ФИЗИКА

УДК 53.097
DOI: 10.31040/2222-8349-2024-0-3-15-23

ВЛИЯНИЕ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ

© А.Ю. Моркина, Д.В. Таров, Д.М. Наумова, П.С. Татаринов, В.П. Татаринов, А.С. Семенов, И.А. Якушев, С.В. Дмитриев

Импульсы электрического тока высокой плотности повышают пластичность и снижают предел текучести металлов при незначительном выделении тепла. Этот эффект имеет большой потенциал для развития энергосберегающих технологий обработки труднодеформируемых металлических материалов. Несмотря на долгую историю изучения электропластичности, до сих пор нет единого мнения о физической природе этого эффекта. В данной работе с помощью самодельной экспериментальной установки исследовано влияние повторяющихся импульсов, приложенных при одинаковом или постепенно возрастающем растягивающем напряжении, на пластическую деформацию медной проволоки. Проведено сравнение электропластичности проволоки в состоянии поставки и после отжига. Показано, что при постоянном растягивающем напряжении приращение пластической деформации проволоки уменьшается с каждым последующим импульсом. Этот эффект сильнее проявляется для отожженной проволоки, поскольку она имеет меньшую плотность дислокаций и, следовательно, меньший ресурс пластичности. Оценивается выделение джоулева тепла в образце и нагрев за счет пластической деформации. Полученные результаты будут использованы для подгонки параметров атомистической модели, разрабатываемой для описания взаимодействия потока электронов с дислокациями.

Ключевые слова: электропластический эффект, ползучесть, импульсы тока, медь, деформация растяжения.

Введение. Электропластический эффект (ЭПЭ) в металлах был открыт Троицким в 1969 г. [1] и впоследствии исследован в ряде фундаментальных работ [2]. Эффект заключается в снижении предела текучести металлических материалов при прохождении через них импульсов тока. Примечательно, что повышение температуры деформируемого материала может быть небольшим, тем самым джоулев нагрев не может объяснить значительное увеличение пластичности.

В последние годы исследования ЭПЭ становятся все более популярными, поскольку этот эффект находит применение в различных отраслях промышленности. Несмотря на широкое распространение ЭПЭ, лежащие в его основе принципы до сих пор неясны. Согласно многим исследованиям, двумя основными механизмами, объясняющими этот эффект, являются неоднородное выделение джоулева нагрева и электронный ветер [3–7]. Тепло, выделяемое на дефектах,

МОРКИНА Алина Юрьевна, Уфимский университет науки и технологий,
e-mail: alinamorkina@yandex.ru
ТАРОВ Данила Владимирович, Уфимский университет науки и технологий,
e-mail: tarovdv@gmail.com
НАУМОВА Дарья Михайловна, Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,
e-mail: naumova.darya.m@gmail.com
ТАТАРИНОВ Павел Семенович, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, e-mail: paveltatarinov@mail.ru
ТАТАРИНОВ Владимир Павлович, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, e-mail: tatarinov.vp01@mail.ru
СЕМЁНОВ Александр Сергеевич, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, e-mail: sash-alex@yandex.ru
ЯКУШЕВ Илья Анатольевич, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, e-mail: yakushevilya@mail.ru
ДМИТРИЕВ Сергей Владимирович – д.ф.-м.н, Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,
e-mail: dmitriev.sergey.v@gmail.com

таких как дислокации и границы зерен, увеличивает их подвижность и повышает пластичность; при этом среднее повышение температуры остается незначительным. Электронный ветер оказывает на дислокации силу, которая также увеличивает их подвижность [8].

Целью данного исследования является анализ влияния повторяющихся импульсов электрического тока высокой плотности на деформацию медных образцов в различных структурных состояниях при растяжении, вызванном мертвой нагрузкой. Оценивается температура образцов после прохождения импульса электрического тока. Рассчитано выделение тепловой энергии при пластической деформации проволоки.

Материал и методология. Характеристика микроструктуры. В данной работе использовалась медная проволока марки Cu-ETP M1 с химическим составом, представленным в табл. 1. Этот материал выбран потому, что он используется для производства массивной проволоки, а волочение проволоки может быть более эффективным при использовании электрических импульсов [9, 10]. Образцы длиной 360 мм были вырезаны из медной проволоки диаметром 1 мм. Рассматриваются два структурных состояния: исходное и отожженное при температуре 500°C в течение 2 ч и охлажденное в печи.

Для характеристики микроструктуры медных проволок был проведен дифракционный анализ обратного рассеяния электронов (EBSD). Поверхность образцов для EBSD-анализа готовилась следующим образом: заготовки материала разрезались на пластины на электроискровом станке, затем эти пластины истончались механически на шлифовальной бумаге с постепенным уменьшением абразивности, после чего полировались алмазной пастой, также с последовательным переходом на более мелкий абразив. Окончательная полировка проводилась методом струйной электрополировки на аппарате Tenupol-3 с использованием 20% водного раствора H3PO4. EBSD-анализ проводился на растровом электронном микроскопе TESCAN MIRA при ускоряющем напряжении 20 кВ. Статистический анализ данных, включая оценку среднего размера зерна, проводился с использованием встроенного программного пакета «CHANNEL 5.0» при доверительной вероятности 95%. EBSD-карты получали с шагом сканирования 0.5 мкм, максимально допустимая ошибка в определении ориентации составляла 2°. Для повышения достоверности полученных EBSD-данных по методу, предложенному Хамфрис [11–14], мелкие зерна, содержащие 5 и менее пикселей, автоматически «очищались» с помощью стандартной опции расширения зерен в программе EBSD.

EBSD-изображения микроструктуры и распределение углов разориентации представлены на рис. 1 для исходного образца и рис. 2 для отожженного образца. Рис. (a), (c) и (e) показывают результаты для сечений вдоль оси проволоки, а (b), (d) и (f) – перпендикулярно оси проволоки. На панелях (a) и (b) карты ориентации зерен показаны в соответствии с цветовой легендой. На панелях (c) и (d) карты границ зерен, показывающие малоугловые границы (LAB) с углами $2° < \Theta < 15°$ и высокоугловые границы (HAB) с $\Theta \geq 15°$, показаны красной и черной линиями соответственно (Θ – угол разориентации). Границы двойников (TB) также обозначены зелеными линиями. На (e) и (f) показано распределение границ зерен по углам разориентации.

Сравнивая панели (a) и (b) на рис. 1, можно увидеть, что ориентация зерен в исходной структуре случайна в продольном направлении, но в поперечном направлении они имеют преобладающую ориентацию, близкую к <001> и <111> (красный и синий цвета зерен соответственно). В структуре наблюдается большое количество двойниковых границ, см. зеленые линии на рис. 1(c) и (d). Большинство границ зерен имеют большой угол разориентации. Средний размер зерна, без учета двойниковых границ, составляет 9.1 ± 0,4 мкм и 8.2 ± 0.2 мкм в продольном и поперечном направлениях, соответственно. Во время отжига, см. рис. 2, структура меди рекристаллизуется, и средний размер зерна увеличивается до 113.8 ± 20.7 мкм и 50.4 ± 8.9 мкм в продольном и поперечном направлениях, соответственно. После отжига сохраняется преобладающая ориентация зерен вблизи <001> и <111> и наличие большой доли двойниковых границ.

Таблица 1

Химический состав меди марки M1

Массовая доля элемента										
Cu не менее	Нечистоты, не более									
	Bi	Fe	Ni	Zn	Sn	Sb	As	Pb	S	O
99.90	0.001	0.005	0.002	0.004	0.002	0.002	0.002	0.005	0.004	0.05

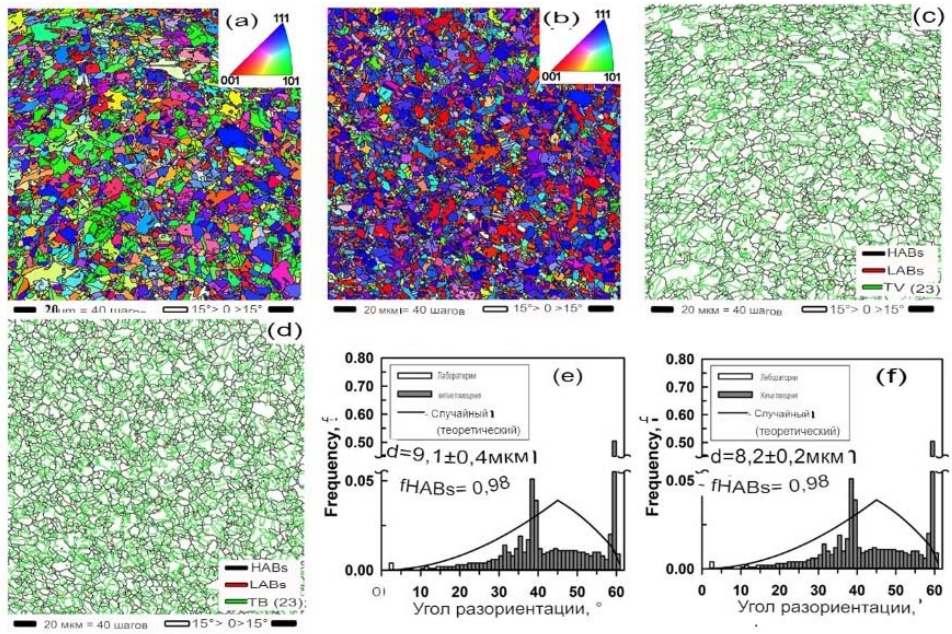

Рис. 1. Микроструктура исходной медной проволоки: карты распределения ориентации зерен (a, b); карты распределения границ зерен (c, d); распределение границ зерен в зависимости от угла разориентации (e, f)

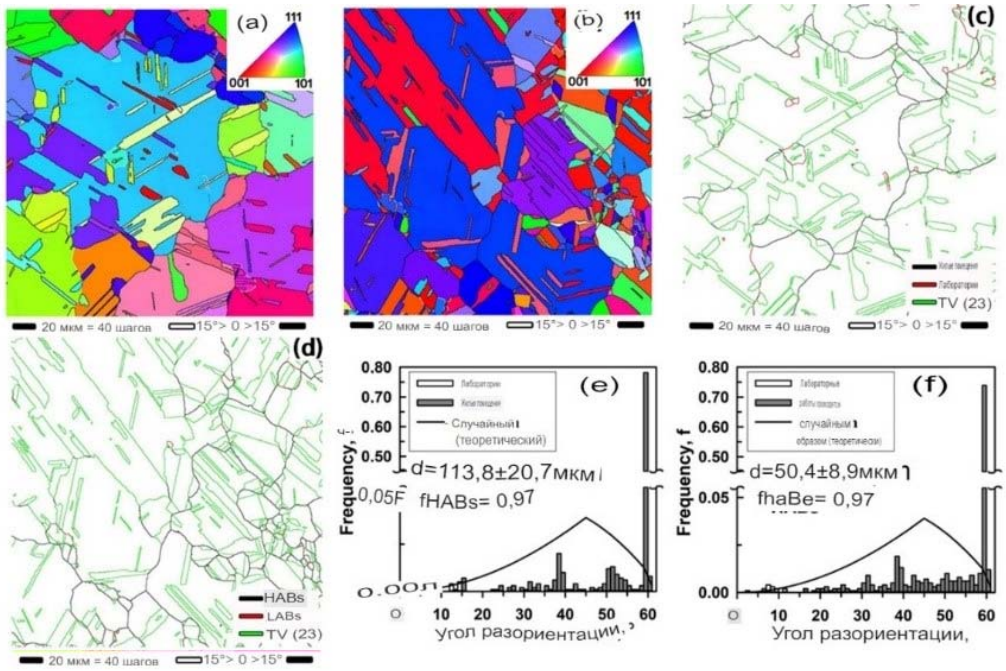

Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для отожженной медной проволоки

Экспериментальная установка. Электрическая схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Регулируемый источник постоянного напряжения для зарядки батареи конденсаторов собран из лабораторного автотрансформатора и удвоителя напряжения по простейшей схеме Латура–Делона–Гренашера. Выключатель S1 используется для отключения зарядки при достижении необходимого для эксперимента уровня заряда, который визуально контролируется вольтметром для измерения уровня напряжения и, соответственно, заряда батареи конденсаторов.

Для проведения эксперимента по влиянию импульсного тока на пластическую деформацию медной проволоки, последняя нагружается мертвым грузом до заданного растягивающего напряжения. Все эксперименты проводятся при комнатной температуре.

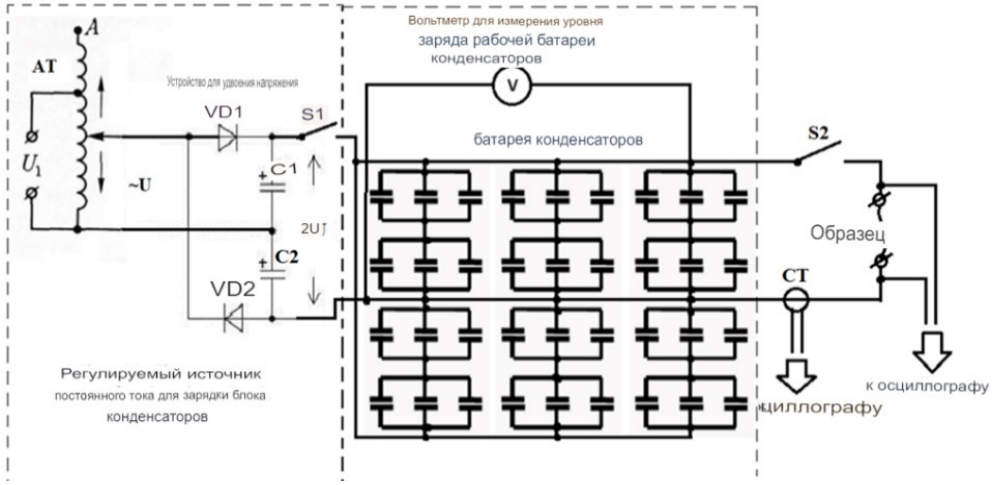

Рис. 3. Электрическая схема экспериментальной установки

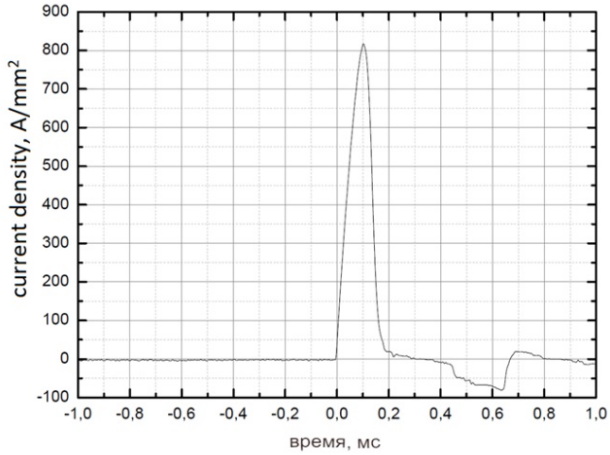

Рис. 4. Пример зависимости тока через образец от времени. Данный импульс получен путем разряда батареи конденсаторов, заряженных до напряжения 60 В

После зарядки батареи конденсаторов до необходимого напряжения и выключения выключателя S1 батарея разряжается через образец путем включения выключателя S2. В состав батареи входят 36 электролитических конденсаторов емкостью 3300 мкФ и рабочим напряжением до 400 В каждый. Общая емкость батареи конденсаторов составляет C = 29700 мкФ. В проводимых экспериментах батарея конденсаторов заряжается до V = 60 В. Полная электрическая энергия, запасенная в батарее, составляет

$$W = \frac{CV^2}{2} = 53.5\,J. \qquad (1)$$

Падение напряжения на образце и ток через образец контролируются одновременно. Ток регистрируется трансформатором тока (ТТ), отклик которого подается на вход осциллографа, а падение напряжения на образце подается через делитель на другой вход осциллографа. ТТ выполнен из ферритового кольца марки 2000НМ1 со стандартными размерами К45.0×28.0×12, на которое намотано 140 витков провода марки ПЭВ-1 с диаметром поперечного сечения 0.5 мм. Для устранения воздействия импульса тока на трансформатор тока он заключен в экранирующую оболочку. Пример зависимости тока, проходящего через образец, от времени приведен на рис. 4. Из этого графика видно, что длительность импульса тока составляет около 0.1 мс, а максимальная плотность тока – 800 А/мм^2.

В данном исследовании изучается влияние повторяющихся электрических импульсов на удлинение медной проволоки под действием мертвой нагрузки. Серия импульсов подается на медную проволоку при фиксированной растягивающей нагрузке, затем нагрузка увеличивается и подается новая серия импульсов. Увеличение растягивающей деформации проволоки, $\Delta\varepsilon$, измеряется после каждого импульса. Между импульсами 15 с.

Кривые напряжение-деформация. Механические испытания на растяжение для получения кривых «напряжение-деформация» проводились на образцах с длиной калибра L_0 = 10 мм при комнатной температуре на горизонтальной разрывной машине IM5081. Результаты представлены на рис. 5. На (a) приведено сравнение кривых напряжение-деформация для исходной (зеленая кривая) и отожженной (черная кривая). На (b) представлены кривые напряжение-деформация для отожженной при разных скоростях деформации.

Из рис. 5(a) видно, что отожженный образец пластически деформируется при несколько меньших напряжениях, чем исходный образец. Анализ стадии упругой деформации показал, что отожженная (исходная) проволока имеет предел текучести σ_y = 95 МПа (125 МПа). Рис. 5(b) показывает, что скорость деформации в рассматриваемом диапазоне не оказывает сильного влияния на пластическое поведение образцов при растяжении. Наблюдается лишь незначительное увеличение предела текучести с ростом скорости деформации.

Результаты. Сначала измеряется тепловыделение в проводах под действием импульсов тока. Медный провод был подвергнут растягивающей нагрузке 80 МПа. Батарея конденсаторов заряжалась до напряжения V и разряжалась через проволоку. Сразу после электрического импульса измерялся прирост деформации растяжения $\Delta\varepsilon$. Эта деформация обусловлена джоулевым нагревом проволоки и исчезала через десятки секунд по мере остывания проволоки на воздухе. Увеличение температуры проволоки оценивается по формуле теплового расширения:

$$\Delta T = \frac{\Delta\varepsilon_J}{\alpha}, \qquad (2)$$

где a = 16.9×10^{-6} K^{-1} – коэффициент теплового расширения меди при комнатной температуре.

Результат представлен на рис. 6 для исходной (черный) и отожженной (красный) проволоки. В (a) и (b) увеличение деформации, вызванное электрическим импульсом, и соответствующее увеличение температуры показаны как функции напряжения на конденсаторе. На вставках приведены кривые в логарифмическом масштабе, показывающие зависимость мощности $\Delta\varepsilon_J$ и ΔT от V:

$$\Delta\varepsilon_J \sim V^p, \Delta T \sim V^s\ . \qquad (3)$$

Экспоненты s и p больше для исходного образца, чем для отожженного, поскольку наклон линий, аппроксимирующих данные в логарифмическом масштабе, больше для исходного образца. В частности, s = 2.1 и 2.8 для отожженных и исходных образцов, соответственно. Тепловыделение увеличивается быстрее с ростом V для отожженного образца, элементы, которые были в зернограничной сегрегации оказались в твердом растворе за счет чего электрическое сопротивление возросло. Как уже упоминалось выше, эксперименты по изучению ЭПЭ проводились для напряжения на конденсаторной батарее V = 60 В. В этом случае, как показано на рис. 6(b), повышение температуры образцов, как в исходном, так и в отожженном состоянии, составляет около 25 К, что незначительно и этим можно пренебречь. Отметим, что приращение деформации проволоки вследствие жжоулевского нагрева составляет $\Delta\varepsilon_J$ = 4.0×10^{-4} для образца в исходном состоянии и $\Delta\varepsilon_J$ = 4.4×10^{-4} для отожженного образца. Эта деформация вычитается из общей деформации проволоки De, чтобы найти пластическую деформацию, вызванную электрическим импульсом:

$$\Delta\varepsilon_p = \Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_J\ . \qquad (4)$$

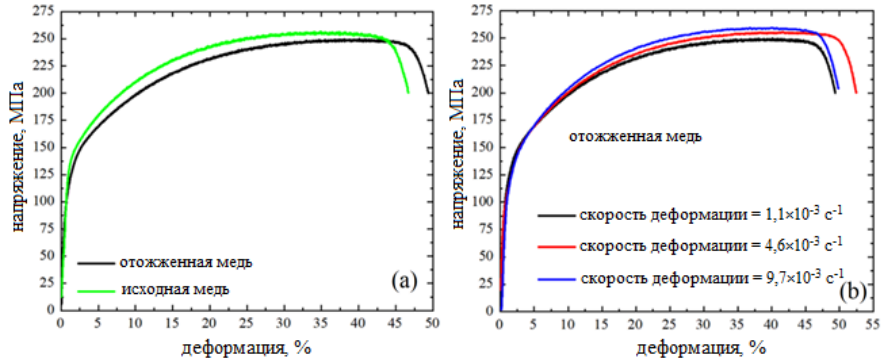

Рис. 5. Кривые напряжение-деформация для исходного (зеленая кривая) и отожженного (черная кривая) образцов, деформированных при скорости деформации 1.1×10^{-3} с$^{-1}$ (a); влияние скорости деформации на кривые напряжение-деформация для отожженных образцов (b)

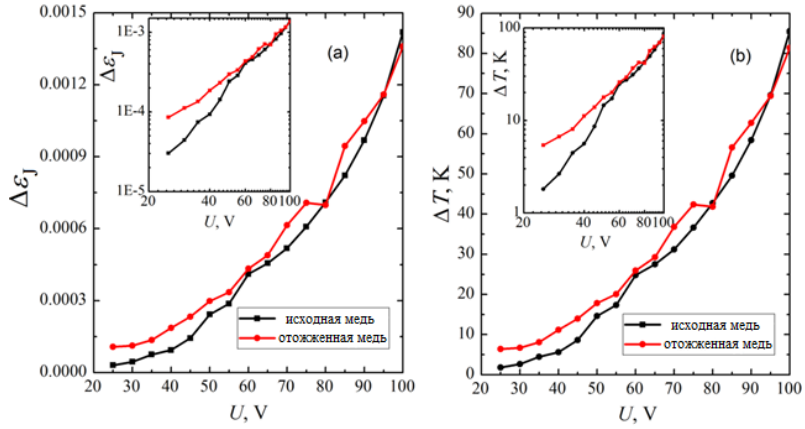

Рис. 6. Увеличение деформации растяжения проволоки под воздействием электрического импульса (a) и соответствующее увеличение температуры проволоки в зависимости от напряжения батареи конденсаторов, разряженной на проволоку (b)

Удлинение проволоки под действием повторяющихся электрических импульсов. Прирост пластической деформации растяжения проволоки, $\Delta\varepsilon_p$, рассчитанный согласно уравнению (4), (рис. 7) как функция от числа импульсов для семи значений растягивающего напряжения. В (a) и (b) показаны результаты для образцов, исходных и отожженных.

Как следует из результатов, представленных на рис. 7(a), при растягивающих напряжениях в диапазоне 95.5–121 МПа, действующих на образец в исходном состоянии, ЭПЭ практически не проявляется (черная, красная и синяя кривые). Наблюдаемый прирост деформации $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_J$ является полностью обратимой деформацией, связанной с тепловым расширением проволоки за счет выделившегося джоулева тепла. После прохождения импульса тока образец удлиняется, но в течение примерно 15 с, пока заряжается электрический блок, он остывает, и деформация исчезает.

Отметим, что отсутствие ЭПЭ в указанном диапазоне растягивающих напряжений связано с тем, что эти напряжения меньше предела текучести медной проволоки в состоянии поставки (σ_y = 125 МПа). В случае растягивающих напряжений выше σ_y ЭПЭ начинает проявляться в том, что при прохождении импульсов тока образец удлиняется на величину, превышающую деформацию при тепловом расширении, а после охлаждения наблюдается остаточная пластическая деформация. Однако с каждым последующим импульсом ЭПЭ ослабевает. Это связано с тем, что дислокации, движение которых активируется импульсами электрического тока, постепенно выходят на границы зерен и закрепляются на стопорах, так что пластическая деформация при заданном уровне растягивающего напряжения и заданной мощности импульса тока больше не возникает.

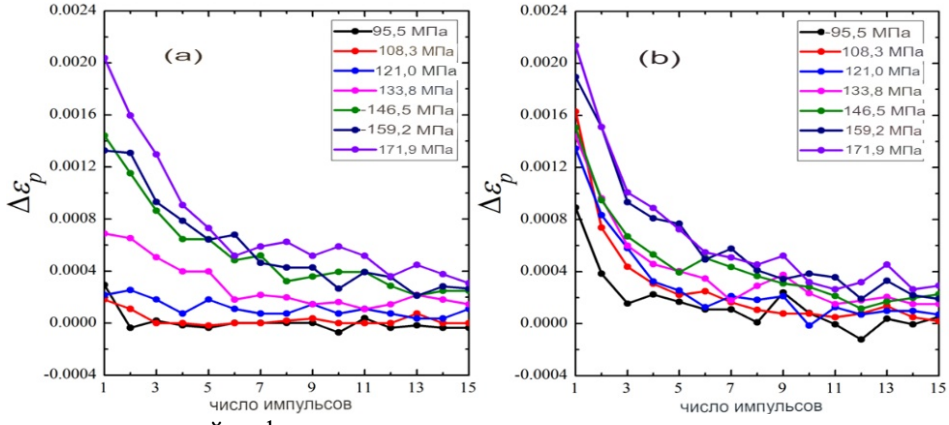

Рис. 7. Увеличение пластической деформации при растяжении в зависимости от числа электрических импульсов при семи значениях фиксированного растягивающего напряжения, как указано в легендах. При каждом растягивающем напряжении подается пятнадцать импульсов тока, а затем нагрузка увеличивается. Результаты для исходного образца (a) и отожженного образца (b)

Аналогичные результаты для отожженного образца показаны на рис. 7(b). Можно заметить, что ЭПЭ проявляется при более низких растягивающих напряжениях по сравнению с исходным образцом, поскольку предел текучести для первого ниже (σ_y = 95 МПа). Удлинение, происходящее во время первого импульса тока при тех же растягивающих напряжениях, несколько выше по сравнению с образцом в отожженном состоянии, что можно объяснить большей подвижностью дислокаций. Однако ЭПЭ для отожженных образцов затухает быстрее с увеличением числа импульсов. Это связано с тем, что после отжига плотность дислокаций становится меньше.

Во втором эксперименте растягивающее напряжение постепенно увеличивалось примерно на 5% после подачи четырех импульсов тока при одинаковом растягивающем напряжении. Результаты в диапазоне растягивающих напряжений от 83 до 191 МПа показаны на рис. 8 для исходного образца (a) и отожженного образца (b). Четыре кривые показывают прирост пластической деформации при растяжении образца после каждого из четырех импульсов, приложенных при фиксированном значении растягивающего напряжения. Для импульсов с первого по четвертый кривые показаны черным, красным, синим и пурпурным цветами соответственно.

Видно, что независимо от структурного состояния меди приращение деформации увеличивается с ростом растягивающего напряжения для всех четырех импульсов. При этом сохраняется зависимость, обнаруженная на предыдущем этапе эксперимента, то есть каждый последующий импульс дает меньшую деформацию проволоки. Это наиболее очевидно в случае отожженного образца, показанного на рис. 8(b), где прирост деформации после первого импульса значительно выше по сравнению с последующими импульсами. Также можно заметить, что для образцов в исходном состоянии, показанных на рис. 9(a), ЭПЭ проявляется при растягивающих напряжениях немного ниже предела текучести, начиная с 120 МПа. Это можно объяснить тем, что ЭПЭ снижает предел текучести.

Выделение тепла при пластической деформации. Экспериментальная установка, используемая в данном исследовании (нагружение мертвым грузом), позволяет оценить и сравнить тепловыделение, обусловленное пластической деформацией проволоки, с выделением джоулева нагрева. Пластическая деформация проволоки приводит к тому, что мертвый груз массы M перемещается вниз на ΔL. Работа, совершенная грузом при этом перемещении, $\Delta A = Mg\Delta L$, где g – ускорение свободного падения, предполагается полностью потраченной на увеличение внутренней энергии проволоки ΔE в виде тепла, тогда повышение температуры проволоки составит

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{cm} = \frac{\Delta A}{cm} = \frac{Mg\Delta L}{cm}, \qquad (5)$$

где c = 390 Дж/(кг-К) – удельная теплоемкость меди, а $m = 2.56\times10^{-3}$ кг – масса образца.

Необратимое удлинение проволоки составляет $\Delta L = L\Delta\varepsilon_p$, где L = 0.36 м – длина проволоки. Растягивающее напряжение, приложенное к проволоке, составляет σ = Mg/S, где S = 7.85×10^{-7} м^2 – площадь поперечного сечения проволоки. В связи с этим уравнение (5) приобретает вид

$$\Delta T = \frac{\sigma SL\Delta\varepsilon_p}{cm}. \qquad (6)$$

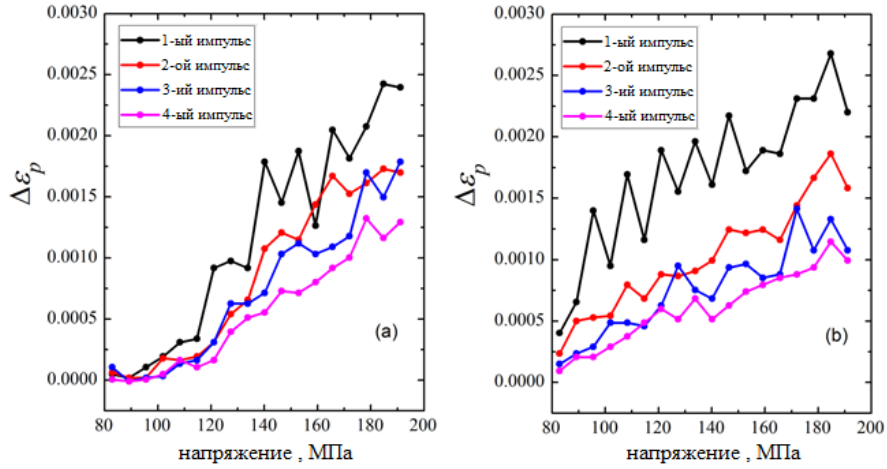

Рис. 8. Зависимость приращения пластической деформации при растяжении от напряжения для каждого из четырех импульсов, приложенных при фиксированном напряжении: исходный образец (a) и отожженный образец (b)

Например, на рис. 8(б) для σ = 180 МПа после первого импульса $\Delta\varepsilon_p = 2.3\times10^{-3}$, а из уравнения (6) следует, что повышение температуры составляет $\Delta T = 0.117$ К. Это на два порядка меньше, чем джоулево тепловыделение (25 К).

Заключение. Исследовано влияние импульсного электрического тока на пластическую деформацию медных проводов марки М1. Была разработана экспериментальная установка для анализа влияния повторяющихся импульсов тока при фиксированном растягивающем напряжении, создаваемом мертвой нагрузкой. Использование образцов с относительно большой длиной калибра (360 мм) позволило с высокой точностью измерять приращения деформации проволоки под действием электрических импульсов с помощью циферблатного микрометра. На основании результатов, представленных на рис. 6(б), для экспериментов было выбрано напряжение на батарее конденсаторов 60 В. При таком напряжении повышение температуры проводов составляет около 25 К, что довольно мало, и наблюдаемая пластическая деформация обусловлена взаимодействием электронов с дефектами решетки и не может быть объяснена джоулевым нагревом. Также было обнаружено, что при напряжении 60 В, тепловое расширение проволок вызывает деформацию $\Delta\varepsilon_J = 4.0\times10^{-4}$ для исходного образца и $\Delta\varepsilon_J = 4.4\times10^{-4}$ для отожженного образца. Эта деформация, вызванная джоулевым нагревом, была вычтена из общей деформации проволоки в соответствии с уравнением (4) для того, чтобы найти приращение пластической деформации $\Delta\varepsilon_p$. Основной вывод состоит в том, что увеличение пластической деформации проволоки при фиксированном растягивающем напряжении уменьшается с ростом числа электрических импульсов, см. рис. 7 и 8. Можно предложить следующую физическую интерпретацию этого факта. При заданном напряжении дислокации прижаты к препятствиям. Электрический импульс вызывает неоднородное тепловыделение в основном в ядрах дислокаций, поскольку они являются эффективными рассеивателями электронов. Локальное повышение температуры вокруг дислокаций увеличивает их подвижность. Дислокации начинают скользить и перемещаться в более холодную область кристаллической решетки, где они останавливаются. Перемещение дислокаций приводит к увеличению пластической деформации. В целом представленные результаты подтверждают, что увеличение пластической деформации образцов происходит при очень небольшом среднем повышении температуры (в наших экспериментах – 25 К). Эффект электропластичности может быть использован для разработки энергосберегающего метода обработки металлов давлением [15–20], поскольку энергия электрических импульсов в основном расходуется на нагрев дислокаций, а не основной массы кристалла, и движение дислокаций приводит к желаемой пластической деформации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания Уфимского университета науки и технологий (№ 075-03-2024-123/1) Молодежной научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях».

Литература

1. Troitsky O.A. Electromechanical effect in metals // JETP Letters. 1969. 1. P. 18–22. http://jetpletters.ru/ps/0/article_25672.shtml

2. Okazaki K., Kagawa M., & Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals // Scripta Metallurgica. 1978. 12(11). P. 1063-1068. https://doi.org/10.1016/0036-9748(78)90026-1

3. Dimitrov N., Liu Yu., & Horstemeyer M. Electroplasticity: A review of mechanisms in electromechanical coupling of ductile metals // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2020. 29. P. 1–12. https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1789925

4. Izadpanah S., Cao X., An D., Li X., & Chen J. One step forward to electrically assisted forming mechanisms and computer simulation: A review // Advanced Engineering Materials. 2023. 25. art. no. 2200425. https://doi.org/10.1002/adem.202200425

5. Dong H.-R., Li X.-Q., Li Y., Wang Y.-H., Wang H.-B., Peng X.-Y., & Li D.-S. A review of electrically assisted heat treatment and forming of aluminum alloy sheet // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. 120. P. 7079–7099. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08996-6

6. Kim M.-J., Yoon S., Park S., Jeong H.-J., Park J.-W., Kim K., Jo J., Heo T., Hong S.-T., Cho S.H., Kwon Y.-K., Choi I.-S., Kim M., & Han H. N. Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials // Applied Materials Today. 2020. 21. art. no. 100874. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874

7. Li X., Zhu Q., Hong Y., Zheng H., Wang J., Wang J., & Zhang Z. Revealing the pulse-induced electroplasticity by decoupling electron wind force // Nature Communications. 2022. 13(1). art. no. 6503. https://doi.org/10.1038/s41467-022-34333-2

8. Abdullina D.U., Bebikhov Yu.V., Tatarinov P.S., Dmitriev S.V. Overview of the latest achievements in the field of electroplastic metal forming // Fundamental Prob-

lems of Materials Science. 2023. 20(4). P. 469–483. (In Russ.). https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006

9. Omoigiade O. Electric current as a steel wire manufacturing tool // Materials Science and Technology. 2018. 34(18). P. 2202–2213. https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1488435

10. Sánchez Egea A.J., González Rojas H.A., Celentano D.J., & Jorba Peiró J. Mechanical and metallurgical changes on 308L wires drawn by electropulses // Materials and Design. 2016. 90. P. 1159–1169. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.067

11. Humphreys F.J. Review Grain and subgrain characterisation by electron backscatter diffraction // Journal of Materials Science. 2001. 36. P. 3833–3854. https://doi.org/10.1023/A:1017973432592

12. Aganin A.A., Ilgamov M.A., Khismatullina N.A. Dependence of the dynamics of the surface layer of a body on the characteristics of its loading upon impact of a liquid jet // Izvestia of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. № 3. P. 5–14. http://journal.ufaras.ru/?p=2144

13. Bryzgalov V.A., Morkina A.Y., Abdullina D.U., Semenov A.S., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Bebikhov Y.V., Kukudzhanov K.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. High-density pulsed current: A review of its role in healing macrocracs in metals // Materials. Technologies. Design. 2024. V. 6. № 2(17). P. 38–58. DOI 10.54708/26587572_2024_621738

14. Dmitriev S.V., Morkina A.Y., Tarov D.V., Khalikova G.R., Abdullina D.U., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Semenov A.S., Naimark O.B., Khokhlov A.V., Stolyarov V.V. Effect of repetitive high-density current pulses on plastic deformation of copper wires under stepwise loading // Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research. 2024. 1(1). P. 27–43. https://doi. org/10.31181/smeor1120243

15. Stolyarov V., Misochenko A. A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials // Materials. 2023. 16 (18). 6270. DOI: 10.3390/ma16186270

16. Dimitrov N.K., Liu Y., Horstemeyer M.F. Electroplasticity: A review of mechanisms in electromechanical coupling of ductile metals // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2022. 29 (5). P. 705–716. DOI: 10.1080/15376494.2020.1789925

17. Izadpanah S., Cao X., An D., Li X., Chen J. One step forward to electrically assisted forming mechanisms and computer simulation: A review // Advanced Engineering Materials. 2023. 25 (5). 2200425. DOI: 10.1002/adem.202200425

18. Dong H.-R., Li X.-Q., Li Y., Wang Y.-H., Wang H.-B., Peng X.-Y., Li D.-S. A review of electrically assisted heat treatment and forming of aluminum alloy sheet // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. 120 (11-12). P. 7079–7099. DOI: 10.1007/s00170-022-08996-6

19. Liu J., Jia D., Fu Y., Kong X., Lv Z., Zeng E., Gao Q. Electroplasticity effects: from mechanism to application // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. 131 (5-6). P. 3267–3286. DOI: 10.1007/s00170-023-12072-y

20. Hao S., Chu Q., Li W., Yang X., Zou Y. Effect of electropulsing treatment on the microstructure and mechanical properties of metallic materials: a review // Cailiao Daobao/Materials Reports. 2023. 37 (4). 21030039. DOI: 10.11896/cldb.21030039

EFFECT OF REPETITIVE HIGH-DENSITY CURRENT PULSES ON PLASTIC DEFORMATION OF COPPER WIRES

© A.Y. Morkin[1], D.V. Tarov[1], D.M. Naumova[2], P.S. Tatarinov[3], V.P. Tatarinov[3], A.S. Semenov[3], I.A. Yakushev[3], S.V. Dmitriev[2]

[1]Ufa University of Science and Technology,
32, ulitsa Zaki Validi, 450076, Ufa, Russian Federation

[2]Institute of Molecule and Crystal Physics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
151, prospect Oktyabrya, 450075, Ufa, Russian Federation

[3]Mirny Polytechnic Institute (branch) Ammosov North-Eastern Federal University,
14, ulitsa Ojunskogo, 678170, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russian Federation

High-density electric current pulses increase the plasticity and reduce the yield strength of metals with negligible heat generation. This effect has great potential for the development of energy-saving processing technologies for hard-to-deform metallic materials. Despite the long history of studying electroplasticity, there is still no consensus on the physical nature of this effect. In this paper, the effect of repetitive pulses applied at the same or gradually increasing tensile stress on the plastic deformation of copper wire is investigated using a homemade experimental setup. The electroplasticity of the wire in the delivery state and after annealing was compared. It is shown that at constant tensile stress, the incremental plastic deformation of the wire decreases with each successive pulse. This effect is stronger for annealed wire because it has a lower dislocation density and hence a lower plasticity resource. Joule heat release in the sample and heating due to plastic deformation are evaluated. The results obtained will be used to fit the parameters of the atomistic model being developed to describe the interaction of electron flow with dislocations.

Keywords: electroplastic effect, creep, current pulses, copper, tensile deformation.