

**Ключевые слова:**

монокристалл, фрактографический анализ, микрокристаллические дефекты, импульсный ток

# РАЗРУШЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТОКА

Михаил ПАХОМОВ, Владимир СТОЛЯРОВ

Исследуются фрактографические особенности изломов высокочистого монокристалла Al после растяжения с введением одиночных импульсов тока, многоимпульсного тока и без тока. Фрактографический анализ свидетельствует о залечивании микрокристаллических дефектов при введении многоимпульсного тока по сравнению с образцами, испытанными с одиночными импульсами и без тока.

## ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллическое состояние любого металла представляет собой совершенную структуру с минимальным количеством внутренних дефектов, прежде всего границ зерен, отделяющих области кристаллической решетки с разной пространственной ориентацией. Такие материалы имеют низкую плотность линейных дефектов, например дислокаций и стыков зерен. Именно кристаллические дефекты во многом определяют различные свойства материалов – механические, тепловые, электрические. В частности, электропластический эффект связан со взаимодействием электронов проводимости со свободными и закрепленными дислокациями и границами зерен [1]. Поэтому можно предположить, что деформационное поведение и разрушение монокристалла с током и без тока будет отличаться. Особый интерес при этом связан с алюминием, который является основой многих промышленных сплавов, использующихся в виде проводов для передачи электроэнергии. Цель работы – экспериментальное изучение и сравнение фрактографических изломов в местах разрушения после растяжения с током и без тока монокристалла алюминия.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выбран монокристалл алюминия высокой чистоты А999 (99,999 %Al) в форме пластины, полученный в условиях невесомости. Образцы для растяжения размером  $0,7 \times 3 \times 13$  мм вырезали из одного наиболее крупного зерна в исходной пластине электроискровым методом. Испытание на растяжение выполнялось на горизонтально-разрывной машине ИР-5081/20 при скорости растяжения 1 мм/мин. Образцы испытывали при следующих режимах: без воздействия тока, с введением одиночных импуль-

сов тока с минимальной амплитудной плотностью  $j = 450$  А/мм<sup>2</sup> и длительностью  $\tau = 1000$  мкс, вводимых каждые 20 с, и многоимпульсного тока с плотностью  $j = 190$  А/мм<sup>2</sup>, длительностью импульса  $\tau = 100$  мкс, частотой тока – 1000 Гц, скважностью  $T / \tau = 10$ , где  $T$  – период тока.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены кривые напряжение-деформация с током и без тока в монокристалле алюминия. Особенности кривых заключаются в следующем: в образце без тока растяжение сопровождается сильным упрочнением, практически без образования шейки, и большим равномерным удлинением (кривая 1). Одиночные импульсы тока с плотностью  $j = 450$  А/мм<sup>2</sup> практически повторяют форму кривой без тока, но приводят к появлению скачков напряжения вниз с амплитудой около 2 МПа, повышению

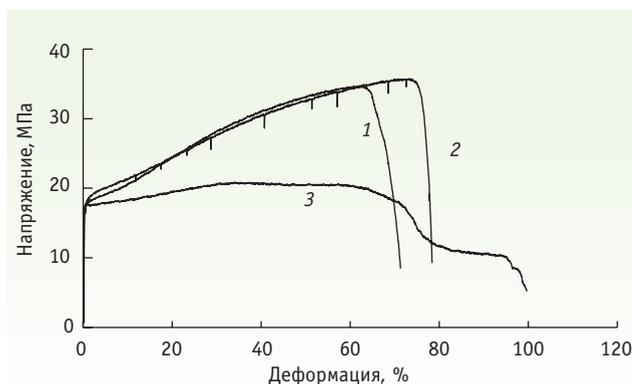


Рис. 1. Кривые напряжение-деформация в монокристалле алюминия в следующих режимах: 1 – без тока; 2 – одиночные импульсы; 3 – многоимпульсный

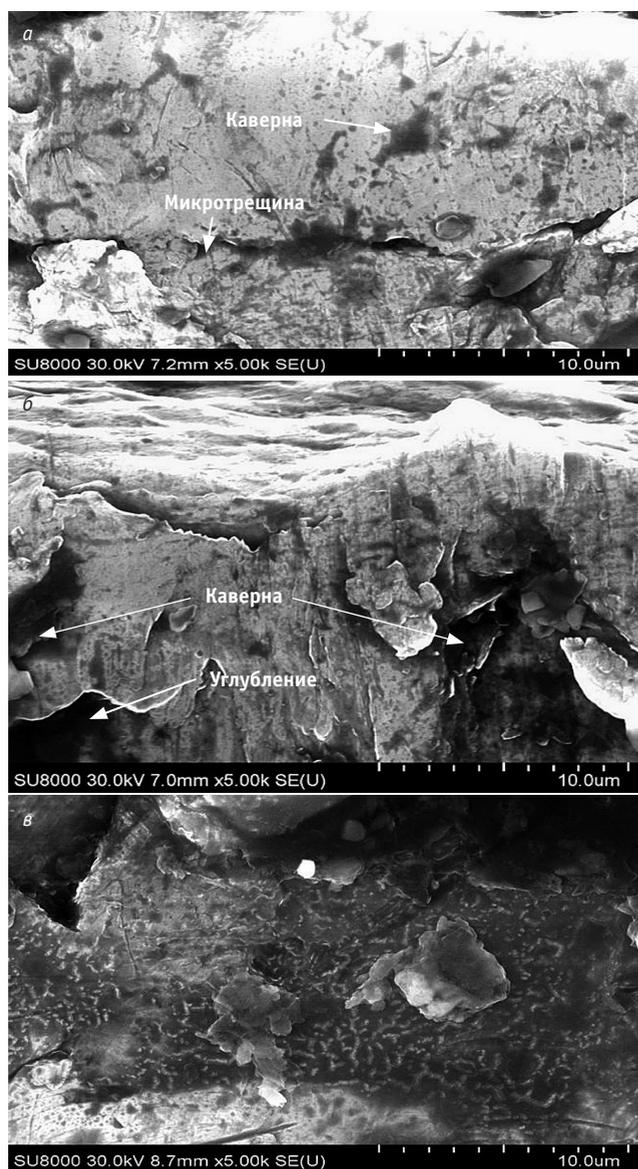


Рис. 2. Изображение мест разрушения при растяжении,  $\times 5000$ : а – без тока; б – одиночные импульсы; в – многоимпульсный

предела прочности и относительного удлинения (кривая 2). Введение многоимпульсного тока, напротив, снижает предел прочности почти в два раза и повышает относительное удлинение до 100% по сравнению с образцом без тока (кривая 3).

На рис. 2 представлены изображения поверхности изломов после растяжения монокристалла алюминия без тока, с одиночными импульсами и многоимпульсным током.

Видно, что поверхность разрушения образца, испытанного без тока, неоднородная, в ряде мест имеются микротрещины и глубокие каверны (рис. 2а). При воздействии одиночных импульсов тока происходит частичное залечивание микротрещин и уменьшение

числа каверн (рис. 2б) [3]. Воздействие многоимпульсным током способствует практически полному исчезновению микротрещин и уменьшению числа каверн (рис. 2в), что согласуется с модельными представлениями [2–4] и экспериментальными результатами [5, 6].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействие одиночных импульсов тока при растяжении монокристалла алюминия приводит к необычному повышению предела прочности, которое может свидетельствовать о смене или трансформации на микроуровне традиционного механизма скольжения дислокаций в переползание. Введение многоимпульсного тока способствует залечиванию микродефектов в изломе образца.

Авторы благодарят Отдел структурных исследований ИОХ РАН за исследование образцов методом растровой электронной микроскопии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Троицкий О.А.** Электропластический эффект в металлах. Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2018. № 9. С. 65–76.
2. **Yu J., Zhang H., Deng D., et al.** Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing. Chin. J. Mech. Eng. 2014. 27. PP. 745–753.
3. **Кукуджанов К.В.** О залечивании поврежденности металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 2. С. 99–124.
4. **Ross C.D., Irvin D.B., Roth J.T.** Manufacturing Aspects Relating to the Effects of Direct Current on the Tensile Properties of Metals. ASME. J. Eng. Mater. Technol. 2007. 129(2). PP. 342–347.
5. **Finkel V.M., Ivanov V.M., Golovin Yu.I.** Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields. Strength Mater. 1983. 15. PP. 501–506.
6. **Баранов Ю.В.** Дефектообразование и залечивание дефектов в металлических материалах импульсным электрическим током // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 2. С. 91–101.

**ПАХОМОВ Михаил Андреевич** –  
младший научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

**СТОЛЯРОВ Владимир Владимирович** –  
доктор технических наук, главный научный сотрудник  
Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН