

УДК 669.2/8:620

## МИКРОСТРУКТУРА ДЕФОРМАЦИОННОГО АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧНОСТИ

**В. С. Савенко**

*Мозырский государственный педагогический университет  
имени И. П. Шамякина, Республика Беларусь*

**О. Б. Скворцов, В. И. Сташенко**

*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН,  
г. Москва, Российская Федерация*

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований электропластической деформации металлов с учетом пондеромоторных факторов. Рассмотрено влияние импульсного тока плотностью  $10^3$  А/мм<sup>2</sup> и длительностью  $10^{-4}$  с на реализацию электропластического волочения в деформационном узле, нагруженном выше предела текучести, в условиях возбуждения электронной подсистемы металла. Показана принципиальная возможность управления деформационными процессами для модификации физико-механических свойств технически важных материалов.*

**Ключевые слова:** электропластическая деформация, виброакустические колебания, пондеромоторные эффекты, импульсный ток, микроструктура.

## MICROSTRUCTURE OF DEFORMABLE ALUMINUM UNDER CONDITIONS OF ELECTROPLASTICITY

**V. S. Savenko**

*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin,  
the Republic of Belarus*

**O. B. Skvortsov, V. I. Stashenko**

*Institute of Mechanical Engineering named after A. A. Blagonravova,  
Moscow, the Russian Federation*

*The article presents the results of theoretical and experimental studies of electroplastic deformation of metals taking into account ponderomotive factors. The influence of a pulsed current with a density of  $10^3$  A/mm<sup>2</sup> and a duration of  $10^{-4}$  s on the implementation of electroplastic drawing in a deformation unit loaded above the yield limit under conditions of excitation of the electronic subsystem of the metal is considered, and the fundamental possibility of controlling deformation processes to modify the physical and mechanical properties of technically important materials.*

**Keywords:** electroplastic deformation, vibroacoustic vibrations, ponderomotive effects, pulsed current, microstructure.

В настоящее время достаточно изучены и внедрены в производство процессы электропластической деформации металлов (далее – ЭПДМ) при обработке давлением для волочения медной, стальной и алюминиевой проволоки и других деформационных процессов в технически важных материалах.

Ток большой плотности  $J_m = 10^3$  А/мм<sup>2</sup>, и длительностью  $10^{-4}$  с, пропущенный через металл во время деформации выше предела текучести в деформационной зоне, вызывает ЭПДМ, в том числе за счет пондеромоторных факторов, пинч- и скин-эффектов, которые обуславливают дополнительные механические напряжения в кристаллической решетке металла и стимулируют пластическую деформацию. В зоне

## 20 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

механических скалывающихся напряжений с периодичностью подачи импульсов тока на фронте их нарастания создается ультразвуковая вибрация атомного остова кристаллической решетки, которая активно влияет на деформационные процессы, модифицируя служебные характеристики материала [1–3].

Катанка технического алюминия марки АКЛП-5 ПТ полутвердая с максимальным сечением 196 мм<sup>2</sup> подвергалась электропластическому волочению на промышленном волочильном стане СМВ-1-9М4.

В процессе волочения осуществлялся подвод импульсного тока длительностью 10<sup>-4</sup> с и плотностью  $J_m = 10^3$  А/мм<sup>2</sup> в зону деформации алюминиевой проволоки для каждой волоки по технологическому маршруту. Импульсы тока подавались генератором мощностью 70 кВт. с частотой следования импульсов тока 600–800 Гц.

Исследовались следующие режимы: обычное волочение без подвода тока; электропластическое волочение (далее – ЭПВ) с импульсным током длительностью 10<sup>-4</sup> с и плотностью  $J_m = 10^3$  А/мм<sup>2</sup>, пропускаемым через зону деформации при полярности плюс источника тока до зоны деформации, и с полярностью минус источника тока до деформационной зоны.

Микроструктурное исследование полученных образцов проводилось сканированием поверхности шлифов на электронном микроскопе Hitachi Table Microscope TM4000plusII сфокусированным высокоэнергетическим тонким электронным лучом, который генерирует, увеличивает и отображает физическую информацию. Отображение микроструктуры поверхности образца реализуется при помощи электронного пучка на сканируемую поверхность. Возбуждение электронным лучом обуславливает генерацию вторичных электронов, оже-электронов и рентгеновских лучей непрерывного спектра, а также электромагнитного излучения в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях света.

Использование электронов обратного рассеяния в качестве сигналов визуализации может не только помочь осуществить анализ новых микроструктурных характеристик внешнего вида, но и отображать футеровку атомного номера для качественного анализа состава образца. Вторичные электроны с энергией 0–50 эВ чувствительны к состоянию поверхности материала и эффективно отображают микроморфологию поверхности исследуемого образца, а также анализ формы, состава и структуры объекта путем приема сигналов с помощью детекторов вторичного электронного и обратного рассеяния.

На рис. 1–3 представлена микроструктура деформационного алюминия при электропластическом волочении на различных технологических переходах с разной степенью обжатия и полярностью электрического импульса тока.

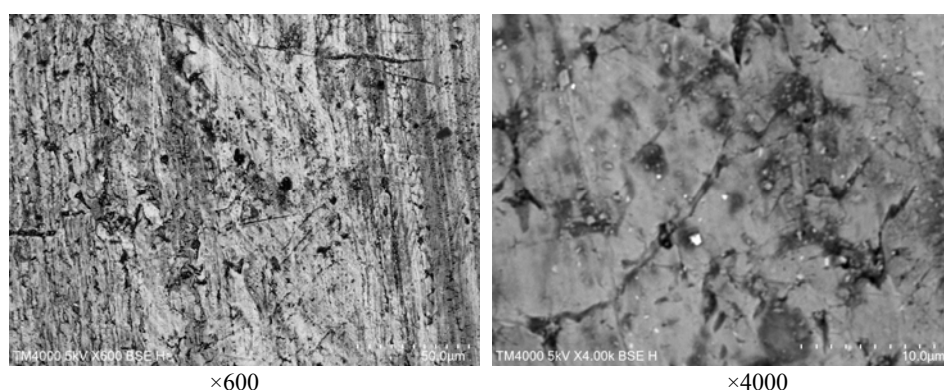


Рис. 1. Электропластическое волочение на технологическом переходе 2,98–2,64 мм; 0,5 м/с без тока

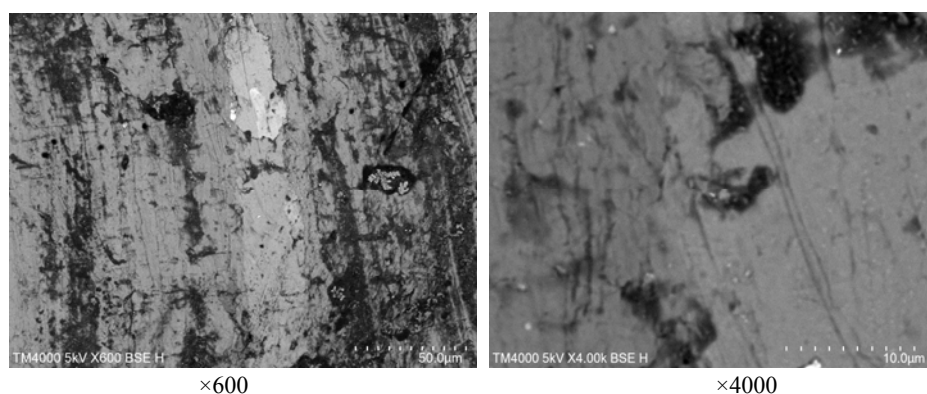


Рис. 2. Электропластическое волочение с полярностью «минус-плюс» на технологическом переходе 2,98–2,64 мм;  $V = 0,5$  м/с

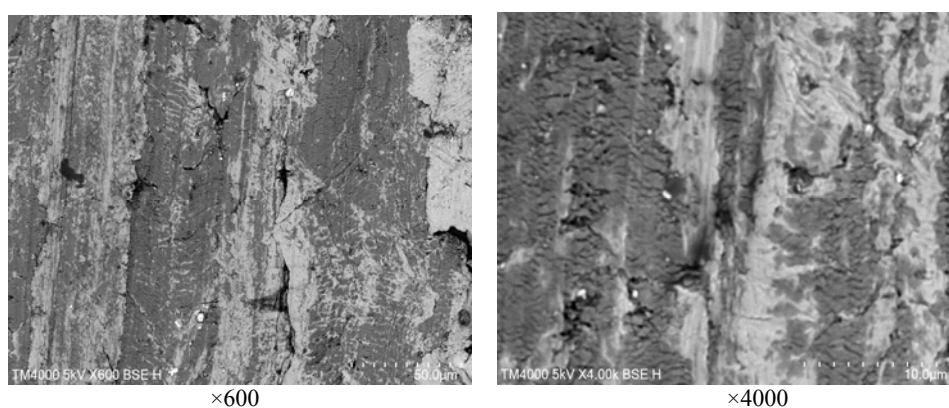


Рис. 3. Электропластическое волочение с полярностью «плюс-минус» на технологическом переходе 2,98–2,64 мм;  $V = 0,5$  м/с

Образцы проходили специальное химическое травление. Исследования проводились на приборе «Пост микроконтроля МК-3» (на базе микроскопа МИ-1) с использованием программ AutoscanObject (программа выделения и анализа объектов на растровых изображениях) и AutoscanAreas (программа выделения и анализа площадей на растровых изображениях). Под влиянием импульса тока большой плотности происходит модификация микроструктуры шлифа. Размеры зерен алюминиевой проволоки, деформированной без тока, намного больше, чем с током. Зерна принимают более округлую форму с уменьшением удлинения зерна, с преимущественной ориентацией аксиальной структуры, существенно уменьшается длина, ширина и удлинение зерен, вертикальная и горизонтальная проекции [4–7].

Исследования по параметру «длина зерна» показали, что наибольшему деформационному влиянию подвержены образцы с направлением тока от плюса к минусу, что свидетельствует о достаточно высоком уровне остаточных напряжений, а также о том, что под действием электрического тока на всех технологических переходах в зоне деформации происходит уменьшение площади и периметра зерен, и микроструктура деформационной части образца становится мелкозернистой.

#### Литература

1. Савенко, В. С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.

## **22 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении**

2. Savenko, V. S. Electroplastic deformation by twinning metals / V. S. Savenko // Actamechanicaet automatic. – 2018. – Vol. 12, N 4. – P. 6–12.
3. Троицкий, О. А. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов : монография / О. А. Троицкий, В. С. Савенко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.
4. Рошупкин, А. М. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / А. М. Рошупкин, И. Л. Батаронов // Физика твердого тела. – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311.
5. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Авраамов. – Москва : МГИУ, 2001. – 844 с.
6. Savenko, V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields / V. S. Savenko // Journal of applied physics. – 1999. – N 5. – P. 1–4.
7. Сташенко, В. И. Новые исследования вибрации металлов с помощью пьезометрических преобразователей под влиянием импульсов тока в статических и динамических условиях / В. И. Сташенко, О. А. Троицкий, О. Б. Скворцов, В. С. Савенко // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : IV Междунар. науч. конф., Москва, 24–26 нояб. 2015 г. / Ин-т машиноведения им. А. А. Благоврадова РАН. – Москва, 2015. – С. 242–244.

UDC 57.086.83

### **MEDICAL AND BIOLOGICAL ASPECTS OF THE APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYLACTIDE FOR BIOPRINTING**

**S. A. Filatov<sup>1</sup>, M. N. Dolgikh<sup>1</sup>, O. S. Filatova<sup>1</sup>, E. A. Paz Esteves<sup>2</sup>,  
N. A. Gavrilenko<sup>1</sup>, E. V. Batyrev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk*

<sup>2</sup>*Center for the Study of Advanced and Sustainable Manufacturing,  
University of Matanzas, the Republic of Cuba*

*The paper presents the results of analysis of PLA structures based on gyroids. The possibilities of the development of more stable and durable structures are investigated.*

**Keywords:** 3D-bioprinting, composite materials, polylactide, bioprinting, scaffolds, biodegradation.

### **МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА ДЛЯ БИОПЕЧАТИ**

**С. А. Филатов<sup>1</sup>, М. Н. Долгих<sup>1</sup>, О. С. Филатова<sup>1</sup>, Э. А. Пас Эстевес<sup>2</sup>,  
Н. А. Гавриленко<sup>1</sup>, Е. В. Батырев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси», г. Минск*

<sup>2</sup>*Центр изучения передового и устойчивого производства,  
Университет Матансаса «Камило Сьенфуэгос», Республика Куба*

*Представлены результаты анализа конструкций ПЛА на основе гироидов. Исследованы возможности создания более устойчивых и долговечных конструкций.*

**Ключевые слова:** 3D-био печать, композитные материалы, полилактид, био печать, скаффолды, биодegradация.