

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА ТОКА И ИХ КОЛИЧЕСТВА НА ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ МЕДНЫХ ПРОВОЛОК

Сугоняко И.С.<sup>1</sup>, аспирант, I курс, Моркина А.Ю.<sup>2</sup>, младший научный сотрудник, Таров Д.В.<sup>2</sup>, магистрант, II курс, инженер-исследователь, Корзникова Е.А.<sup>1,2</sup>, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией

Научный руководитель: Дмитриев С.В.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет  
г. Уфа

<sup>2</sup>Лаборатория «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях»,  
Уфимский университет науки и технологий  
г. Уфа

Электропластический эффект (ЭПЭ) в металлах был открыт Троицким О.А. в 1969 году [1]. ЭПЭ позволяет повысить пластичность и снизить предел текучести металла при деформации за счет воздействия импульсного электрического тока. ЭПЭ может значительно повысить энергоэффективность процессов обработки металлов давлением, к которым относятся прокатка, волочение, штамповка и т.д. Однако из-за скин-эффекта ЭПЭ возникает только в тонколистовых материалах.

Существует два основных механизма, отвечающих за ЭПЭ: неоднородный джоулевый нагрев и электронный ветер. Первый механизм объясняет ЭПЭ локальным джоулевым нагревом на дефектах, таких как дислокации и границы зерен, увеличивающим подвижность дислокаций. По теории электронного ветра движущиеся электроны действуют на дислокации с определенной силой, за счет чего повышается подвижность дислокаций и снижается напряжение течения металла при деформации [2].

ЭПЭ зависит от следующих параметров: плотность тока, частота и длительность импульса. Известно, что повышение плотности тока позволяет снизить предел прочности при растяжении некоторых металлов и сплавов, например, медных [3]. Однако существует некоторое пороговое значение, превышение которого ведет к ухудшению таких характеристик, как относительное удлинение [4]. Также известно, что повышение плотности тока и длительности импульса повышают как пластичность металла, так и джоулев нагрев, поэтому при электропластической деформации сложно отделить вклад ЭПЭ от вклада повышения температуры. Поэтому для сохранения одинакового теплового эффекта при экспериментах можно увеличивать плотность тока и снижать длину импульса. Варьируя эти параметры, можно экспериментально определить, при каких значениях тепловой эффект при ЭПЭ будет максимальным.

В качестве материала использовали медные проволоки марки Си-ЕТР диаметром 1 мм для того, чтобы избежать скин-эффекта. Далее нарезали проволоку на куски длиной 350 мм.

Для изучения влияния длительности импульса тока на электропластическую деформацию медной проволоки используется экспериментальная установка, показанная на рисунке 1. К проволочному образцу, установленному на раме с помощью подвешенного мертвого груза, прикладывается постоянное растягивающее напряжение. Деформация образца контролируется с помощью циферблатного микрометра. Образец подключается проводниками большого диаметра к электрическому блоку на, напряжение на конденсаторной батарее которого контролируется цифровым вольтметром. Для измерения длительности импульса тока используется осциллограф. Более подробное описание методики и установки представлено в работах [5,6]. Эксперимент проводили для емкостей конденсатора  $C_1 = 25 \text{ мФ}$  и  $C_2 = 1/6 C_1 = 4,2 \text{ мФ}$  при начальном напряжении конденсаторов  $U_1 = 60 \text{ В}$  и  $U_2 = 190 \text{ В}$ , соответственно. При этом джоулев нагрев проволоки был одинаковым для импульсов различной длительности и составлял всего  $25^\circ\text{C}$ .

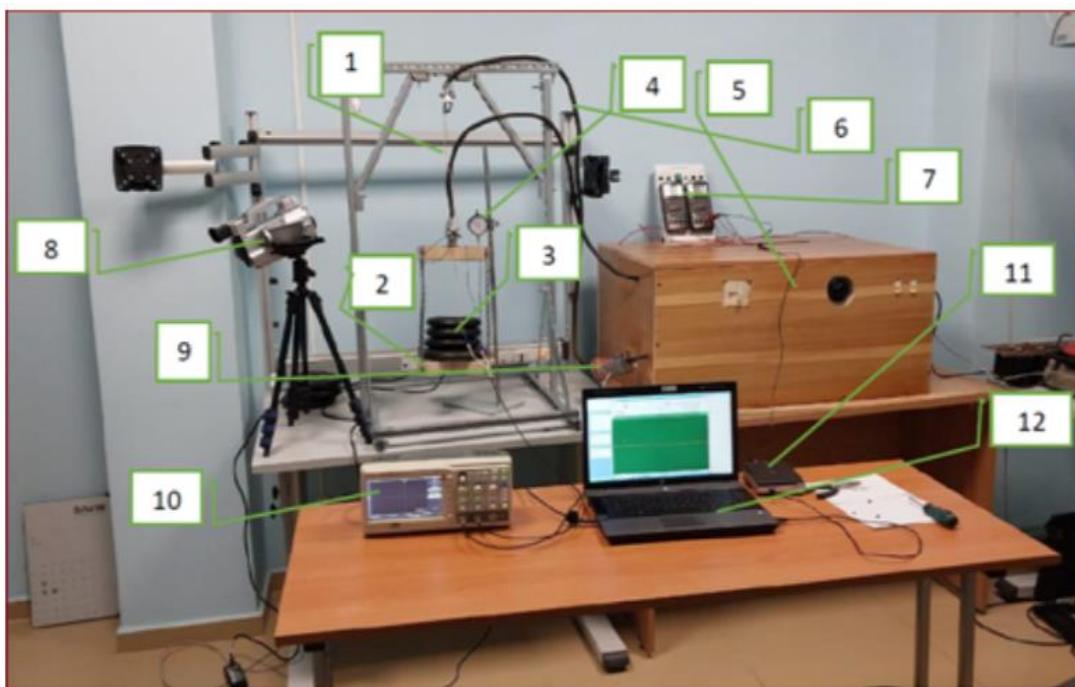


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для исследования ЭПЭ

1 – образец; 2 – подвес – держатель грузов; 3 – грузы различной массы; 4 – индикатор перемещений; 5 – электрический блок; 6 – проводники большого сечения; 7 – цифровой вольтметр; 8 – тепловизор; 9 – трансформатор тока, заключенный в экранирующую оболочку; 10 – цифровой осциллограф; 11 – осциллографическая USB приставка; 12 - ПК

На рисунке 2 представлены графики зависимости тока через образец от времени для двух значений емкости конденсатора,  $C_1 = 25 \text{ мФ}$  и  $C_2 = 4,2 \text{ мФ}$ . Видно, что длительность импульса для  $C_1$  и  $C_2$  составляет 1,35 мс и 0,6 мс,

соответственно. При этом плотность тока для  $C_1$  ниже, чем для  $C_2$ , что обеспечивает одинаковое выделение джоулева тепла.

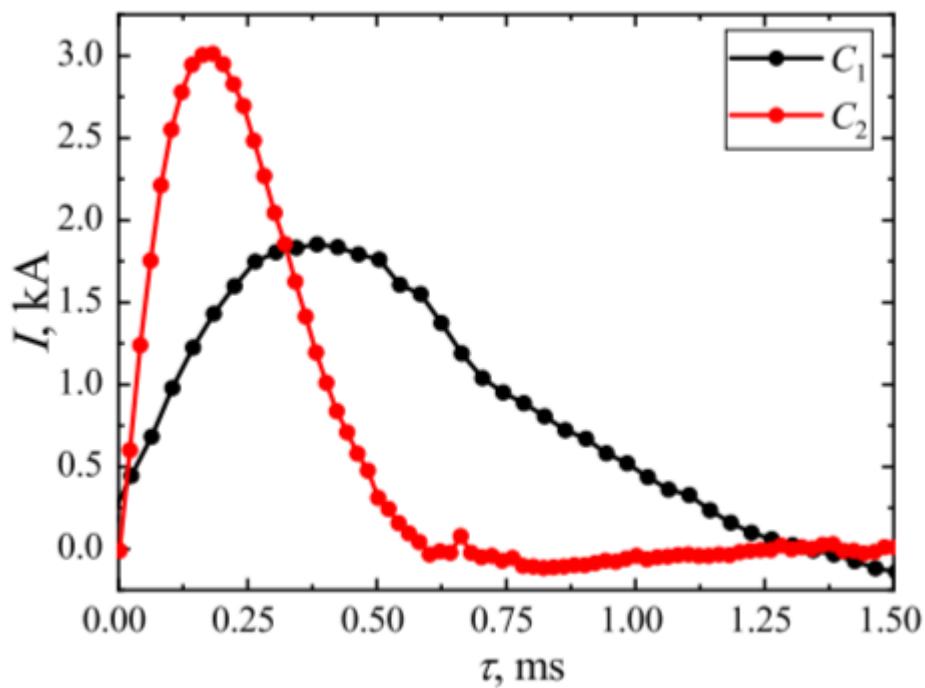


Рисунок 2 – Зависимость силы тока от длительности импульса при  $C_1 = 25$  мФ и  $C_2 = 4,2$  мФ

На рисунке 3 показана зависимость относительной деформации образца от числа импульсов для  $C_1$  и  $C_2$ . при фиксированном растягивающем напряжении в диапазоне 108-172 МПа.

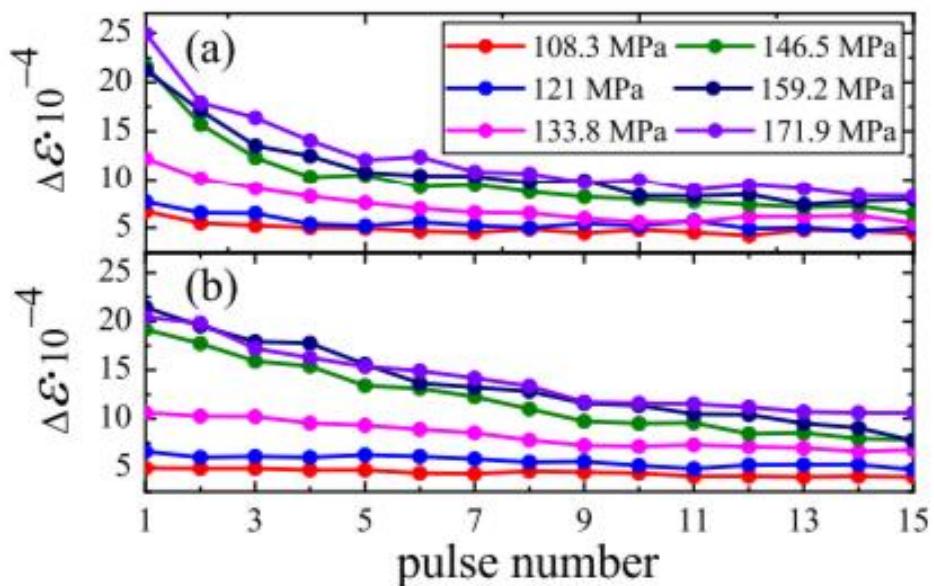


Рисунок 3 – Зависимость относительной деформации от числа импульсов при: а -  $C_1 = 25$  мФ, б -  $C_2 = 4,2$  мФ

Видно, что величина электропластической деформации увеличивается с увеличением растягивающего напряжения. С другой стороны, относительная деформация образца уменьшается с каждым последующим импульсом тока до тех пор, пока не произойдет насыщение. Это связано с тем, что некоторые дислокации, начинающие двигаться при воздействии импульсного тока, натыкаются на препятствия (границы зерен, поверхность проволоки), поэтому число подвижных дислокаций с каждым импульсом тока снижается. Первый импульс вызывает максимальную пластическую деформацию в случае более длинного импульса, но для более длинного импульса уменьшение  $\Delta\varepsilon$  с каждым последующим импульсом тока происходит быстрее, чем в случаях с более коротким импульсом.

#### Вывод

При первом импульсе образец, подвергшийся воздействию более длительного импульса тока, продемонстрировал более высокие пластические свойства, чем образец, на который действовал короткий импульс. Однако при последующих импульсах снижение относительной деформации при длительном импульсе тока происходит быстрее, чем при коротком импульсе.

#### Список литературы

1. Troitsky, O.A. Electromechanical effect in metals / O. A Troitsky / JETP Letters. – 1969. – Vol. 1. – P. 18–22.
2. Влияние повторяющихся импульсов тока высокой плотности на пластическую деформацию медных проводов / А. Ю. Моркина, Д. В. Таров, Д. М. Наумова [и др.] // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2024. – № 3. – С. 15-23. – DOI 10.31040/2222-8349-2024-0-3-15-23. – EDN FWSUYC.
3. Effect of current density and zinc content during electrical-assisted forming of copper alloys / C. M. Dzialo, M. S. Siopis, B. L. Kinsey, K. J. Weinmann // CIRP Annals. – 2010. – Vol. 59, № 1 – P. 299–302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.014>.
4. Indhiarto, I. Effect of peak current density on tensile properties of az31b magnesium alloy / I. Indhiarto, T. Shimizu, M. Yang // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 6. – P. 1457. doi: 10.3390/ma14061457. URL <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/6/1457>
5. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum / A. Y. Morkina, D. V. Tarov, G. R. Khalikova [et al.] // Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. – 2024. – V 22, № 4. – P 615–632. doi:10.22190/fume240920049m.
6. Effect of Repetitive High-Density Current Pulses on Plastic Deformation of Copper Wires under Stepwise Loading / S. V. Dmitriev, A. Y. Morkina, D. V. Tarov [et al.] // Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research. – 2024. – Vol. 1, № 1. – P. 27-43. – DOI 10.31181/smeor1120243. – EDN LCUN-MU.