Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева
Серия: Механика предельного состояния. 2020. № 2 (44). С. 116–131

К. В. Кукуджанов, А. В. Ченцов

О ЗАЛЕЧИВАНИИ ПОРИСТОСТИ В МЕТАЛЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

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

Аннотация. В статье приведены результаты исследования по обработке образцов из цинка короткими импульсами высокоэнергетического электромагнитного поля. Целью работы являлась исследование возможности залечивания микропор и микротрещин внутри материала. Приводится описание используемого оборудования и методики экспериментов. Проведен анализ полученных экспериментальных данных. На основе исследования микроструктуры металла до и после воздействия полем подтверждается предположение о том, что в процессе воздействия высокоэнергетическим полем в металле может происходить уменьшение его пористости и как следствие значительное увеличение предельной пластической деформации до разрушения. Показано, что уменьшение пористости не является результатом рекристаллизации, которая при исследуемом воздействии практически не происходит.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное воздействие, залечивание микродефектов, высокоэнергетическое поле.

DOI: 10.37972/chgpu.2020.44.2.012

УДК: 539.374

1. Введение

Цинк и его сплавы является биосовместимыми и биоразлагаемыми материалами, имеющими большие перспективы для использования в медицине. Возможность улучшения механических свойств цинка с использованием высокотехнологичных методов его обработки позволило бы существенно расширить эти перспективы.

О влиянии электрического тока в металлах на их на механические свойства известно достаточно давно. Так, авторами работы [1] было показано, что усталостную долговечность стали можно увеличить, если приложить электрический ток во время

© Кукуджанов К. В., Ченцов А. В., 2020
Кукуджанов Константин Владимирович
e-mail: kconstantin@mail.ru, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.
Ченцов Александр Викторович
e-mail: chentsov@ipmnet.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия.

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

Поступила 05.04.2020

нагружения. Исследования влияния импульсного тока высокой плотности на монокристаллические металлы показали, что подвижность дислокаций может увеличиваться за счет их взаимодействия со свободными электронами, движимыми электромагнитным полем [2,3]. Что, по мнению авторов, приводило к скачкообразному уменьшению предела текучести металлов при одновременном нагружении и воздействии полем.

Гипотеза о том, что в металлах под действием кратковременных импульсов высокоэнергетического электромагнитного поля (ВЭМП) может происходить залечивание объемных несплошностей типа микопор и микротрещин высказывалась рядом исследователей [4–7]. Авторы исходили из того что в окрестности таких дефектов в частности в их острых кончиках происходит концентрация напряженности электромагнитного поля и, как следствие, интенсивное тепловыделение. Из решения модельных задач получалось, что при этом в вершинах макротрещин могут возникать сжимающие напряжения, а их берега могут сближаться [6, 7].

Интересные результаты были получены в работе [8], в которой исходя из термодинамических соображений, было показано, что в проводящем материале может происходить уменьшение большой оси эллиптической трещины, если приложенный ток превышает некоторую пороговую величину.

На основе связанной модели воздействия импульсным ВЭМП на материал с микродефектами в работах [9–11] было показано, что в металле может происходить уменьшение объема микродефектов и, как следствие, пористости материала, вплоть до полного залечивания некоторых микропор и микротрещин посредством сварки их берегов расплавленным металлом.

Имеющиеся эксперименты [2, 3, 12–16] подтверждали предположение, что внутри материала происходит восстановление сплошности структуры, сопровождаемое изменением объемного содержания микродефектов, в частности увеличением плотности материала до и после воздействия полем. Кроме того это выражалось для исследуемых материалов в улучшении их макроскопических механических характеристик: увеличении предельной пластической деформации до разрушения или увеличении количества циклов до разрушения при циклическом нагружении. Необходимо отметить интересные результаты, полученные в работе [16], в которой были залечены поверхностные микротрещины, образовавшиеся при прокатке в листе из титанового сплава.

Однако гипотеза о залечивании микропор и микротрещин внутри материала получила в вышеперечисленных работах лишь косвенное экспериментальное подтверждение. Между тем представляется, что данную гипотезу следует подтвердить непосредственным исследованием микроструктуры металла до и после воздействия ВЭМП.

Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение возможности залечивания микропор и микротрещин размерами до 1,0 мкм, образовавшихся в поликристаллическом цинке в результате интенсивного пластического деформирования, при воздействии на него ВЭМП с заданными параметрами. При этом объектом исследования является непосредственно изменения микроструктуры внутри металла, а не изменения его макроскопических характеристик, произошедшие в результате рассматриваемого воздействия.

2. Эксперименты

Объектом исследования был цинк марки Ц0 (Zn 99,975%), химический состав которого приведен в таблице 1. Материал имел поликристаллическую структуру. Образцы вырезались механическим способом из листа металла вдоль направления прокатки, после чего им придавалась соответствующая форма путем холодного фрезерования (рис. 1). Сам цинковый лист имел размеры 500x1000x10 мм и был изготовлен путем горячей прокатки.

Таблица 1. Химический состав Ц0 (Zn 99,975% масс.)

Zn, не менее %	Массовая доля примесей, не более %							
	Fe	Al	Cu	As	Pb	Sn	Cd	Всего примесей
99.975	0.005	0.005	0.001	0.0005	0.013	0.001	0.004	0.025

Размеры образца указаны на рис. 1. На рис. 2 показан образец, установленный в зажимы машины MTS Synergy 400, на котором также виден внешний экстензометр, закрепленный на образце. Начальная базовая длина (расстояние между контактами экстензометра в момент времени $t = 0$) принималась равной $l_0 = 40$ мм.

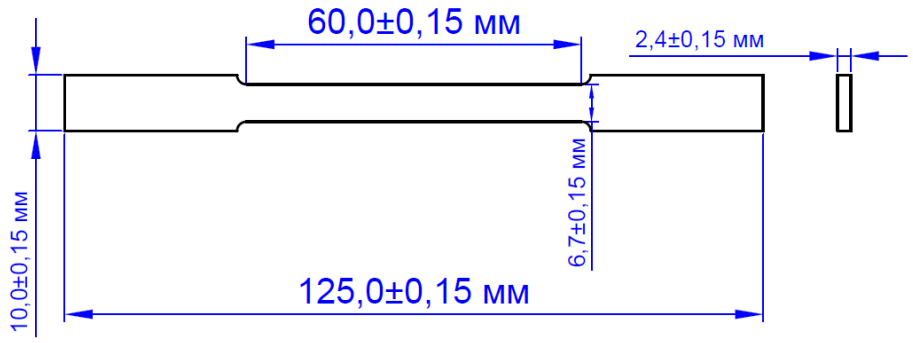


Рис. 1. Форма и размеры образцов

Собирательная рекристаллизация в чистом цинке начинается уже при комнатной температуре. Однако температура рекристаллизации цинка увеличивается с увеличением содержания примесей. Сильное влияние на нее оказывает их химический состав. Температура рекристаллизации может достигать нескольких сотен градусов Цельсия в разбавленных сплавах цинка с магнием или алюминием, когда содержание этих металлов в цинке составляет всего лишь 0,1%). Систематические данные об изменении температуры собирательной рекристаллизации от химического состава примесей цинка в литературе отсутствуют.

Цинк марки Ц0 начинает изменять поликристаллическую структуру при температуре 50°C.

Однако проводимая в настоящей работе температурная обработка не имела цель провести собирательную рекристаллизацию в цинке и получить однородную и равноосную поликристаллическую структуру металла. Как будет показано ниже, исследуемый горячекатаный цинк марки Ц0 имеет сравнительно однородную поликристаллическую структуру со средним размером зерна порядка нескольких 100 мкм правильной формы. Ее целью было произвести в цинке релаксацию внутренних остаточных напряжений, возникших в результате прокатки и последующей холодной механической обработки.

Поэтому до испытаний образцы подвергались температурной обработке по следующей программе: образцы в течение 15 мин нагревались в печи от комнатной температуры до температуры 50°C и выдерживались при ней еще в течение 3,5 мин. После этого вынимались из печи и помещались в достаточный объем воды с температурой 3°C на 10 мин.

При проведении экспериментов применялось следующее основное оборудование: - универсальная разрывная машина «MTS Synergy 400»; - оптческий микроскоп «Zeiss Axio Imager.D1m»; - генератор импульсного ВЭМП «ГОРН»; - сканирующий электронный микроскоп «Quanta 650».

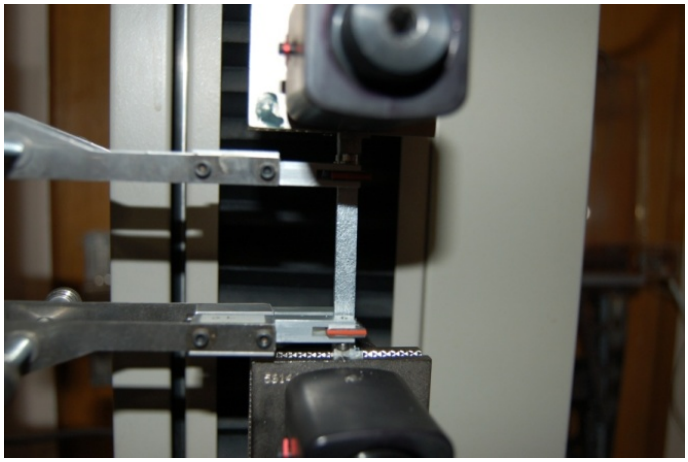


Рис. 2. Растягиваемый образец в захватах разрывной машины

Исследуемые образцы подвергались одноосному растяжению за пределом текучести вплоть до полного разрушения. При этом в цинке имело место развитое пластическое течение. Скорость движения верхнего зажима разрывной машины (нижний зажим был неподвижным) во всех экспериментах задавалась равной 1,0 мм/мин.

В экспериментах сравнивались микроструктуры образцов нижеприведенных серий. Серия состояла из 5 образцов каждого из номеров:

1) нерастянутых;

2) растянутых до разрыва;

3) растянутых до предразрушения;

4) растянутых до предразрушения, а затем подвергнутых воздействию импульсного ВЭМП.

Образцы №2 растягивались до разрыва (макроразрушения) образца. Эксперименты показывали, что разрыву образца предшествовало интенсивное пластическое течение материала с образованием шейки в месте разрыва.

Образцы №3 растягивались до состояния, предшествующего разрыву образца (рис. 3, кривая 1), после чего разгружались.

На рис. 3 по оси абцисс отложено относительное удлинение базовой длины (инженерная деформация) $\epsilon = l/l_0 - 1$, где l_0 – начальная базовая длина в момент времени t_0, l – текущая базовая длина в момент времени t. По оси ординат на рис. 3 отложено инженерное напряжение $\sigma = F/S_0$, где F - приложенная нагрузка (Н), S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

Данное близкое к макроразрушению состояние определялось как такое НДС, при котором напряжение достигало величины $\sigma^* = 0,97\sigma_{\max}$, где $\sigma_{\max}$ – предел прочности при растяжении (определяемый как максимальное напряжение в экспериментах с образцами серии №2, доведенных до макроразрушения). После чего образец №3 разгружался.

Эксперименты показали, что при этом значении напряжения в образцах отчетливо просматривалось образование шейки. При дальнейшем нагружении происходил разрыв образца. А именно, если образцы №3 повторно растягивались, вплоть до разрушения, то величина деформации до макроразрушения не превышала 2% (рис. 3., кривая 2). При этом достигаемые напряжения не превышали 90% $\sigma_{\max}$. Поэтому для удобства принималось, что вышеуказанное НДС, до которого растягивались образцы №3, непосредственно предшествует разрыву образца.

Данное напряженно-деформированное состояние образца будем далее называть предразрушенным состоянием.

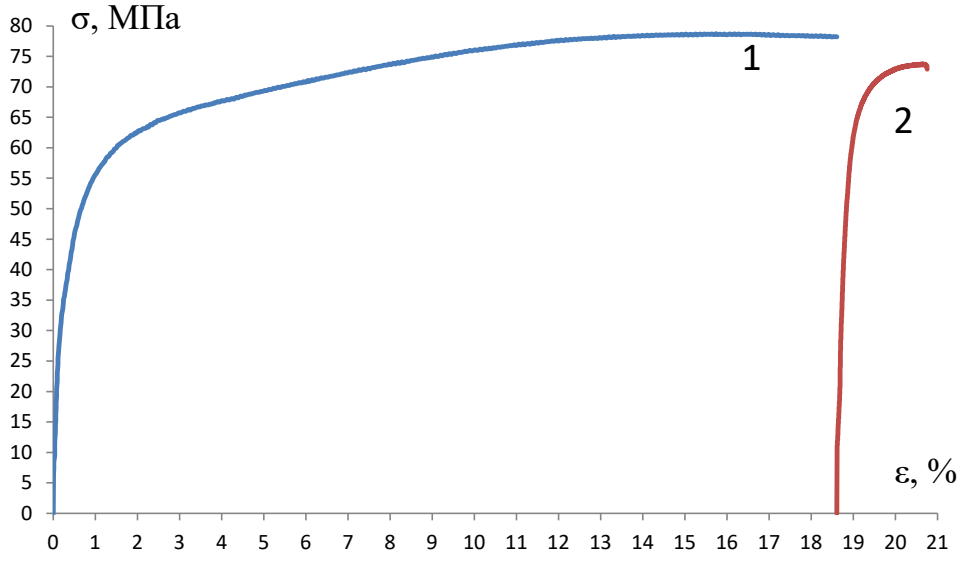


Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов серии №3

Образцы №4 растягивались до напряжения $\sigma^* = 0,97\sigma_{\max}$, разгружались, а затем подвергались воздействию исследуемого ВЭМП. Как будет показано ниже, цинк марки Ц0 при разрушении в тестах на растяжение ведет себя квази-вязко, в нем при развитой пластичности происходил рост существующих микропор и микротрещин, а также зарождение новых подобных дефектов и их последующий рост. Это сопровождается образованием шейки в месте последующего разрыва (макроразрушения) образца (рис. 2).

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. Поэтому основной интерес для исследования представляли микродефекты и поврежденность(пористость) внутри материала, которые наблюдались вблизи шейки в образцах №3 и №4 и вблизи поверхности разрушения в образцах №2.

Шлифы изготавливались в плоскости, показанной на рис. 4 образца вдоль продольной оси симметрии образца в области шейки). По этим шлифам исследовалась микроструктура металла.

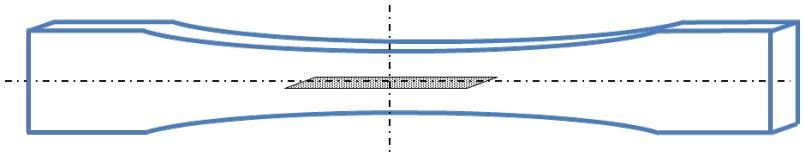


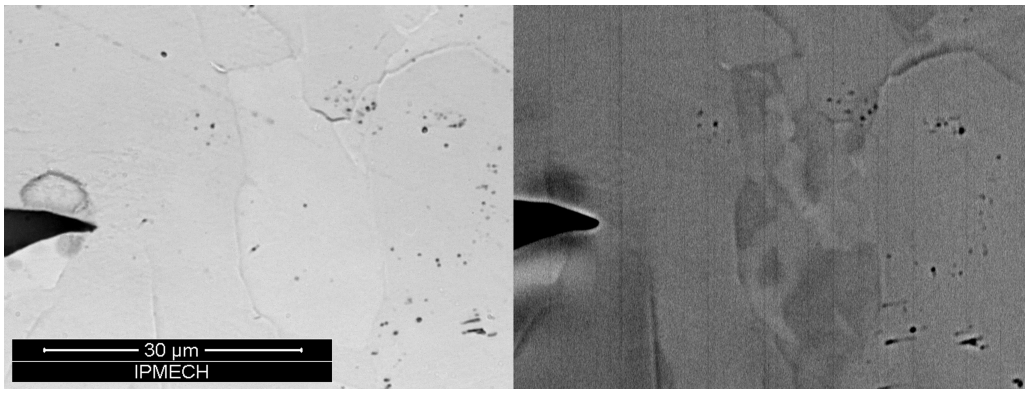
Рис. 4. Образец и плоскость шлифов (серым цветом показаны место и плоскость, в которой изготавливались шлифы)

Изготовленные шлифы изучались с помощью сканирующего электронного и оптического микроскопов в области шейки при различных увеличениях. Исследование шлифов с помощью двух разных микроскопов (рис. 5) показало, что для исследования микродефектов размерами до 0,2 мкм в цинке достаточно использовать оптический микроскопом с увеличением x2000. Дефекты на соответствующих микрофотографиях отображаются черным цветом. Линейные размеры микропор и микротрещин, наблюдаемых на этих фотографиях, находятся в диапазоне 0,2-2 мкм (за исключением макродефекта с размером несколько 100 мкм слева на рис. 5).

В работе изучалось влияние ВЭМП на изменение микроструктуры материала образцов.

Исследуемое ВЭМП представляло собой серию периодически приложенных к образцу близких к прямоугольным импульсов электрического тока. Генератор импульсного ВЭМП «ГОРН» позволял генерировать поле следующего вида: напряженность исследуемого ВЭМП подбиралась такой, чтобы оно индуцировало в металле ток с максимальной плотностью $j \approx 4,0 \cdot 10^8$ А/м^2 с формой единичного импульса, приведенной на рис. 6, и продолжительностью единичного импульса примерно 20 мкс. Период составлял 1000 мкс. Продолжительность приложенной серии импульсов - 3,0 с.

3. Результаты экспериментов



а) б)

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

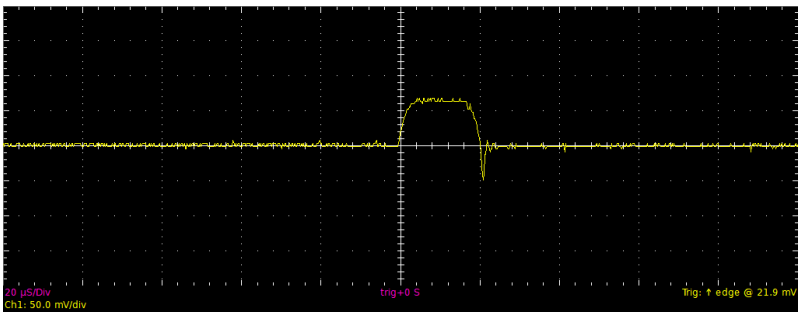


Рис. 6. Форма, величина и продолжительность единичного импульса ВЭМП

В результате исследования шлифов установлено, что в нерастянутом образце №1 наблюдается небольшое количество микропор и микротрещин с размерами в пределах от 0,2 мкм до 100 мкм. Типичная микроструктура недеформированного образца №1 приведена на рис. 7. Фотография выполнена с помощью оптического микроскопа при увеличении x400. Микродефекты отображаются темным цветом (наблюдаются на рис. 7 в виде темных областей или пятнышек на светлом фоне).

Исследование поверхностей разрушения образцов №2 показало, что цинк данной марки при растяжении разрушается по смешанному или квазивязкому типу разрушения. Поверхность разрушения металла показывает черты, характерные для вязкого разрушения, включая в себя чешуйчатые поверхности раздела с множественными кавернами (ямками) размерами от 0,2 до 1,0 мкм (рис. 8). В тоже время на поверхности разрушения наблюдается некоторое количество гладких поверхностей раздела расщепленных зерен, что характерно для хрупко-разрушающихся материалов. Данный механизм соответствует достаточно большой наблюдаемой величине суммарной предельной пластической деформации до разрушения равной 19,56% (рис. 3).

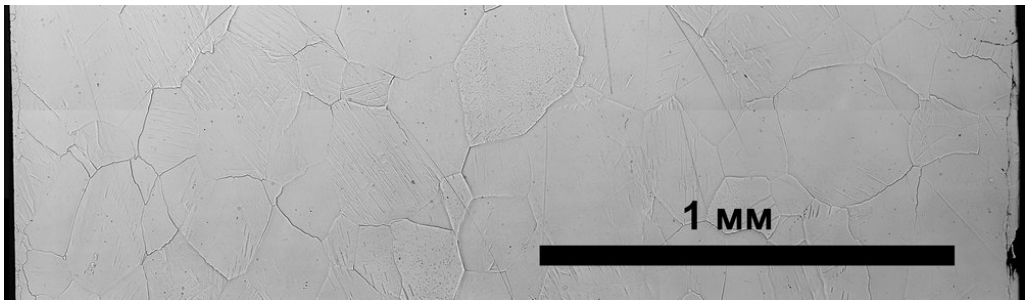


Рис. 7. Микроструктура образца №1. По горизонтали толщина образца составляет 2.4 мм, справа и слева видны вертикальные поверхности образца

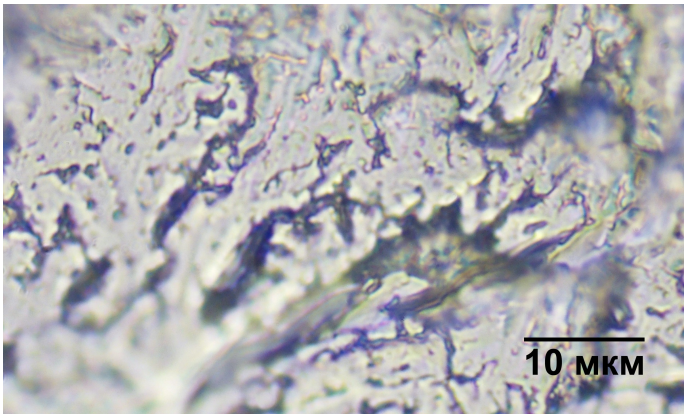


Рис. 8. Микроструктура поверхности разрыва (макроразрушения) образца №2. При увеличении x2000

Помимо поверхности разрыва (рис. 7) микродефекты наблюдаются также и на шлифах. Например, в состоянии предшествующем разрыву в области шейки образца №3 наблюдались дефекты различных размеров от 0,2 мкм до нескольких 100 мкм (рис. 5).

Пористость цинка рассчитывалась по суммарной площади микродефектов с определенными размерами, видимой на шлифах.

Фотография микроструктуры образца №2 в области образования шейки, аналогичная фотографии на рис. 7, представлена на рис. 9. На ней хорошо просматривается сечение поверхности макроразрушения плоскостью шлифа, имеющее сильно изломанный характер.

Вязкое макроразрушение происходит при достижении пористостью в точках образца определенного критического значения (ориентировочно для цинка, как показывают проведенные эксперименты, это значение пористости не превышает 20%).

На рис. 10 представлены диаграммы растяжения образца №4 до и после воздействия исследуемым ВЭМП. Обозначения те же, что и на рис. 3. Образцы №4 сначала растягивались до предразрушенного состояния, когда напряжения $\sigma^* = 0,97\sigma_{\max}$. При этом

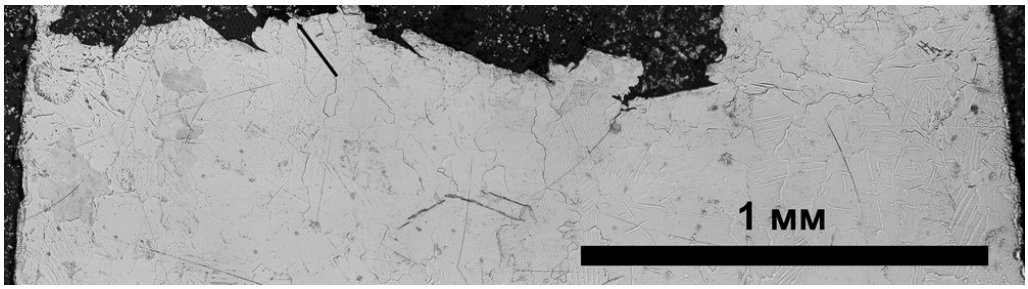


Рис. 9. Микроструктура образца №2 в области поверхности макроразрушения и образования шейки. По горизонтали толщина образца составляет 2.4мм, справа и слева видны вертикальные поверхности образца

средняя деформация достигала значения 17,1% (рис. 10, кривая 1). Затем подвергались воздействию исследуемого ВЭМП. После обработки полем образцы приобретали способность дополнительно деформироваться еще на 11,6% (рис. 10, кривая 2). В результате величина суммарной предельной пластической деформации до разрушения увеличивалась до 27,7%.

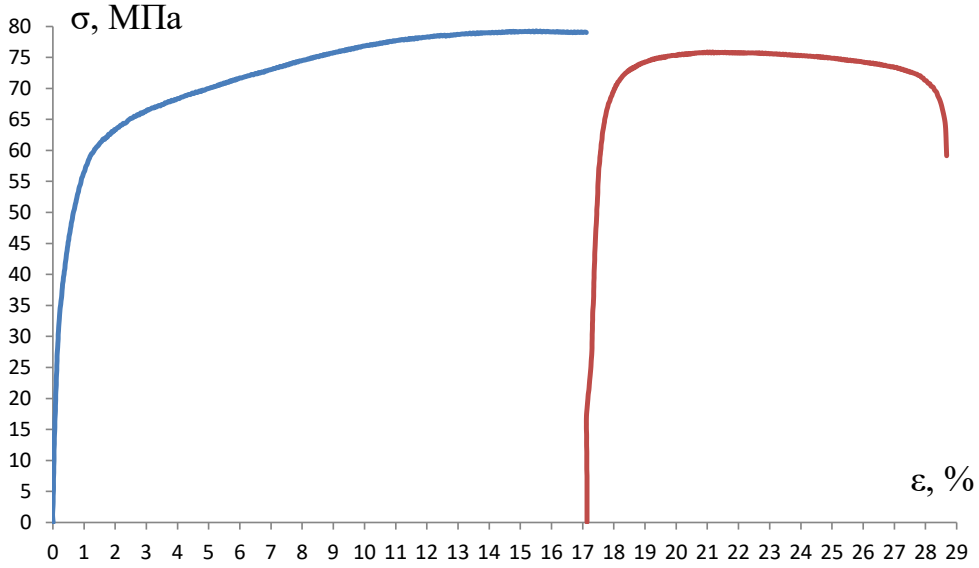


Рис. 10. Диаграммы растяжения образцов серии №4 (кривая 1 - до воздействия ВЭМП, кривая 2 - после воздействия ВЭМП)

Таким образом, в результате воздействия исследуемым ВЭМП суммарная предельная пластическая деформация до разрушения цинка марки Ц0 увеличивалась на 41,62% (по сравнению с образцами №2). Это свидетельствует о том, что количество микропор и микротрещин в образцах №4 значительно уменьшается после воздействия

импульсным ВЭМП вследствие чего материал может дальше растягиваться не разрушаясь. Такого увеличения суммарной предельной пластической деформации невозможно достичь при отжиге.

Фотография микроструктуры образца №4 в области образования шейки после воздействия исследуемым ВЭМП, аналогичная фотографиям на рис. 7 и рис. 9, представлена на рис. 11.

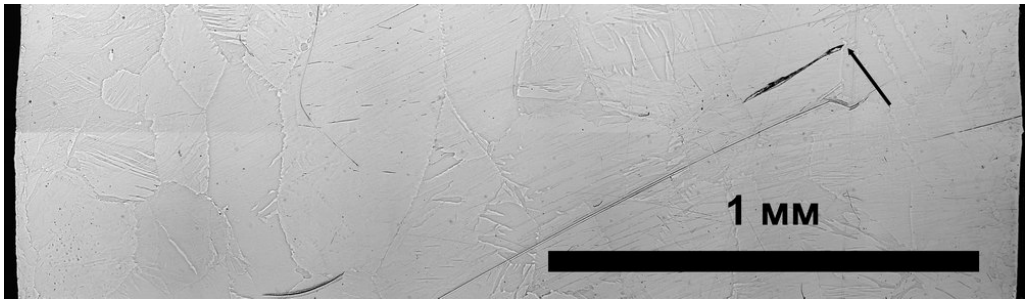


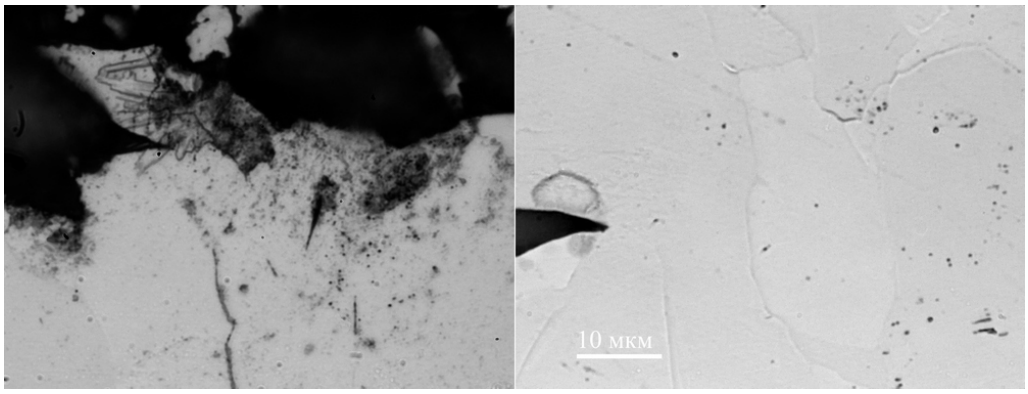
Рис. 11. Микроструктура образца №4 в области образования шейки. По горизонтали толщина образца составляет 2.4мм, справа и слева видны вертикальные поверхности образца

Сопоставление рис. 7, рис. 9 и рис. 11 показывает, что количества микродефектов в образцах №1, №2 и №4 существенно отличаются друг от друга. Максимальное количество микродефектов и соответственно пористость (количество темного цвета) наблюдается в образце №2 (рис. 9). Напротив, в недеформированном образце №1 микродефектов очень мало (рис. 7). После воздействия импульсным ВЭМП пористость в значительной степени залечивается. А именно, количество и суммарная площадь микродефектов на шлифах в образце №4 (рис. 11) сильно уменьшается по сравнению с их количеством и площадью на шлифах в образце №2 на рис. 9.

На рис. 12,а представлена микрофотография области в образце №2, указанной стрелкой на рис. 9 при увеличении x2000. А на рис. 12,б представлена микрофотография области в образца №4, указанной стрелкой на рис. 11. Количество дефектов и соответственно локальная пористость в образце на рис. 12,а более чем на порядок превосходит их количество и локальную пористость на рис. 12,б. Пористость рассчитывалась для микродефектов размерами 0,2-1,0 мкм. Пористость в области формирующейся поверхности разрушения локально достигает значений 0,20 (рис. 12,а).

Сопоставление микроструктуры шлифов исследуемых образцов при различных увеличениях (рис. 7-12) доказывает, что при приложении исследуемого ВЭМП к пластически деформированным образцам №4 в области образования в них шейки наблюдается значительное уменьшения пористости.

Во введении были упомянуты результаты проведенного численного моделирования [9–11], в соответствии с которыми в цинке при воздействии исследуемым импульсным ВЭМП может иметь место уменьшение пористости материала. Это уменьшение пористости обусловлено изменением формы и объема микропор и микротрещин в материале вплоть до полного исчезновения некоторых дефектов. Процесс уменьшения



а) б)

Рис. 12. Поры в шейке: (а) без ВЭМП в образце №2; (б) после воздействия ВЭМП в образце №4

пористости цинка происходит за счет концентрации ВЭМП на дефектах, интенсивного выделения джоулева тепла, сопровождаемых фазовыми превращениями (плавлением, испарением) и возникновением высоких сжимающих напряжений в окрестности микродефектов. Полное исчезновение может протекать путем сварки берегов микротрещин расплавленным металлом. Полученные экспериментальные данные подтверждают реальность такого механизма.

Отметим также некоторые важные в контексте настоящего исследования аспекты изменения поликристаллической структуры цинка марки Ц0 в процессе пластического деформирования и воздействия исследуемым ВЭМП.

Типичная поликристаллическая структура недеформированного образца №1 приведена на рис. 13. В образцах №1 зерна имеют размеры от 50-500 мкм. Внутри зерен хорошо просматриваются двойники.

Типичная поликристаллическая структура сильно деформированного образца №2 в области шейки приведена на рис. 14. В образцах №2 количество двойников в зернах значительно увеличивается, при этом размер зерен незначительно уменьшается.

Поликристаллическая структура образца №4 в области шейки после воздействия исследуемым ВЭМП приведена на рис. 15. После приложения ВЭМП размер зерен практически в металле практически не изменяется по сравнению с образцами №2, однако наблюдается незначительное изменение количества двойников в зернах по сравнению с образцами №2.

Аналогичные изменения поликристаллической структуры наблюдаются также на рис. 7, рис. 9 и рис. 11.

Исследования изменений поликристаллических структур образцов позволяет заключить, что при пластическом деформировании цинка этой марки вплоть до разрыва динамическая рекристаллизация проходит медленно. Однако при этом значительно увеличивается количество двойников в зернах. После воздействия ВЭМП в цинке происходит незначительное изменение количества двойников в зернах, в то время как размер зерен практически не изменяется.

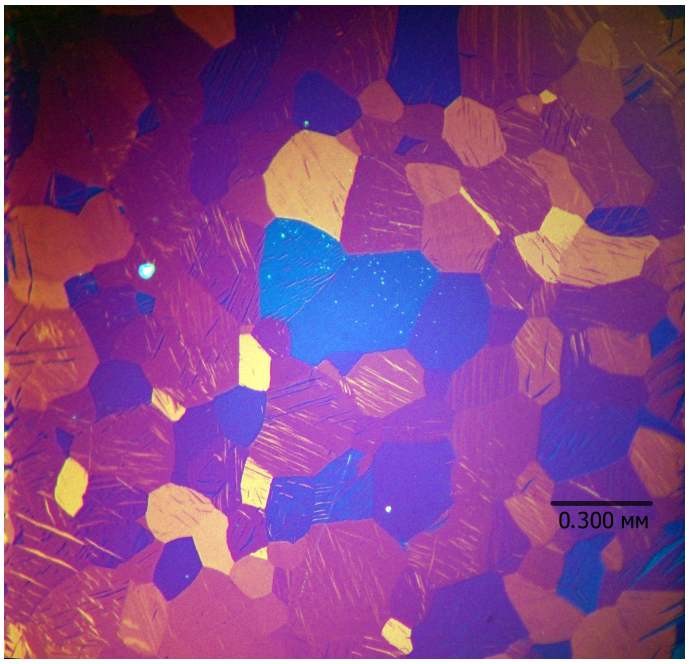


Рис. 13. Зерна и двойники в образце №1

Рис. 14. Зерна и двойники в образце №1

Из сравнения рис. 7, рис. 9 и рис. 11 также видно, что исследуемое воздействие ВЭМП практически не изменяет средний размер зерна в цинке, но несколько изменяет количество двойников в зернах.

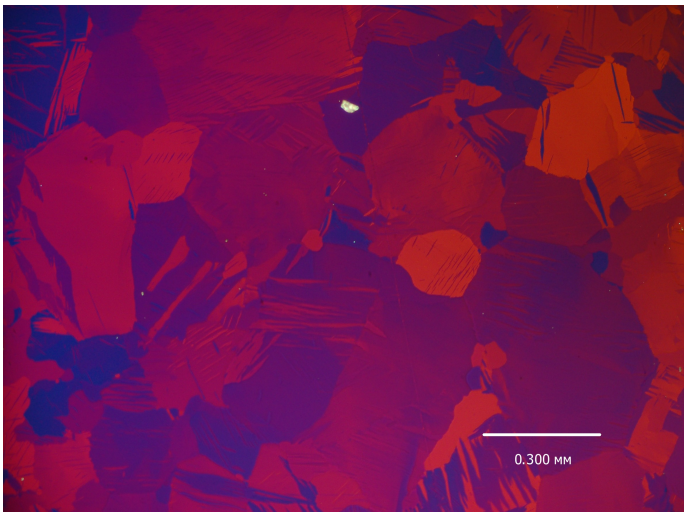


Рис. 15. Зерна и двойники в образе №4 в области шейки после воздействия ВЭМП

Таким образом, наблюдаемое залечивание пористости в цинке при воздействии ВЭМП происходит по механизму, описанному в работах [9–11], а не за счет рекристаллизации при исследуемом воздействии.

4. Вывод

В результате приложения исследуемого короткоимпульсного ВЭМП к образцам из поликристаллического цинка внутри них наблюдалось уменьшение пористости вследствие залечивания микропор и микротрещин размерами 0,2-1,0 мкм, которые возникли в процессе пластической деформации при растяжении до предразрушенного состояния.

В результате воздействия исследуемым ВЭМП суммарная предельная пластическая деформация до разрушения цинка марки Ц0 увеличивалась на 41,62%. Такого увеличения предельной пластической деформации невозможно достичь при отжиге.

При пластическом деформировании цинка этой марки вплоть до разрыва динамическая рекристаллизация проходит медленно. Однако значительно увеличивается количество двойников в зернах.

В результате воздействия ВЭМП в цинке происходит незначительное уменьшение количества двойников в зернах, в то время как размер зерен практически не изменяется. Это исключает возможность залечивания микродефектов за счет рекристаллизации при исследуемом воздействии ВЭМП.

Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами численного моделирования, проведенного авторами.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Влияние электрического тока на малоцикловую усталость стали / Г. В. Карпенко, О. А. Кузин, В. И. Ткачев [и др.] // 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 [и др.]. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. Т. 1. 590 с.

[3] Effect of electric current pulses on fatigue characteristics of polycrystalline copper / H. Conrad, J. White, W. D. Cao et al. 1991. Vol. 145. P. 1–12.

[4] 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.

[5] Беклемишев Н. Н., Корягин Н. И., Шапиро Г. С. Влияние локально-неоднородного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Известия АН СССР. Металлы. 1984. № 4. С. 184–187.

[6] Клюшников В. Д., Овчинников И. В. Плоская задача о воздействии мгновенного точечного источника тепла // Изв. АН СССР. МТТ. 1988. Т. 250, № 4. С. 118–122.

[7] 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.

[8] Qin R. S., Su S. X. Thermodynamics of crack healing under electropulsing // J. Mater. Res. 2002. Vol. 17, no. 8. P. 2048–2052.

[9] Кукуджанов К. В. Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 4. С. 138–158.

[10] Кукуджанов К. В., Левитин А. Л. Процессы трансформации и взаимодействия микротрещин в металле под воздействием высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля // Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 2. С. 89–110.

[11] Кукуджанов К. В. Моделирование залечивания поврежденности металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем // Письма о материалах. 2018. Т. 8, № 1. С. 27–32.

[12] Song H., jin Wang Z., jun Gao T. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet // Trans. Nonferrous Soc. China. 2007. Vol. 17, no. 1. P. 87–92.

[13] 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. P. 1–6.

[14] Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability / L. B. Zuev, O. V. Sosnin, D. Z. Chirakadze et al. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1998. Vol. 39, no. 4. P. 639–641.

[15] The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing / Z. Yizhou, Z. You, H. Guanhu et al. // Journal of Materials Research. 2001. Vol. 16, no. 1. P. 17–19.

[16] Self-healing of damage inside metals triggered by electropulsing stimuli / H. Song, Z. jin Wang, X. dong He et al. // Scientific Reports. 2017. Vol. 7, no. 1. p. 7097.

K. V. Kukudzhanov, A. V. Chentsov

ABOUT HEALING OF POROSITY IN METAL UNDER HIGH ENERGY ELECTROMAGNETIC FIELD

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of a study of treatment short pulses of a high-energy electromagnetic field on samples from zinc. The aim of the work was to study the possibility of healing micropores and microcracks inside the material. The description of the used equipment and experimental methods is given. The obtained experimental data are analyzed. Based on the study of the microstructure of the metal before and after exposure to the field, The assumption is confirmed that under the considered treatment in zinc, there may be a decrease in the damage(porosity) of the material and, as a result, a significant increase in the limit plastic strain before fracture. It is shown that the decrease in porosity is not the result of recrystallization, which practically does not occur under the studied influence.

Keywords: pulse EM treatment, microdefects healing, high-energy electromagnetic field.

REFERENCES

[1] Influence of an electric current upon the low-cycle fatigue of steel / G. V. Karpenko, O. A. Kuzin, V. I. Tkachev et al. // Sov. Phys. Dokl. 1976. no. 21. P. 159–160.

[2] Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov (teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva) / O. A. Troitskiy, Y. V. Baranov, Y. S. Avramov et al. Moskva–Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2004. 590 p.

[3] Effect of electric current pulses on fatigue characteristics of polycrystalline copper / H. Conrad, J. White, W. D. Cao et al. // Materials Science and Engineering: A. 1991. Vol. 145, no. 1. P. 1–12.

[4] Finkel V. M., Golovin Y. I., Sletkov A. A. Razrushenie vershiny treshchiny silovym elektromagnitnym polem // Doklady AN USSR. 1977. Vol. 237, no. 2. P. 325–327.

[5] Beklemishev N. N., Koryagin N. I., Shapiro G. S. Vliyanie lokal'no-neodnorodnogo elektromagnitnogo polya na plastichnost' i prochnost' provodyashchikh materialov // Izvestiya AN USSR, Metally. 1984. no. 4. P. 184–187.

[6] Klyushnikov V. D., Ovchinnikov I. V. Plane Problem of Effect of an Instantaneous Point Heat Source // Mech. Solids. 1988. Vol. 250, no. 4. P. 118–122.

[7] Kukudzhanov V. N., Kolomiets-Romanenko A. V. A Model of Thermoelectroplasticity of Variations in the Mechanical Properties of Metals Based on Defect Structure Reorganization under the Action of Pulse Electric Current // Mechanics of Solids. 2011. no. 6. P. 6–21.

[8] Qin R. S., Su S. X. Thermodynamics of crack healing under electropulsing // J. Mater. Res. 2002. Vol. 17, no. 8. P. 2048–2052.

[9] Kukudzhanov K. V. Modelirovanie vozdeystviya vysokoenergeticheskogo impul'snogo elektromagnitnogo polya na mikrotreshchiny v polikristallicheskom metalle // Vestnik PNIPU. Mekhanika. 2015. no. 4. P. 138–158.

[10] Kukudzhanov K. V., Levitin A. L. Protsessy transformatsii i vzaimodeystviya mikrotreshchin v metalle pod vozdeystviem vysokoenergeticheskogo impul'snogo elektromagnitnogo polya // Vestnik PNIPU. Mekhanika. 2016. no. 2. P. 89–110.

Kukudzhanov Konstantin Vladimirovich, Cand. Sci. Phys. & Math., Researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia.

Chentsov Alexander Viktorovich, Cand. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia, Россия.

[11] Kukudzhanov K. V. Modelirovanie zalechivaniya povrezhdennosti metalla vysokoenergeticheskim impul'snym elektromagnitnym polem // Letters on Materials. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 27–32.
[12] Song H., jin Wang Z., jun Gao T. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet // Trans. Nonferrous Soc. China. 2007. Vol. 17, no. 1. P. 87–92.
[13] 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. P. 1–6.
[14] Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability / L. B. Zuev, O. V. Sosnin, D. Z. Chirakadze et al. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1998. Vol. 39, no. 4. P. 639–641.
[15] The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing / Z. Yizhou, Z. You, H. Guanhu et al. // Journal of Materials Research. 2001. Vol. 16, no. 1. P. 17–19.
[16] Self-healing of damage inside metals triggered by electropulsing stimuli / H. Song, Z. jin Wang, X. dong He et al. // Scientific Reports. 2017. Vol. 7, no. 1. p. 7097.