О СВЯЗИ ПЛАСТИЧНОСТИ И ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕТАЛЛЕ (ЭКСПЕРИМЕНТ)*

Кукуджанов К.В., Ченцов А.В.

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

Предположение о том, что в проводящем материале может происходить залечивание дефектов под действием кратковременных импульсов высокоэнергетического электромагнитного поля (ВЭМП) была высказана достаточно давно [1]. Однако, несмотря на ряд работ [2-6], подтверждающих данную гипотезу, репрезентативные экспериментальные исследования этого явления не проводились.

Настоящее работа является частью серии исследований, посвященных изучению процессов эволюции дефектов структуры цинка, таких как микротрещины и микропоры размерами до 1 мкм. Ее целью является экспериментальное подтверждение залечивания микродефектов в поликристаллическом цинке при воздействии на него ВЭМП определенной интенсивности и продолжительности. В ней изучаются процессы эволюции дефектов структуры (микропор, микротрещин, двойников) и зерен в стандартных образцах из поликристаллического цинка, при обработке их кратковременными импульсами высокоэнергетического электромагнитного поля (ВЭМП).

Исследовался поликристаллический цинк марки ЦО (Zn 99,975%). 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 мм^2.

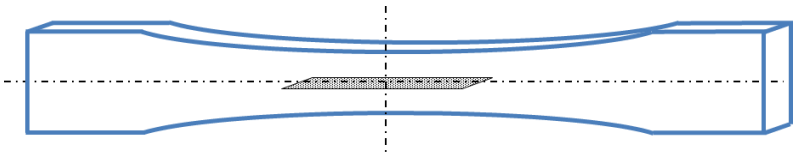


Рис.1. Схема образца. В центре обозначено сечение для изготовления шлифов.

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.

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

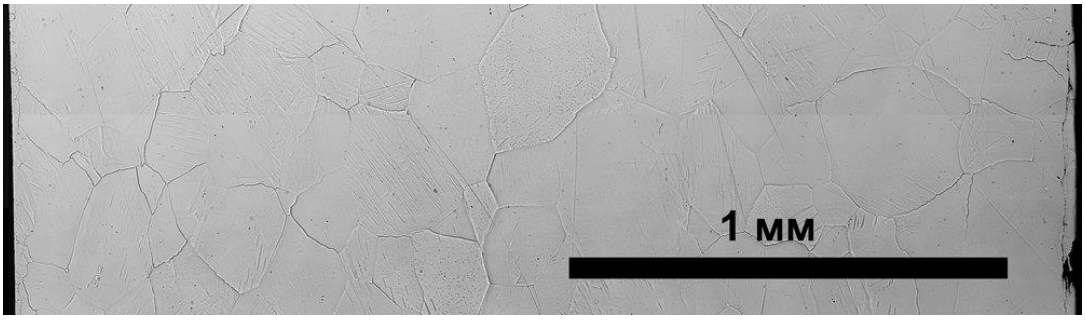
* *Работа выполнена в рамках госзадания №АААА-А17-117021310380-1 при частичной поддержке гранта РФФИ №18-08-00958.*

Продолжительности единичных импульсов была примерно 20-100 мкс, период повторения импульсов 1000 мкс. Продолжительность приложенных серий импульсов до 3,0 с. Единичный импульс имел П-образую форму по времени. Приложенное ВЭМП индуцировало в металле ток с плотностью $j \approx 4,0 \cdot 10^8\ \text{А/м}^2$.

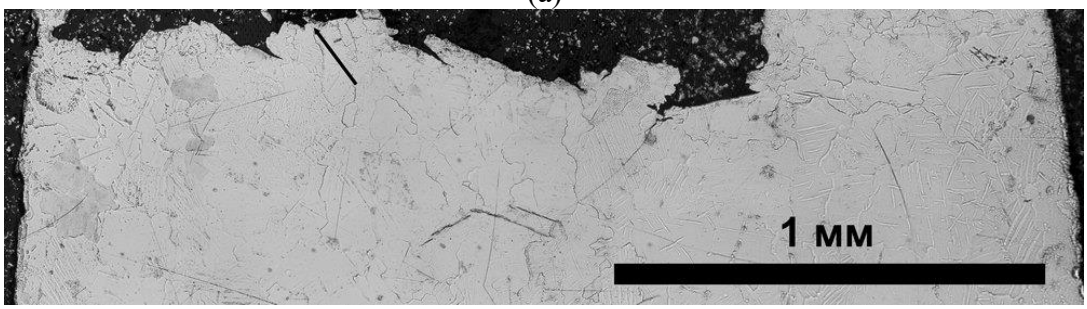
Образцы были предварительно пластически растянуты, в том числе до значений деформации близких к предельной пластической деформации до разрушения. Проводились сравнения микроструктуры следующих серий образцов:

A) недеформированных образцов;
B) деформированных до разрушения образцов;
C) деформированных до состояния, предшествующего разрушению образцов;
D) деформированных до состояния предшествующего разрушению образцов, а после этого подвергшихся воздействию вышеуказанного импульсного ВЭМП.

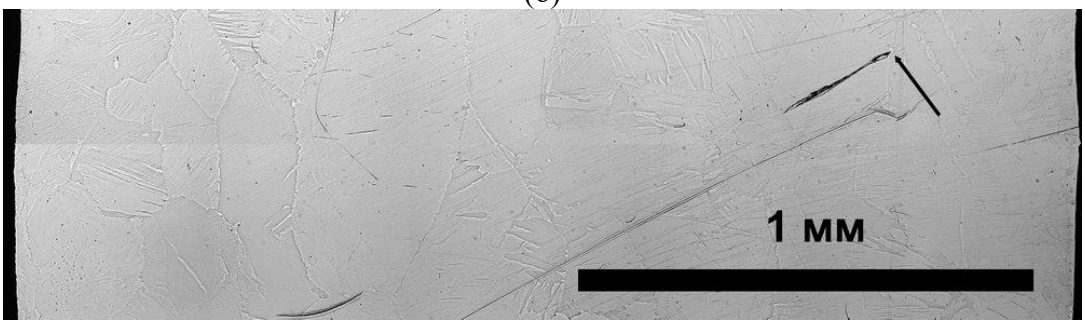
Изучалось влияние количества удельной энергии ВЭМП, рассеянной в металле, на макроскопические свойства цинка, а также на изменение его микроструктуры.



(а)



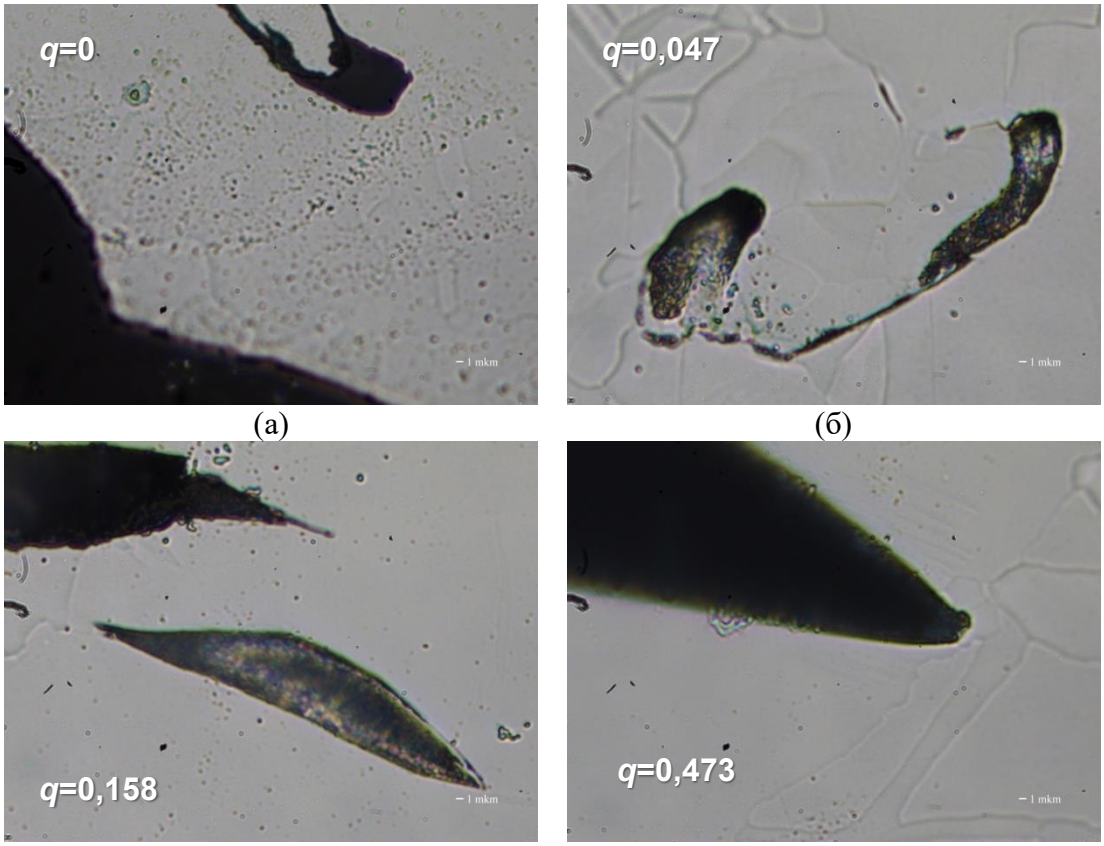
(б)



(в)

Рис.2. Панорамные фотографии микроструктуры. Размер по горизонтали – толщина образца (2.4 мм).

На рис.2 представлены панорамные (обзорные) фотографии микроструктуры недеформированного образца A (рис.2а), образца B в области поверхности макроразрушения (рис.2б) и образца D в области образования шейки, там где образовалось бы поверхность макроразрушения, если бы мы продолжили растяжение образца (рис.2в). На всех трех снимках справа и слева на рис.2 видны вертикальные внешние границы образца, а на для образца B (рис.2б) также видна изломанная поверхность макроразрушения. Микродефекты на данных фотографиях отображаются темным цветом. Из сравнения рис.2а-в видно, что количества микродефектов и соответственно поврежденность в этих образцах сильно различаются. Максимальная поврежденность наблюдается в образце B вблизи поверхности разрушения. После воздействия импульсным ВЭМП поврежденность в значительной степени залечивается: количество и суммарная площадь микродефектов (которые наблюдаются на рис.2в в виде темных областей (пятен) на светлом фоне) очень сильно уменьшается по сравнению с их количеством и площадью на рис.2б.



(а) (б) (в) (г)

Рис.3. Микродефекты в области шейки образцов: (а) без ВЭМП $(q=0)$ образец B; (б-г) после воздействия ВЭМП при увеличении q в образцах серии D.

Исследование микроструктуры образцов при большом увеличении (свыше x2000) показали, что количество микродефектов и локальная поврежденность образцов значительно уменьшаются после воздействия ВЭМП (рис.3а-д). Подтверждение, что количество микродефектов и локальная поврежденность образцов в области образования шейки уменьшаются при увеличении удельной рассеянной энергии ВЭМП q, рассеянной в материале, приведено на рис.3а-д. Если

воздействие ВЭМП не производилось, то в этом случае рассеянная удельная энергия ВЭМП $q = 0$ (рис.3а).

Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты проведенного численного моделирования, которое показало, 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, а также что при увеличении удельной рассеянной энергии ВЭМП q уменьшается поврежденность металла.

В результате исследования установлено:

1. Под воздействием ВЭМП в предварительно деформированных образцах цинка происходит залечивание микродефектов (уменьшение поврежденности).
2. При увеличении удельной рассеянной энергии ВЭМП уменьшается повреждённость (пористость) цинка в области образования шейки.
3. Исследование диаграмм растяжения образцов после воздействия ВЭМП показало, что увеличении удельной рассеянной энергии ВЭЭМП приводит к увеличению предельной пластической деформации до разрушения и соответственно улучшению пластических и прочностных свойств металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. *Влияние локально-неоднородного импульсного электрического поля на пластичность и прочность проводящих материалов* // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – №4. – С.184-187.
2. 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.
3. Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Gromov V.E. and Murav'ev V.V. *Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts* // Tech. Phys. – 1997. – Vol.49. – No.2. – Pp.1094-1096. DOI: 10.1134/1.1258774.
4. Громов В.Е., Чиракадзе Д.З., Семакин Е.В. и др. *Электростимулированное восстановление ресурса выносливости сварных соединений* // Известия РАН. Серия физическая. – 1997. – №5. – С.1019-1023.
5. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. *Физические основы и технологии обработки современных материалов: (теория, технология, структура и свойства).* – М.-Ижевск: Ин-т Компьютерных Исследований, 2004. – 590 с.
6. 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, ARO Funding Document DAAL03-86-K-0015, U.S. Army Research Office, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695. March 10, 1989, 52 p.

9-Я ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ и КОНСТРУКЦИЙ, СЛОЖНЫХ и ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского,

посвященная 30-летию ИПРИМ РАН

19 ноября – 21 ноября 2019 года

Москва, Ленинградский проспект, 7

СБОРНИК ТРУДОВ

МОСКВА
2019

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт прикладной механики Российской академии наук

Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академии наук

Министерство науки и высшего образования Российской федерации

МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ, СЛОЖНЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

СБОРНИК ТРУДОВ
9-Й ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященной 30-летию ИПРИМ РАН

(19 – 21 ноября 2019 года, г. Москва)

МОСКВА
2019

«Механика композиционных материалов и конструкций,
сложных и гетерогенных сред».
Сборник трудов 9-й Всероссийской научной конференции с международным участием.
Москва, 19 – 21 ноября 2019 г. – М.: ИПРИМ РАН, 2019. – 268 с.

ISBN 978-5-00166-027-9

В Сборник трудов включены работы участников конференции, доложенные по направлениям: «Механика гетерогенных сред, адаптивных материалов, композитов и конструкций», «Аэро-, гидромеханика, реология структурно-сложных сред», «Проблемы горения и детонации сложных сред», «Вычислительные методы механики гетерогенных сред», «Высокоскоростной удар, распространение и взаимодействие волн в неоднородных средах и конструкциях» и «Геомеханика. Современные методы исследований».

Составители сборника:

Власов А.Н., Карнет Ю.Н., Муковникова И.И.

© ФГБУН Институт прикладной механики РАН, 2019