, что при воздействии импульсным током в цинке может происходить уменьшение поврежденности (пористости) материала, вплоть до полного залечивания некоторых дефектов путем сварки берегов микротрещин расплавленным металлом.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное воздействие, залечивание микродефектов, одноосное растяжение, цинк.

K.V. Kukudzhanov, A.V. Chentsov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PULSE ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE HEALING OF DAMAGE IN ZINC

The article presents the results of an experiment on short-term pulse high-energy electromagnetic treatment of zinc samples in order to study the healing of micropores and microcracks inside the material. The article presents the test procedures used in experiments, results and microstructural analysis of the samples. The hypothesis is confirmed that pulse EM treatment in zinc lead to decrease in damage (porosity) of the material, up to the complete healing of some defects by welding the edges of microcracks with molten metal.

Keywords: pulse EM treatment, microdefects healing, uniaxial tension, zinc.

Введение

Современная аэрокосмическая промышленность заинтересована как в улучшении механических свойств используемых материалов, так и в восстановлении ресурса изготовленных из этих материалов деталей и механизмов.

Достаточно давно известно, что электрический ток влияет на механические свойства металлов. В работе [1] показано, что усталостная долговечность стали была увеличена путем приложения электрического тока во время усталостного нагружения.

В работах [2–4] подробно исследовано влияние импульсного тока высокой плотности на монокристаллические металлы и показано, что подвижность дислокаций увеличивается

за счет их взаимодействия со свободными электронами, увлекаемыми электромагнитным полем. Это уменьшало предел текучести труднодеформируемых металлов и облегчало их механическую обработку.

Предположение о том, что в металле может происходить залечивание (изменение) дефектов под действием кратковременных импульсов высокоэнергетического электромагнитного поля (ВЭМП), высказывалось рядом авторов [5–15]. Авторы исходили из того, что в окрестности дефектов (в их острых кончиках) происходит концентрация поля плотности тока и интенсивное выделение джоулева тепла. При этом в данных работах гипотеза о залечивании была подкреплена аналитическими и численными решениями модельных

задач [9–15], из решения которых следовало, что в вершинах макротрещин могут возникать сжимающие напряжения, а их берега могут сближаться. Таким образом, под залечиванием в работах [5–15] понималось как возникновение сжимающих напряжений в вершинах микротрещин, так и сближение их берегов, сопровождаемое выплавлением кратеров (пор) в вершинах, что создавало препятствия для дальнейшего распространения трещин в материале.

С опорой на термодинамические соображения в работе [16] было установлено, что при воздействии током, превышающим некоторую пороговую величину, в проводящем материале может происходить уменьшение «длины» эллиптической трещины.

В работах [17–20] была предложена модель воздействия импульсного ВЭМП на предварительно поврежденный материал с микродефектами, которая показала, что при воздействии импульсным током в металле может происходить уменьшение объема микродефектов и, как следствие, поврежденности (пористости) материала, вплоть до полного залечивания некоторых микротрещин путем сварки их берегов расплавленным металлом.

Из проведенных экспериментов [4, 5, 21–27] также следовало, что внутри материала происходит восстановление сплошности структуры металла, сопровождаемое изменением объемного содержания микродефектов. Это приводило для исследуемых материалов к улучшению их макроскопических свойств – увеличению предельной пластической деформации до разрушения или увеличению количества циклов до разрушения при циклическом нагружении.

В последние годы были проведены экспериментальные исследования по залечиванию трещин в металлических материалах [28–31]. В работе [28] была залечена остроконечная трещина в пластине из закаленной стали путем применения импульсного тока высокой плотности. Варьируя значения плотности тока

в тонких образцах, авторам работ [29–30] удалось залечить усталостную макротрещину в стали в ее вершине без образования кратера, а в работе [31] были залечены поверхностные микротрещины, образовавшиеся при пластической деформации в тонком листе из титанового сплава.

Таким образом, вопрос о залечивании поврежденности (на уровне микродефектов) внутри материала получил в вышеперечисленных работах лишь косвенное экспериментальное подтверждение, тогда как представляется, что его следует подтвердить прямым исследованием микроструктуры образцов до и после воздействия ВЭМП.

В настоящей работе исследуются некоторые аспекты процессов эволюции дефектов структуры, таких как микротрещины и микропоры размером до 1,0 мкм, в поликристаллическом цинке при его обработке кратковременными импульсами ВЭМП. Целью работы является экспериментальное подтверждение возможности залечивания микродефектов в поликристаллическом металле при воздействии на него ВЭМП определенной интенсивности и продолжительности.

Эксперименты

Исследовался поликристаллический цинк марки ЦО (Zn 99,975 %), химический состав которого приведен в таблице. Образцы вырезались из листа металла, изготовленного путем горячей прокатки (рис. 1). Размеры цинковых образцов выбирались следующими: общая длина – 125 (±5) мм; длина рабочей части – 60 (±0,15) мм; ширина – 6,7 (±0,15) мм; толщина – 2,4 (±0,15) мм; площадь поперечного сечения – 16 мм². На рис. 1, а показан вид образца до и после растяжения, а на рис. 1, б – образец, установленный в разрывной машине (виден также внешний экстензометр).

В достаточно чистом цинке рекристаллизация начинается уже при температурах, близких к 50 °С. На температуру рекристаллизации

Химический состав ЦО (Zn 99,975 мас. %)

Fe	Al	Cu	As	Pb	Zn	Sn	Cd	Примесей
до 0,005	до 0,005	до 0,001	до 0,0005	до 0,013	min 99,975	до 0,001	до 0,004	всего 0,025

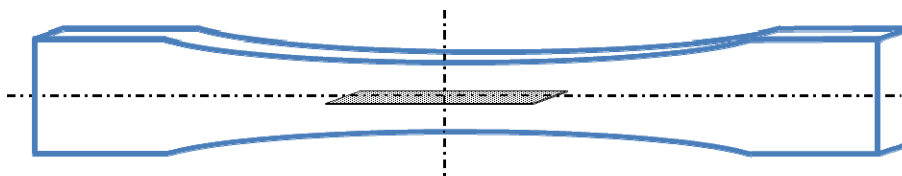


Рис. 1. Схема образца (в центре обозначено сечение для изготовления шлифов)

цинка сильное влияние оказывает содержание примесей и их химический состав. Образцы предварительно подвергались термообработке (отжигу), во-первых, для снятия внутренних остаточных напряжений, возникших при прокатке и последующей механической обработке, и, во-вторых, для получения сравнительно однородной (равноосной) зеренной структуры поликристаллического металла. Процесс термообработки был следующим: исследуемые образцы сначала равномерно нагревались до температуры 50 °С в течение 3,5 мин, после чего резко охлаждались при температуре 3 °С в течение 10 мин.

В экспериментах использовалось следующее оборудование: универсальная разрывная машина MTS Synergy 400; генератор ГОРН импульсного воздействия ВЭМП; исследовательский микроскоп Zeiss Axio Imager.D1m; сканирующий электронный микроскоп Quanta 650.

В процессе пластического деформирования (растяжения) образцов в них происходит рост исходных микродефектов и возникновение новых дефектов, что приводит при определенной деформации, которая называется предельной пластической деформацией, к макроразрушению металла в области образования шейки (рис. 2).

В работе рассматривалось влияние серии периодических прямоугольных импульсов ВЭМП на изменение микроструктуры цинковых образцов. Продолжительность единичных

импульсов была примерно 20 мкс, период повторения импульсов 1000 мкс. Продолжительность приложенной серии импульсов – 3,0 с. Форма единичного импульса приведена на рис. 3. Приложенное ВЭМП индуцировало в металле ток с плотностью $j \approx 4,0 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$.

Для этого проводились сравнения микроструктуры следующих серий образцов:

А. Недеформированных образцов.

В. Деформированных до разрушения образцов.

С. Деформированных до состояния, предшествующего разрушению образцов.

Д. Деформированных до состояния, предшествующего разрушению образцов, а после этого подвергшихся воздействию вышеуказанного импульсного ВЭМП.

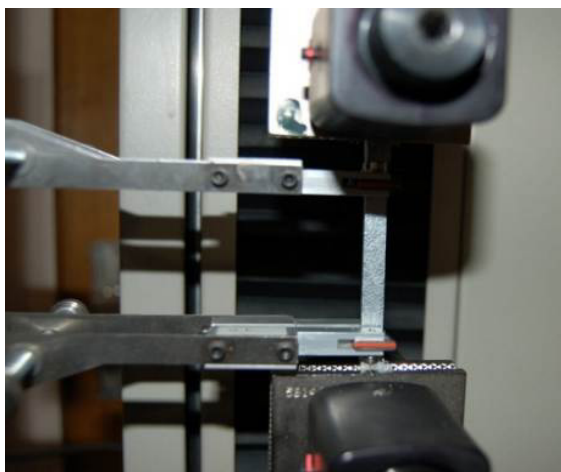


Рис. 2. Вид образца в захватах

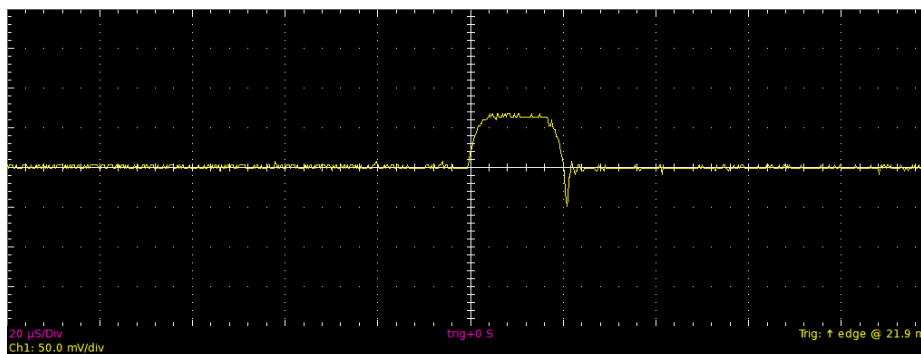


Рис. 3. Форма единичного импульса ВЭМП

Образцы В растягивались в разрывной машине до макроразрушения. Разрыв образца при его растяжении происходил в области образования шейки после интенсивного пластического течения.

Образцы С растягивались в разрывной машине до состояния, близкого к разрушению (рис. 4, кривая 1). За него принималось состояние, при котором напряжение достигало величины $\sigma^* = 0,97\sigma_{\max}$, где σ_{\max} – максимальное напряжение в образце, доведенном до разрушения (серия В). После чего образец разгружался. Действительно, наблюдения показали, что при этом значении напряжения в образцах хорошо просматривалось образование шейки, а вероятность макроразрушения при дальнейшем нагружении резко возрастала. Ввиду этого полагалось, что это состояние непосредственно предшествует разрыву образца.

Далее образцы С повторно растягивались, вплоть до разрушения (рис. 4, кривая 2). Величина деформации до макроразрушения при этом не превышала 2 %, а достигаемые напряжения не превышали 90 % σ_{\max} .

Образцы D растягивались в разрывной машине до напряжения $\sigma^* = 0,97\sigma_{\max}$, после чего подвергались воздействию импульсного ВЭМП вышеуказанной интенсивности и продолжительности.

Плоскости, по которым изготавливались шлифы и исследовалась микроструктура металла, выбирались, как показано на рис. 1 (сечение образца вдоль продольной оси симметрии образца в области шейки).

Залечивание поврежденности именно в области шейки (области с максимальной поврежденностью, в которой идет формирование поверхности последующего макроразрушения) после обработки образца ВЭМП позволяет увеличить предельную пластическую деформацию до разрушения. Ввиду этого основной интерес для исследования представляли микродефекты и поврежденность (пористость) внутри материала, которые наблюдались вблизи шейки в образцах С и D и вблизи поверхности разрушения в образцах В. Исходя из этого изготовленные шлифы исследовались с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов в этих местах при различных увеличениях.

Сравнительное исследование одних и тех же шлифов, проведенное с помощью оптического

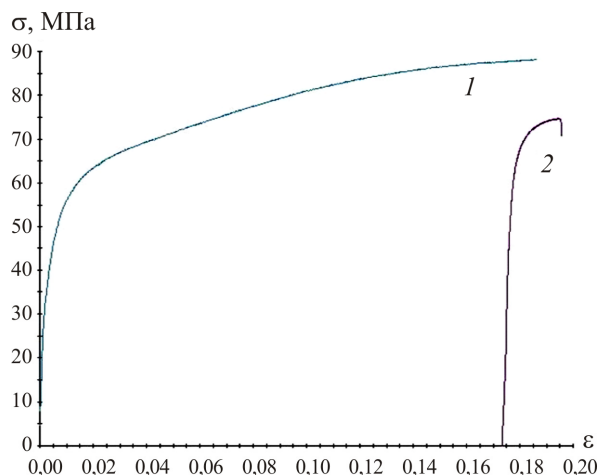


Рис. 4. Диаграмма растяжения образцов серии С

и сканирующего электронного микроскопов (рис. 5), показало, что для исследования микродефектов в металле можно ограничиться оптическим микроскопом Zeiss Axio Imager.D1m с дополнительной линзой, который дает увеличение, превышающее $\times 2000$. Дефекты на соответствующих микрофотографиях отображаются черным цветом. Максимальные линейные размеры этих микродефектов составляют несколько микрон.

Под поврежденностью в данной работе будем понимать пористость материала, рассчитанную исходя из суммарной площади наблюдаемых на шлифах микродефектов определенных размеров.

Результаты экспериментов

В экспериментах установлено, что в исходном, недеформированном металле (образец А) имеется незначительное количество микродефектов (микропор, микротрещин), размеры которых варьируются от 0,2 до 100 мкм.

В состоянии, предшествующем макроразрушению, в области шейки образца наблюдаются дефекты различных размеров – от 0,2 мкм до нескольких сотен микрометров. При этом поврежденность (пористость) цинка, рассчитанная для дефектов линейных размеров в диапазоне 0,2–1,0 мкм, может локально достигать значений 0,20.

На рис. 6 представлены панорамные (обзорные) фотографии микроструктуры недеформированного образца А (см. рис. 6, а), образца В в области поверхности макроразрушения (см. рис. 6, б) и образца D в области образования шейки, там, где образовалась бы

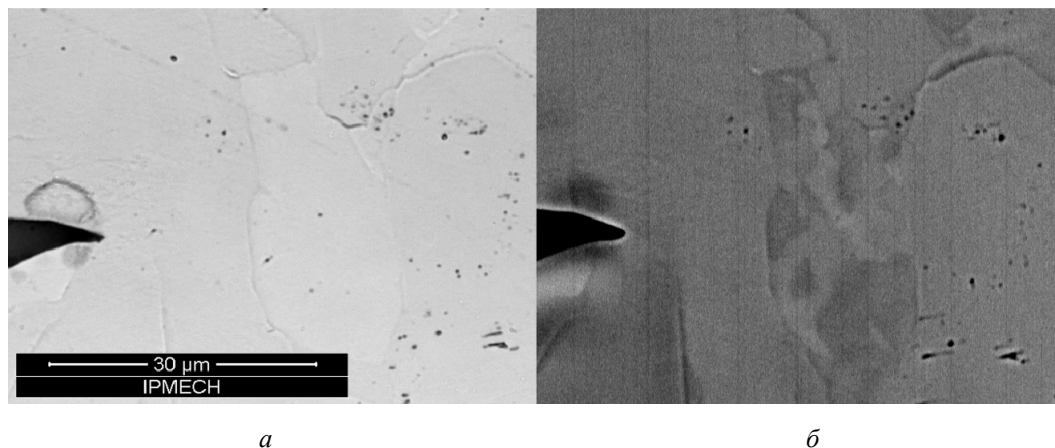


Рис. 5. Микродефекты области образования шейки в образце, наблюдаемые в оптический микроскоп (а) и в сканирующий электронный микроскоп (б)

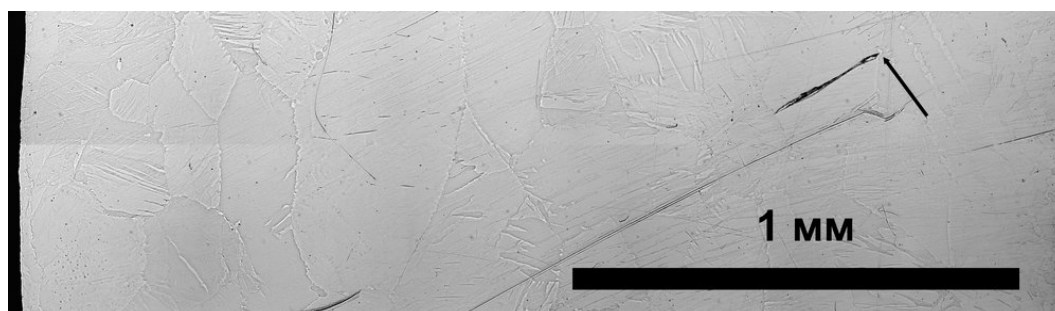
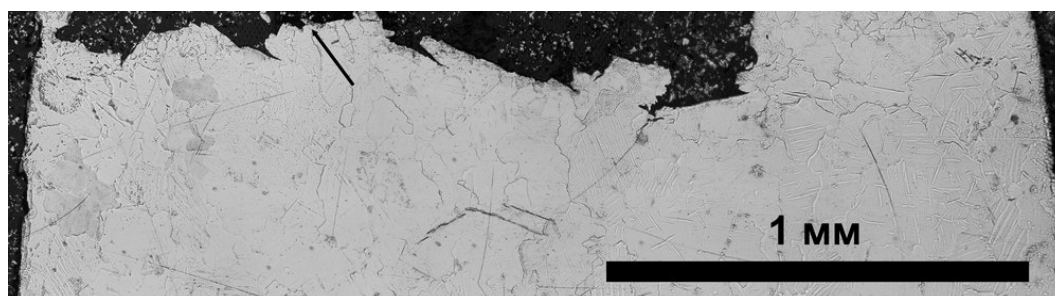
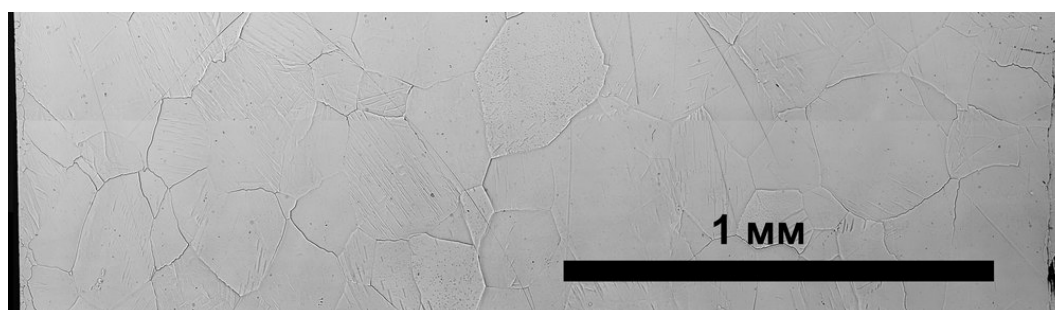
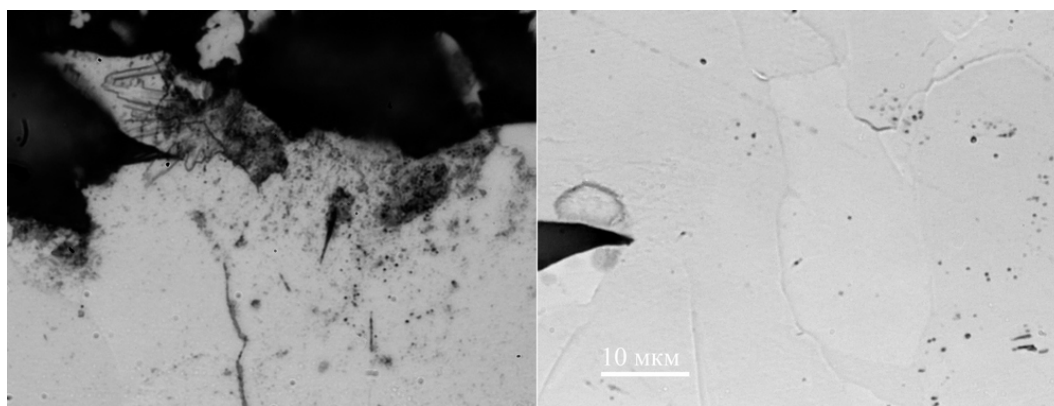


Рис. 6. Панорамные фотографии микроструктуры. Размер по горизонтали – толщина образца (2,4 мм)



а

б

Рис. 7. Микродефекты в области шейки образцов:
а – без ВЭМП образец В; б – после воздействия ВЭМП образец D

поверхность макроразрушения, если бы мы продолжили растяжение образца (см. рис. 6, в). На всех трех снимках справа и слева на рис. 6 видны вертикальные внешние границы образца, а для образца В (см. рис. 6, б) также видна изломанная поверхность макроразрушения. Микродефекты на данных фотографиях отображаются темным цветом. Из сравнения рис. 6, а–в видно, что количество микродефектов и, соответственно, поврежденность в этих образцах сильно различаются. Максимальная поврежденность наблюдается в образце В вблизи поверхности разрушения. После воздействия импульсным ВЭМП поврежденность в значительной степени заживается: количество и суммарная площадь микродефектов (которые наблюдаются на рис. 3, в в виде темных областей (пятен) на светлом фоне) очень сильно уменьшаются по сравнению с их количеством и площадью на рис. 6, б.

Подтверждение тому, что количество микродефектов и локальная поврежденность образцов значительно уменьшаются после воздействия ВЭМП, приведено на рис. 7. На данном рисунке представлены микрофотографии образца В (см. рис. 4, а) в области поверхности макроразрушения, указанной стрелкой на рис. 3, б, и образца D (см. рис. 7, б) в области образования шейки, указанной стрелкой на рис. 6, в. Количество дефектов, а также локальная поврежденность образцов (рассчитанная для микродефектов размером 0,2–1,0 мкм)

на рис. 7, а более чем на порядок превосходит их количество и локальную поврежденность на рис. 7, б. Таким образом, сравнение микроstructures образцов (см. рис. 7) доказывает возможность значительного уменьшения поврежденности в области шейки образца в результате воздействия ВЭМП.

Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты проведенного численного моделирования [17–20], которое показало, что при воздействии импульсным током в цинке может происходить уменьшение поврежденности (пористости) материала, вплоть до полного заживания некоторых дефектов путем сварки берегов микротрещин расплавленным металлом.

Вывод

В ходе работы выяснено влияние рассматриваемого воздействия ВЭМП на микропоры и микротрещины в поликристаллическом цинке, образовавшиеся в процессе интенсивной пластической деформации при растяжении. После приложения рассматриваемого ВЭМП внутри цинковых образцов наблюдается уменьшение поврежденности (пористости) вследствие заживания микродефектов (микропор, микротрещин).

Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А17-117021310380-1 при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-08-00958.

Библиографический список

1. Влияние электрического тока на малоцикловую усталость стали / Г.В. Карпенко, О.А. Кузин, В.И. Ткачев, В.П. Руденко // Докл. АН СССР. Сер. Физика. – 1976. – № 21. – С. 159–160.
2. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства) / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин; Ин-т комп. исслед. – М.; Ижевск, 2004. – Т. 1. – 590 с.
3. Conrad H. A study into the mechanism (s) for the electroplastic effect in metals and its application to metalworking, processing and fatigue: final report ARO proposal number 23090-MS. – 1989. – 52 p.
4. Effect of electric current pulses on fatigue characteristics of polycrystalline copper / H. Conrad, J. White, W.D. Cao, X.P. Lu, A.F. Sprecher // Materials Sci. and Eng.: A. – 1991. – Vol. 145, no. 1. – P. 1–12.
5. 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.
6. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. Разрушение вершины трещины силовым электромагнитным полем // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 237, № 2. – С. 325–327.
7. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. Влияние локально-неоднородного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 4. – С. 184–187.
8. Пластичность и прочность металлических материалов с учетом импульсного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля / Н.Н. Беклемишев, В.Н. Кукуджанов, В.А. Порохов [и др.]; ИПМ АН СССР. – М., 1989. – 56 с. (препринт № 372).
9. Партон В.З., Кудрявцев Б.А., Рубинский Б.Д. Распространение трещины под действием сильного электрического поля // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 250, № 5. – С. 1096–1100.
10. Ключников В.Д., Овчинников И.В. Плоская задача о воздействии мгновенного точечного источника тепла // Изв. АН СССР. МТТ. – 1988. – № 4. – С. 118–122.
11. Овчинников И.В. Определение ресурса пластичности при воздействии тока // Проблемы прочности. – 1993. – № 6. – С. 54–59.
12. Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В. Исследование влияния динамического воздействия электрического тока на механические свойства материалов с упорядоченной структурой дефектов // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – № 3. – С. 188–199.
13. Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В. Модель термоэлектропластичности изменения механических свойств металлов на основе реорганизации структуры дефектов под воздействием импульсного электрического тока // Изв. РАН. МТТ. – 2011. – № 6. – С. 6–21.
14. Коломиец А.В., Кукуджанов В.Н., Кукуджанов К.В. О переходе неоднородных упругопластических материалов с дефектами в макроразрушенное состояние / ИПМех РАН. – М., 2013. – 42 с. (препринт № 1053).
15. Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. Процессы деформирования упругопластического материала с дефектами при электродинамическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 1. – С. 106–120.
16. Qin R.S., Su S.X. Thermodynamics of crack healing under electropulsing // J. Mater. Res. – 2002. – Vol. 17, no. 8. – P. 2048–2052.
17. Кукуджанов К.В. Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 138–158.
18. Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. Процессы трансформации и взаимодействия микротрещин в металле под воздействием высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 2. – С. 89–110.
19. Кукуджанов К.В. О залечивании поврежденности металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 99–124.
20. Кукуджанов К.В. Моделирование залечивания поврежденности металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем // Письма о материалах. – 2018. – Т. 8, № 1. – С. 27–32.
21. Song H., Wang Z.-J., Gao T.-J. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet // Trans. Nonferrous Soc. China. – 2007. – Vol. 17. – P. 87–92.

22. Song H., Wang Z.-J. Microcrack healing and local recrystallization in pre-deformed sheet by high density electropulsing // *Materials Sci. and Eng. A.* – 2008. – Vol. 490, no. 1–2. – P. 1–6.
23. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts / L.B. Zuev, V.Ya. Tsellermaer, V.E. Gromov, V.V. Murav'ev // *Technical Physics.* – 1997. – Vol. 49, no. 2. – P. 1094–1096.
24. Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability / L.B. Zuev, O.V. Sosnin, D.Z. Chirakadze, V.E. Gromov, V.V. Murav'ev // *J. of Applied Mech. and Techn. Phys.* – 1998. – Vol. 39, no. 4. – P. 639–641.
25. Акустический контроль долговечности стальных образцов и восстановление их ресурса / Л.Б. Зуев, О.В. Соснин, Д.З. Чиракадзе [и др.] // *Изв. РАН. Сер. физическая.* – 1997. – № 5. – С. 1019–1023.
26. Электростимулированное восстановление ресурса выносливости сварных соединений / В.Е. Громов, Д.З. Чиракадзе, Е.В. Семакин [и др.] // *Изв. РАН. Сер. физическая.* – 1997. – № 5. – С. 1019–1023.
27. The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing / Z. Yizhou, Z. You, H. Guanhu, Z. Benlian // *J. of Materials Res.* – 2001. – Vol. 16. – P. 17–19.
28. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing / J. Yu, H. Zhang, D. Deng, S. Hao, A. Iqbal // *Chinese J. of Mech. Eng.* – 2014. – Vol. 27, no. 4. – P. 745–753.
29. Hosoi A., Nagahama T., Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field // *Materials Sci. and Eng. A.* – 2012. – Vol. 533. – P. 38–42.
30. Hosoi A., Kishi T., Ju Y. Healing of fatigue crack treated with surface-activated pre-coating method by controlling high-density electric current // *13th Int. Conf. on Fracture, June 16–21, 2013.* – Beijing, China, 2013. – P. 233–245.
31. Self-healing of damage inside metals triggered by electropulsing stimuli / H. Song, Z.-J. Wang, X.-D. He, J. Duan // *Scientific Reports.* – 2017. – Vol. 7. – P. 7079.

References

1. Karpenko G.V., Kuzin O.A., Tkachev V.I., Rudenko V.P. Vliyaniye elektricheskogo toka na malotciklovuyu ustalost stali [Influence of an electric current upon the low-cycle fatigue of steel]. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1976, no. 21, pp. 159-160.
2. Troitskiy O.A. Baranov Yu.V., Avramov Yu.S., Shlyapin A.D. Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov (teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva) [Physical foundations and processing technologies of modern materials (theory, technology, structure and properties)]. *Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Science*, 2004, vol. 1, 590 p.
3. Conrad H. A study into the mechanism (s) for the electroplastic effect in metals and its application to metalworking, processing and fatigue. *Final Report ARO Proposal Number 23090-MS*, 1989, 52 p.
4. Conrad H., White J., Cao W.D., Lu X.P., Sprecher A.F. Effect of electric current pulses on fatigue characteristics of polycrystalline copper // *Materials Science and Engineering: A*, 1991, Vol. 145, no. 1, pp. 1-12.
5. Finkel V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. O vozmozhnosti tormozheniya bystrykh treshchin impul'sami toka [On the possibility of braking fast cracks by current pulses]. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1976, Vol. 227, no. 4, pp. 848-851.
6. Finkel V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. Razrushenie vershiny treshchiny silovym elektromagnitnym polem [Destruction of the crack tip by a force electromagnetic field]. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1977, V. 237, no. 2, pp. 325-327.
7. Beklemishev N.N., Koryagin N.I., Shapiro G.S. Vliyanie lokalno-neodnorodnogo elektromagnitnogo polya na plastichnost i prochnost provodyashchikh materialov [The effect of a locally inhomogeneous electromagnetic field on the ductility and strength of conductive materials]. *Izvestiya AN SSSR, Metally*, 1984, No. 4, pp. 184-187.
8. Beklemishev N.N., Kukudzhyanov V.N., Porokhov V.A. et al. Plastichnost i prochnost metallicheskih materialov s uchetom impul'snogo vozdeystviya vysokoenergeticheskogo elektromagnitnogo polya [Plasticity and strength of metallic materials, taking into account the pulsed effects of a high-energy electromagnetic field]. *Preprint № 372. IPM AN SSSR, Moscow*, 1989, 56 p.
9. Parton V.Z., Kudryavtsev B.A., Rubinskiy B.D. Rasprostraneniye treshchiny pod deystviem silnogo elektricheskogo polya [Crack propagation under the influence of a strong electric field]. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1981, Vol. 250, No. 5, pp. 1096-1100.

10. Klyushnikov V.D., Ovchinnikov I.V. Ploskaya zadacha o vozdeystvii mgnovennogo tochechnogo istochnika tepla [Plane Problem of Effect of an Instantaneous Point Heat Source]. Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 1988, Vol. 23, No. 4, pp. 113-117.

11. Ovchinnikov I.V. Opredelenie resursa plastichnosti pri vozdeystvii toka [Determination of plasticity resource under the influence of current]. Strength of Materials, 1993, No. 6, pp. 54-59.

12. Kukudzhанov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V. Issledovaniye vliyaniya dinamicheskogo vozdeystviya elektricheskogo toka na mekhanicheskiye svoystva materialov s uporyadochennoy strukturoy defektov [Study of the Influence of Electric Current Dynamical Action on Mechanical Properties of Materials with Ordered Structure of Defects]. Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 2010, Vol. 45, No. 3, pp. 465-475.

13. Kukudzhанov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V. Model termoelektroplastichnosti izmeneniya mekhanicheskikh svoystv metallov na osnove reorganizatsii struktury defektov pod vozdeystviyem impul'snogo elektricheskogo toka [A Model of Thermo-electroplasticity of Variations in the Mechanical Properties of Metals Based on Defect Structure Reorganization under the Action of Pulse Electric Current]. Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 2011, Vol. 46, No. 6, pp. 814-827. DOI: 10.3103/S0025654411060021.

14. Kolomiets A.V., Kukudzhанov V.N., Kukudzhанov K.V. O perekhode neodnorodnykh uprugoplasticheskikh materialov s defektami v makrorazrushennoe sostoyanie [On the transition of inhomogeneous elastoplastic materials with defects to the macrocrack state]. Preprint IPMekh RAN, № 1053. Moscow, 2013, 42 c.

15. Kukudzhанov K.V., Levitin A.L. Protsessy deformirovaniya uprugoplasticheskogo materiala s defektami pri elektrodinamicheskom nagruzhenii [Deformation processes of an elastoplastic material with defects under electrodynamic loading]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2015, No. 1, pp. 106-120.

16. Qin R.S., Su S.X. Thermodynamics of crack healing under electropulsing // J. Mater. Res, 2002, Vol. 17, No. 8, pp. 2048-2052.

17. Kukudzhанov K.V. Modelirovanie vozdeystviya vysokoenergeticheskogo impulsnogo elektromagnitnogo polya na mikrotreshchiny v polikristallicheskom metalle [Modeling the effect of a high-energy pulsed electromagnetic field on microcracks in a polycrystalline metal]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2015, No. 4, pp. 138-158.

18. Kukudzhанov K.V., Levitin A.L. Protsessy transformatsii i vzaimodeystviya mikrotreshchin v metalle pod vozdeystviem vysokoenergeticheskogo impulsnogo elektromagnitnogo polya [The processes of transformation and interaction of microcracks in a metal under the influence of a high-energy pulsed electromagnetic field]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2016, No. 2, pp. 89-110.

19. Kukudzhанov K.V. O zalechivanii povrezhdennosti metalla vysokoenergeticheskim impul'snym elektromagnitnym polem [On healing a metal damage with a high-energy pulsed electromagnetic field]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2017, No. 2, pp. 99-124.

20. Kukudzhанov K.V.. Modelirovanie zalechivaniya povrezhdennosti metalla vysokoenergeticheskim impul'snym elektromagnitnym polem [Modeling the healing of metal damage by high-energy pulsed electromagnetic field]. Letters on Materials, 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 27-32.

21. Song Hui, Wang Zhong-jin, Gao Tie-jun. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet // Trans. Nonferrous Soc. China, 2007, Vol. 17, pp. 87-92.

22. Song H., Wang Z.-J. Microcrack healing and local recrystallization in pre-deformed sheet by high density electropulsing // Materials Science and Engineering A, 2008, Vol. 490, No. 1-2, pp. 1-6.

23. Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Gromov V.E., Murav'ev V.V. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts // Technical Physics, 1997, Vol. 49, No. 2, pp. 1094-1096.

24. Zuev L.B., Sosnin O.V., Chirakadze D.Z., Gromov V.E., Murav'ev V.V. Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1998, Vol. 39, No. 4, pp. 639-641.

25. Zuev L.B., Sosnin O.V., Chirakadze D.Z. Akusticheskiy kontrol dolgovechnosti stalnykh obrabotok i vosstanovlenie ikh resursa [Acoustic control of the durability of steel samples and restoration of their resource]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 1997, No. 5, pp. 1019-1023.

26. Gromov V.E., Chirakadze D.Z., Semakin E.V. Elektrostimulirovannoe vosstanovlenie resursa vynoslivosti svarnykh soedineniy [Electrostimulated recovery of the endurance resource of welded joints]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 1997, No. 5, pp. 1019-1023.

27. Yizhou Z., You Z., Guanhu H., Benlian Z., The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing // Journal of Materials Research, 2001, Vol. 16, pp. 17-19.

28. Yu J., Zhang H., Deng D., Hao S., Iqbal A. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing // Chinese journal of mechanical engineering, 2014, Vol. 27, No. 4, pp. 745-753.

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, pp. 38-42.

30. Hosoi A., Kishi T., Ju Y. Healing of fatigue crack treated with surface-activated pre-coating method by controlling high-density electric current // 13th International Conference on Fracture June 16–21, 2013, Beijing, China, pp. 233-245.

31. Song H., Wang Z.-J., He X.-D., Duan J. Self-healing of damage inside metals triggered by electro-pulsing stimuli // Scientific Reports, 2017, Vol. 7, P. 7079.

Об авторах

Кукуджанов Константин Владимирович (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории механики и оптимизации конструкций ИПМех РАН (119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101-1, e-mail: kconstantin@mail.ru).

Ченцов Александр Викторович (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики технологических процессов ИПМех РАН (119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101-1, e-mail: chentsov@ipmnet.ru), ORCID: 0000-0003-4760-1738.

About the authors

Konstantin V. Kukudzhanov (Moscow, Russian Federation) – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Laboratory of Mechanics and Optimization of Structures, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (101-1, Vernadskogo av., Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: kconstantin@mail.ru).

Alexander V. Chentsov (Moscow, Russian Federation) – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Mechanics of Technological Processes, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (101-1, Vernadskogo av., Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: chentsov@ipmnet.ru). ORCID: 0000-0003-4760-1738.

Получено 19.06.2020