

ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЕ ВОЛОЧЕНИЕ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ОБЛЕГЧЕННЫХ ПРОВОДОВ

О.А. Троицкий, В.И. Сташенко*, В.Г. Рыжков**,
В.П. Ляшенко***, Е.Б. Кобыльская****

**Институт машиноведения им А.А. Благодрава РАН,
НПП «Институт ЭПДМ», Москва, Россия
E-mail: oatroitsky@rambler.ru;*

***Филиал ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова», Белорецк, Россия;*

****Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского,
Кременчуг, Украина; E-mail: leca91@ua.ru*

Рассмотрены результаты экспериментальных и теоретических исследований по выявлению влияния составляющих электропластического эффекта на пластические свойства проволоки. Показаны механизмы действия импульсного тока на формирование структуры металла и снижение его электросопротивления. На основе краевой задачи для уравнения теплопроводности построена математическая модель температурного поля в зоне действия импульсного тока. Проведенные численные эксперименты показали отсутствие существенного повышения температуры и влияния термической составляющей на рост пластичности металла под действием импульсного тока.

ВВЕДЕНИЕ

Электропластическое волочение (ЭПВ) проволоки с применением импульсного или постоянного тока оказывает дополнительное воздействие на свойства деформированного металла. Во время ЭПВ, особенно в случае применения импульсного тока, в зоне деформации металла (ЗДМ) внутри волоки действует открытый в 1968 г. электропластический эффект (ЭПЭ) [1].

При ЭПВ в системе координат, связанной с движущейся проволокой, ЗДМ перемещается как бы навстречу проволоке. Поэтому сама ЗДМ и многочисленные подвижные дефекты внутри нее (дислокации и другие дефекты) могут создавать «электронную подушку» на входе в волоку за счет увлечения ими свободных электронов при своем движении навстречу проволоке. В силу отставания газа свободных электронов от кристаллической решетки металла во время ускорения решетки при переходе внутри ЗДМ с большого на меньший диаметр проволоки возникает известный с 1916 г. электронный инерционный эффект Стюарта-Толмэна. При этом появляется дополнительная подпитка указанной выше «электронной подушки» перед входом проволоки в волоку. Собственное электрическое поле «подушки» и соответствующий электронный потенциал (ЭП) могут повлиять на ЭПВ проволоки. В этих условиях наложение на ЗДМ дополнительного электрического потенциала со стороны внешнего источника постоянного тока (ИПТ) или генератора импульсного тока (ГИТ) с той или иной ориентацией вектора плотности тока J_m относительно ЗДМ может приводить либо к усилению пластифицирующего действия ЭПЭ, либо к снижению его влияния. Возможен даже эффект инверсии, что, однако, маловероятно, если потенциалы ИПТ или ГИТ включены встречно по отношению к ЭП. Вышесказанным можно объяс-

нить не только повышение пластичности металла при ЭПВ, но также снижение эффективности действия тока из-за неумелого применения технологии ЭПВ, а также явление полярности действия тока на процесс ЭПВ [1, 2, 5, 7].

Экспериментально было установлено, что при пропускании тока через ЗДМ происходит уменьшение усилия волочения проволоки (рис. 1). Многократное повторение операции ЭПВ в непрерывном режиме с ориентацией вектора плотности тока J_m в направлении главных деформаций удлинения проволоки при волочении (см. эпюру главных деформаций удлинения на рис. 2) приводит к появлению и формированию в проволоке аксиальной текстуры высокой степени совершенства. Это выражается в повороте зерен металла определенных кристаллографических ориентаций в указанном направлении и придает исходному материалу заданную текстуру, «удобную» для последующей транспортировки большого тока в токопередающих устройствах – проводах и кабелях.

Операция ЭПВ исходной проволоки протекает, как правило, при пониженных деформирующих усилиях в силу действия ЭПЭ [1], повышающего пластичность металла и снижающего его сопротивление деформированию. В зависимости от типа и полярности тока возникает эффект снижения усилий волочения от 10 до 30 % (см. рис. 1). При включениях тока через ЗДМ во время ЭПВ происходят мгновенные изменения усилия волочения в сторону разупрочнения. Результаты исследований, обобщенные в монографии [7], показали, что во время ЭПВ происходит снятие деформационного упрочнения, повышается пластичность проволоки. Это позволило отказаться от операций промежуточных отжигов проволоки при применении технологии ЭПВ.

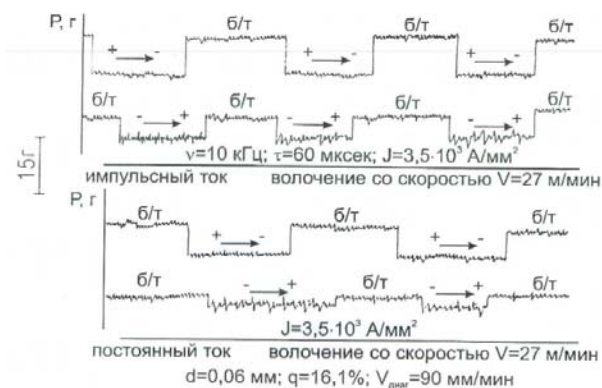


Рис. 1. Характерные диаграммы изменения усилий волочения P при волочении 60 мкм медной проволоки с наложением на зону деформации электрического тока различной полярности и разного вида

Указанный фундаментальный результат переводит ЭПВ в разряд энергосберегающих технологий вследствие снижения потребления электроэнергии приводами станов в связи с уменьшением усилий волочения на 25...30 % при оптимальных режимах ЭПВ. Отметим, что собственные затраты электроэнергии при реализации технологии ЭПВ незначительны в силу малости участка подведения тока к движущейся проволоке в области ЗДМ. Для микропроволоки и проволоки диаметром порядка 0,1 мм получается, что энергозатраты на ЭПВ находятся на уровне потребления электроэнергии лампочкой или электрической плиткой мощностью от 200 Вт до 1 кВт.

В результате ЭПВ уменьшается электрическое сопротивление проволоки, что позволяет рекомендовать эту технологию для применения в производстве проводов и электрокабелей в качестве основной операции для придания заготовкам будущих проводов, токонесущих жил и кабелей главного их свойства и назначения – эффективной и малозатратной транспортировки электрической энергии. В этом смысле технология ЭПВ, создающая с помощью рабочего тока во время волочения более совершенную по сравнению с обычным волочением аксиальную текстуру, закладывает пути для протекания в последующем в металле токонесущих жил кабелей и в линиях электропередач тока большой плотности.

Наконец, из-за увеличения остаточной пластичности и создания умеренно жесткой токопроводящей текстуры внутри проводов кабеля и рабочие провода, изготовленные по технологии ЭПВ, обладают повышенной долговечностью и надежностью в силу увеличения работы разрушения образцов [2].

В работе [8] рассмотрен механизм электропластического эффекта в рамках модели дислокационной струны. Предложены формулы, с помощью которых дано описание зависимости температуры разогрева от плотности тока в режиме адиабатического джоулевого нагрева проволоки, а также построена зависимость электронной и

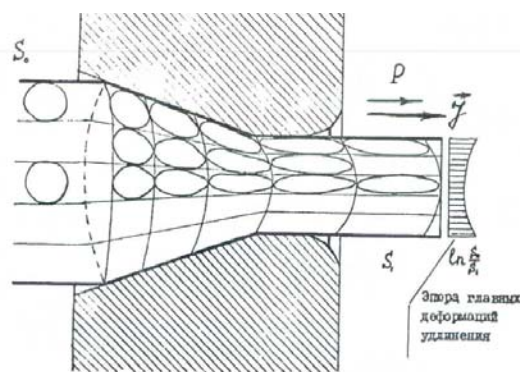


Рис. 2. Формирование совершенной текстуры проволоки во время ЭПВ при совпадении направления вектора плотности тока J_m с направлением движения проволоки

эффективной температуры дислокационных фононов от плотности тока для тонкой пленки.

Целью работы являлось рассмотрение механизмов действия импульсного тока на формирование структуры металла и снижение его электросопротивления, а также на основе решения краевой задачи для уравнения теплопроводности исследование влияния вклада термической составляющей на изменение физических свойств металла.

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследований ЭПВ нами выбирались, как правило, хорошо изученные металлы и сплавы, вместе с тем существенно отличающиеся между собой по физическим свойствам: медная микропроволока марки МТ и проволоки из хромоникелевых сталей с нестабильным аустенитом – 12Х18Н10Т, алюминиевая проволока, а также проволока из трип-стали. Для отделения электропластического действия электрического тока от эффектов термического и вибрационного характера (в случае действия на ЗПД импульсным током) использовались схемы подведения электрического тока к проволоке, изображенные на рис. 3. Схемы *а* и *в* позволяли осуществлять волочение с пропуском электрического тока через участок проволоки, включающий очаг деформации, с применением соответственно твердосплавной и алмазной волюки. По схеме *б* изучалось влияние нагрева проволоки током на процесс ее волочения, а по схеме *г* – влияние вибраций металла вследствие пинч-эффекта [2]. В последнем случае пондеромоторные силы, возникающие за волюкой за счет пинч-эффекта (в результате взаимодействия тока с собственным магнитным полем), вызывали упругие механические колебания проволоки, которые распространялись вдоль нее от места их возникновения за волюкой до ЗДМ. Там они оказывали стимулирующее влияние на пластическую деформацию металла, но уже без электронной компоненты электропластического действия импульсного тока.

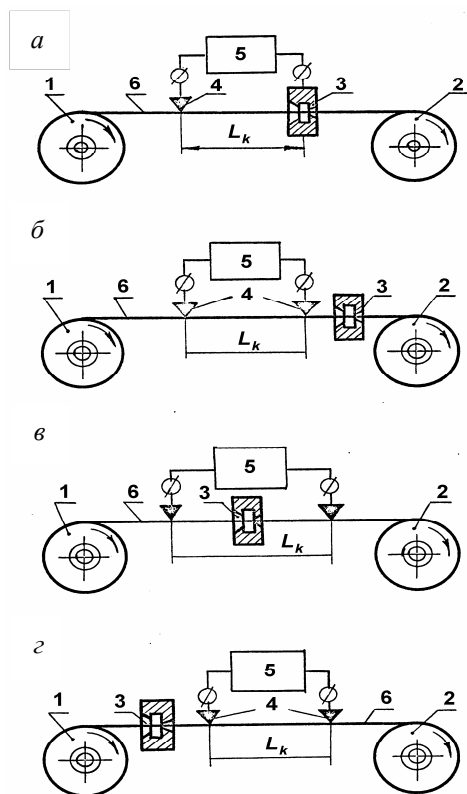


Рис. 3. Схемы подведения электрического тока к движущейся проволоке при волочении

Были разработаны и созданы две экспериментальные установки: первая – для однократного волочения проволоки диаметром 0,5 мм и менее; вторая – для однократного волочения проволоки диаметром 0,2...1,5 мм. Первая установка, выполненная на базе однократной волочильной машины типа F-1 «Кратос» с приводом постоянного тока, включала в себя размоточный узел 1, 2, регулятор противонапряжения, волокодержатель с контактирующими устройствами, систему подачи смазочно-охлаждающей жидкости, прибора для измерения усилий противонапряжения и волочения, а также источники переменного, постоянного и импульсного тока, пульт управления и контрольно-измерительную аппаратуру 3-6. Вторая установка – это однократный волочильный стан ПТ-1 типа 1/160,250 (рис. 4,в). Он включает в себя источник постоянного тока, размоточное устройство с регулируемым подтормаживанием, волокодержатель с контактирующим устройством, систему циркуляции смазочно-охлаждающей жидкости, пульт дистанционного управления с контрольно-измерительной аппаратурой.

Подведение электрического тока к проволоке во время волочения осуществлялось роликовыми и щеточными контактами. Параметры импульсных генераторов выбирались с учетом деформационных параметров процесса волочения с условием, чтобы каждый участок проволоки, проходящий очаг деформации, обрабатывался хотя бы одним импульсом тока.

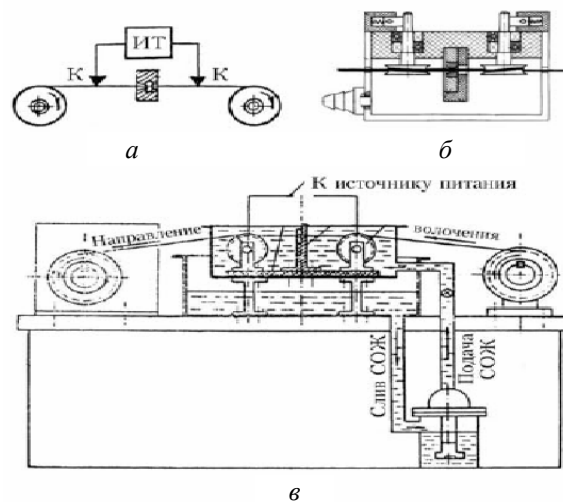


Рис. 4. Стан ЭПВ проволоки:

а – схема подведения тока; б – узел токопровода; в – схема стана (СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость; ИТ – источник тока; К – контакт)

Частота следования импульсов и их скважность определялась на основе следующих соотношений:

$$F = k_F \frac{v}{l_d}, \quad v = (F t_i)^{-1};$$

амплитудная плотность тока и падение напряжения в зоне действия тока – на основе соотношений $J_m = J \frac{\sqrt{v}}{k_F}$, $U_m = J_m \rho l$, где F – частота следования импульсов, кГц; v – скорость волочения, м/с; k_F – коэффициент, зависящий от степени обжатия ($k_F = 1,5...3$); l_d – длина зоны деформации, мм; v – скважность импульсного процесса; t_i – длительность импульсов тока, мс; J и J_m – соответственно средняя действующая и амплитудная плотности тока, А/мм²; l – протяженность зоны действия тока или расстояние между контактами (база), м; k_F – коэффициент формы импульсов; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м. На основе этих соотношений были разработаны и сконструированы два импульсных генератора, которые использовались в большей части проведенных экспериментов. Эффективность действия тока на процесс волочения проволоки оценивалась по относительному уменьшению напряжения (силы) волочения λ_z , которое рассчитывалось по формуле

$$\lambda_z = \frac{\sigma_z - \sigma_z^T}{\sigma_z} 100\% = \frac{P_z - P_z^T}{P_z} 100\%,$$

где σ_z, P_z – соответственно напряжение и сила волочения при обычном волочении (без тока) за вычетом составляющей, создаваемой противонапряжением проволоки; σ_z^T, P_z^T – то же для случая волочения с током.

Проводились первичные освидетельствования металла проволоки. Измерялись с использованием стандартных методик следующие физико-механические свойства: временное сопротивление (σ_B), условный предел текучести (σ_T), полное относительное удлинение (σ_{100}), удельное электросопротивление проволоки (с помощью моста МОД-61). Измеренные величины соответствовали приведенным в [7]. Методом полюсных фигур и другими рентгенографическими методами была определена тонкая структура проволоки и параметры текстуры. В частности, фазовый состав стальной проволоки после ЭПВ и обычного волочения определяли путем сопоставления интегральных интенсивностей линий (110) α -фазы и (111) γ -фазы, а дисперсность структурных составляющих – по уширению указанных линий.

Для выяснения влияния термической составляющей действия импульсного тока на ЭПД была построена математическая модель температурного поля в зоне подведения тока. В основу этой модели положена краевая задача для уравнения теплопроводности движущейся асимметричной среды с постоянными теплофизическими характеристиками.

В наиболее полной постановке, когда импульсный источник тепла, вызванный действием импульсного тока, является функцией температуры и координат, температурное поле в цилиндрической системе координат может быть описано с помощью краевой задачи для уравнения теплопроводности $\Omega = \{0 < z < l, 0 < r < r_0, 0 < t < t_0\}$ [4]:

$$\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \nu c \rho_n \frac{\partial T}{\partial z} - c \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = -W(z, t, T), (r, z) \in \Omega; \quad (1)$$

$$T(r, z, 0) = T_0, (z, r) \in \Omega; \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = f_{12} [\alpha(T_c - T) - \varepsilon \sigma (T_c^4 - T^4)]; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l} = f_{12} [\alpha(T - T_c) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4)],$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = f_{12} [-\alpha(T)(T - T_c) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4)], \quad (4)$$

где λ, α – коэффициенты теплопроводности и конвективной теплоотдачи с поверхности; положительно определенные функции: $\varepsilon, \sigma, c, \rho_n$ – степень черноты, постоянная Стефана-Больцмана, удельная теплоемкость и плотность; r_0 – радиус проволоки. Функция $W(z, t, T)$ в случае зависимости источников тепла от координаты и времени имеет вид:

$$W(z, t, T) = f_{11}(z) f_2(T), \quad (5)$$

$$W(z, t, T) = f_{12}(t) f_2(T). \quad (6)$$

Функции $f_{1i}(z, t)$ в зависимости от физических особенностей процесса могут иметь вид:

$$f_{11}(z) = \begin{cases} m \frac{z}{l_0} - mn, nl_0 \leq z \leq \left(n + \frac{1}{m}\right) l_0 \\ 0, \left(n + \frac{1}{m}\right) l_0 \leq z \leq (n+1) l_0, z < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$f_{12}(t) = \begin{cases} m \frac{t}{t_0} - mn, nt_0 \leq t \leq \left(n + \frac{1}{m}\right) t_0 \\ 0, \left(n + \frac{1}{m}\right) t_0 \leq t \leq (n+1) t_0, t < 0 \end{cases}.$$

Величины m, n, l_0, t_0 характеризуют длительность и частоту следования импульсов. Решение задачи (1)–(4) найдено численным методом. Была построена неявная разностная схема [6]. Математическая модель в виде задачи (1)–(4) позволяет исследовать на макроуровне тепловые процессы, протекающие в движущейся проволоке под действием импульсного источника тепла.

На рис. 5 изображены температурные распределения для меди (кривые 1, 3) и стали (кривые 2, 4). Проведенные численные эксперименты расчетов температурного поля показали, что импульсное действие тока не дает существенного увеличения температуры. На графике ординаты кривых 3, 4 расположены существенно ниже – 1, 2. Эти результаты хорошо согласуются с натурными экспериментами [7].

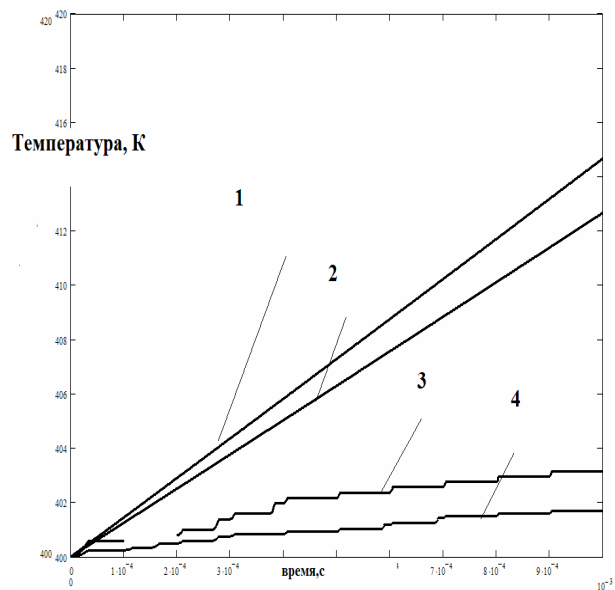


Рис. 5. Температурное распределение в зоне действия импульсного и постоянного тока в зависимости от времени. Кривые 1 и 2 соответствуют непрерывному действию электрического тока, а кривые 3 и 4 – импульсному

Численные эксперименты проводились для стальной и медной проволоки, ЭПВ которых происходило по режимам, рассмотренным выше. В расчетах рассмотрен следующий режим подведения импульсного тока: амплитуда тока $I_m = 10 \text{ А/мм}^2$; частота следования импульсов $f = 600 \dots 700 \text{ Гц}$ и длительность импульсов $\tau = 100 \text{ мкс}$.

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТЕПЕНИ СОВЕРШЕНСТВА ТЕКСТУРЫ ПРОВОЛОКИ

Изучалось уменьшение напряжения волочения медной микропроволоки диаметром 60 мкм (λ_z) в зависимости от плотности постоянного и импульсного тока различной полярности и частоты следования (F), а также от величины единичного обжатия при волочении (см. рис. 3,в). Результаты измерений изображены на рис. 6. Как видно, имеет место ярко выраженная зависимость величины λ_z от вида, направления тока (см. рис. 6, а, в) и от частоты повторения импульсов (см. рис. 6,б). Импульсный ток более эффективен, чем постоянный (см. рис. 6,а). При изучении зависимости от частоты следования импульсов $\lambda_z(F)$ (см. рис. 6,б) амплитудная плотность тока и скважность импульсного процесса сохранялись постоянными, что обеспечивало эквивалентную температуру нагрева проволоки. Изменения пластичности и физических свойств проволоки после ЭПВ не могут быть объяснены тепловым действием тока, так как исходя из численных расчетов температура в зоне действия импульсного тока поднималась незначительно.

Количественный вклад возможных механизмов влияния электрического тока на процесс ЭПВ медной проволоки изучался путем подведения тока по различным схемам, изображенным на рис. 3. Расстояние между токоподводящими контактами и параметры источников джоулевого тепла приведены в таблице. Анализ этих данных показывает, что нетермические силовые механизмы действия тока – пондеромоторные силы импульсного тока или пинч-эффект [2] и особенно электронно-пластический эффект (ЭПЭ) [1] – оказывают существенное влияние на уменьшение напряжений волочения при ЭПВ.

Из данных таблицы видно, что импульсный ток, пропускаемый после волоки по схеме рис. 3,г, оказывает более заметное действие на усилие волочения, чем постоянный ток, что в принципе невозможно объяснить термическим действием тока. Можно предположить, что влияние полярности тока на силовые параметры процесса ЭПВ связано с существованием в зоне деформации медной проволоки собственного электрического поля, вызванного быстрой деформацией металла в результате оттеснения дислокациями свободных электронов в область перед ЗДМ, а также образованием «электронной подушки» перед входом проволоки в волоку. Это предположение нуждается в подтверждении в ходе дальнейших специальных исследований процесса ЭПВ.

Графики изменения усилия волочения (см. рис. 1) свидетельствуют о том, что изменения полярности действия импульсного, а также постоянного тока не связаны с тепловым действием тока. Из рис. 5 (кривые 3, 4) видно, что температура поднимается незначительно.

Влияние постоянного (П) и импульсного (И) электрических токов с эффективной плотностью

1280 А/мм² на уменьшение напряжения волочения медной проволоки при различных схемах (см. рис. 3) подведения тока (переход 0,15...0,14 мм) представлено в таблице.

Расстояние между контактами, мм	Величина λ_z , %				
	Схема рис. 3,б		Схема рис. 3,в		Схема рис.3,г
	Пост. ток	Имп. ток	Пост. ток	Имп. ток	Имп. ток
20	2,9	3,0	5,9	10,3	1,5
40	-	-	5,9	11,0	2,2
80	3,7	4,4	6,6	11,8	3,0
120	4,4	5,0	6,0	12,5	3,8
140	5,2	6,0	5,9	13,2	4,4

Проводилось сравнение текстуры медной проволоки после волочения по традиционной технологии и ЭПВ. Практически во всех случаях после ЭПВ медной проволоки возникает более совершенная аксиальная текстура [2]. Ось текстуры, как правило, совпадает с направлением волочения. На линиях {111} и {200} присутствуют симметрично расположенные кольца максимумов текстурного рассеяния. На {111} фиксируются четыре максимума с $\delta_{cp} = 68,8^\circ$, и на линии {111} фиксируются четыре максимума с $\delta_{cp} = 50,8^\circ$. Кроме того, на указанных линиях присутствуют еще четыре более слабых и размытых, но симметричных максимума. Текстура возникает также на линиях {100}. Существует и набор ориентировок между {111} и {100} – сплошное кольцо между текстурными максимумами со следующими распределениями по полярности тока:

I {111} / I {100}
 «плюс» к волоке.....0,52
 «минус» к волоке.....3,26
 без тока.....1,43...1,61

Такая текстура, по нашему мнению, способствует повышению пластичности и снижению электросопротивления металла.

Было установлено, что при подведении постоянного тока направлением «плюс» к волоке происходит уменьшение усилия волочения на 25...30 % и повышение пластичности проволоки, включая остаточную пластичность (см. рис. 1). Одновременно отмечено увеличение области когерентного рассеяния (ОКР) рентгеновских лучей в пределах 1500...2000 Å соответственно направлениям «минус» и «плюс» к волоке (ОКР для проволоки, проходившей обычное волочение без тока, была на уровне 800...1000 Å).

Кроме того, происходит перераспределение других текстурных максимумов, а именно, для I {200} / I {111} и I {220} / I {111} соответственно от 1,03 до 1,07 и от 0,78 до 0,92 с переходом от «минуса» к «плюсу» к волоке (после обычного волочения соответственно 0,90...0,92 и 0,77...0,80).

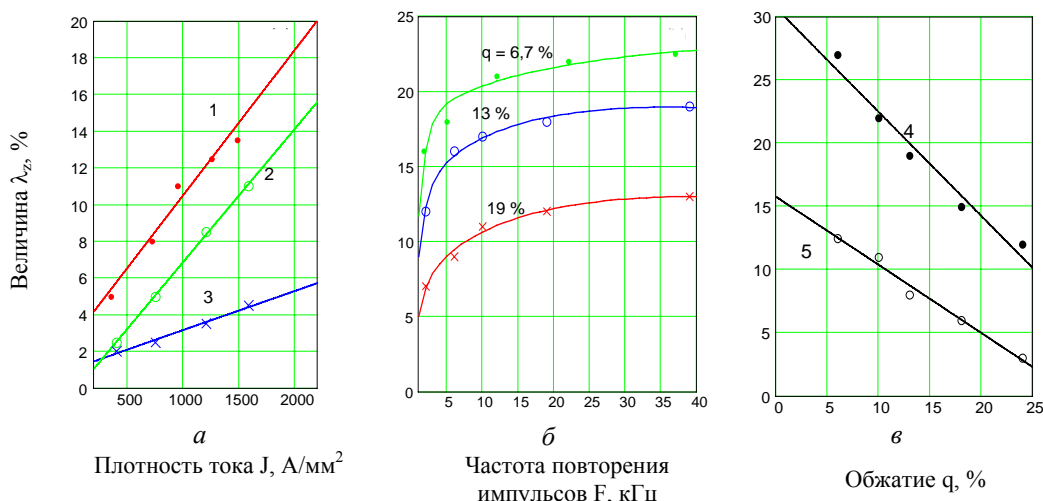


Рис. 6. Зависимость величины λ_z при волочении медной микроволокны от технологических параметров: 1 – импульсный ток, полярность к волоке (+); 2, 3 – постоянный ток, полярность (+) и (-) к волоке соответственно; 4, 5 – импульсный ток 2500 А/мм², полярность (+) и (-) к волоке соответственно

После ЭПВ, по сравнению с обычным волочением, наблюдалось также увеличение расщепления K_α – дублета, что может быть объяснено уменьшением числа хаотически распределенных дислокаций [2,7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При волочении с током медной проволоки марки М1 повышается степень совершенства ее аксиальной текстуры на линиях {111} и {200}. Уменьшается число хаотически распределенных дислокаций. Электрическое сопротивление проволоки уменьшается на 8...12 %, а остаточная пластичность повышается на 25...30 %. Это наряду с некоторым увеличением ее прочности открывает перспективу получения по технологии ЭПВ прочных и легких проводов и кабелей.

Волочение медной проволоки с током сопровождается уменьшением усилий волочения на 25...30 % (см. рис. 1). Предполагается, что наблюдаемый эффект обусловлен пластифицирующим влиянием ЭПЭ в объеме проволоки и облегчением процесса образования аксиальной текстуры, а также снижением трения в волоке за счет измельчения зерен в приповерхностных областях проволоки, наноструктурированием и, возможно, аморфизацией поверхностного слоя. Последнее предположение требует дополнительного экспериментального подтверждения.

Необходимо отметить, что при скоростном волочении медной проволоки (более 10 м/с) возникает и инерционный эффект Стюарта-Толмэна – отставание газа свободных электронов от кристаллической решетки, получающей ускорение в ЗДМ внутри волоки в связи с переходом на меньший диаметр. По своей электронной природе эффект Стюарта-Толмэна дополняет ЭПЭ, способствуя аксиальному текстурированию проволоки, повышая степень совершенства текстуры проволоки и снижая обрывность медной проволоки во время волочения. Этим эффектом, а также электрон-деформационным эффектом (ЭДЭ)

[7] оттеснения свободных электронов дислокациями и другими подвижными дефектами, включая саму ЗДМ, создаются «электронные подушки» перед волокой. Указанные подвижные дефекты и сама ЗДМ движутся в системе координат, связанной с проволокой, навстречу ей. В этой ситуации возникающие в динамическом режиме «электронные подушки» служат своеобразной электронной смазкой материала проволоки при ее скоростном волочении. Смещение указанных «электронных подушек» внутрь ЗДМ под влиянием специально ориентированного электрического поля и соответствующей направленности вектора плотности тока J_m во время ЭПВ может создавать и обеспечивать при производстве проволоки благоприятные условия как для наноструктурирования и аморфизации поверхностного слоя проволоки, что полезно с точки зрения снижения сил трения в волоке, так и для текстурирования материала в объеме проволоки с точки зрения создания транспортных путей для будущего рабочего тока в проводах и кабелях при их последующей эксплуатации.

В результате ЭПВ проволоки из нержавеющей стали происходит уменьшение содержания мартенситной α -фазы (на десятки процентов) по сравнению с обычным волочением без тока. Отпадает также необходимость в проведении операций промежуточных аустенизирующих отжигов проволоки. Оставшаяся в небольшом количестве (6...8 %) α -фаза образует рубашку на поверхности проволоки толщиной в несколько микрометров, что показано нами мессбауэровским методом [7].

После ЭПВ стальной проволоки также фиксируется более совершенная аксиальная текстура проволоки в направлениях [211]. Уменьшается электрическое сопротивление проволоки на 18...20 % по сравнению с теплым волочением и на 26...30 % по сравнению с холодным волочением без тока. Остаточная пластичность проволоки, напротив, увеличивается

на 25...30 %. Предел прочности уменьшается на 15...20 %, что можно, однако, компенсировать протяжками проволоки на последних переходах без тока. Полученные результаты по стальной проволоке предполагается использовать для создания проводов воздушных линий электропередач с целью уменьшения потерь электроэнергии и повышения прочности стальных проводов, покрытых медью.

Энергосберегающая технология ЭПВ проволок исходных материалов может стать составной частью промышленной технологии создания специально текстурированных проводов и токопроводящих жил, из которых могут составляться и производиться облегченные электрические кабели для аэрокосмической области и для других областей техники. В случае применения ЭПВ появляется возможность при сохранении общей токонесущей способности кабелей уменьшать число входящих в них жил, общее сечение и вес кабелей при увеличении их удельной прочности. Все вышесказанное касается также и линий высоковольтных электропередач, где для снятия внутренних напряжений и остаточных деформаций практикуется пропускание мощных импульсов тока через предварительно подвешенные провода перед окончательным закреплением проводов на опорах.

В случае волочения тонкой проволоки диаметром менее 100 мкм технология ЭПВ может служить единственным методом косвенного контроля температуры движущейся проволоки в зоне подведения как импульсного, так и постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Спицын, О.А. Троицкий. *Электропластическая деформация металлов*. М.: «Наука», 1985, с. 160.
2. В.И. Спицын, О.А. Троицкий, В.Г. Рыжков, А.С. Козырев. Однофильерное электропластическое волочение медных проволок // *ДАН СССР*. 1976, т. 231, №2, с. 402–404.
3. О.А. Троицкий, А.А. Кайзер, Р.Р. Лайшев, В.С. Горелик. Использование электроимпульсных технологий в практике ювелирного дела // *Сб. научн. трудов и инженерных разработок 5-й Российской выставки «Изделия и технологии двойного назначения. Конверсия ОПК»*. М., 2004, т. 2, с. 364–367.
4. О.Б. Кобильська, В.П. Ляшенко. Дослідження температурних розподілів рухомого середовища з імпульсними джерелами тепла // *Вісник Харківського національного університету. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2010, № 890, в.1 3, с. 115–120.
5. О.А. Троицкий, В.М. Моисеенко, В.И. Спицын, В.П. Ляшенко и др. Электропластическая деформация вольфрама // *ДАН СССР*. 1987, т. 295, №5, с. 251–255.
6. А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. *Вычислительная теплопередача*. М.: Едиториал УРСС, 2003, с. 784.
7. О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов и др. *Физические основы и технологии обработки современных материалов*. Ижевск: Изд-во ИКИ, 2004, т. 1. с. 590.
8. В.И. Дубинко, В.И. Карась, В.Ф. Клепиков, П.Н. Остапчук, И.Ф. Потапенко. Моделирование повышения пластичности материалов под действием импульсов электрического тока // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2009, №4-2, с. 158–166.

Статья поступила в редакцию 06.06.2011 г.

ЕЛЕКТРОПЛАСТИЧНЕ ВОЛОЧІННЯ ТА НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ПОЛЕГШЕНИХ ДРОТІВ

О.А. Тройцький, В.І. Стащенко, В.Г. Рижков, В.П. Ляшенко, О.Б. Кобильська

Розглянуто результати експериментальних та теоретичних досліджень по виявленню впливу складових електропластичного ефекту на пластичні властивості дроту. Показані механізми дії імпульсного струму на формування структури металу і зниження його електроопору. На основі крайової задачі для рівняння теплопровідності побудована математична модель температурного поля у зоні дії імпульсного струму. Проведені чисельні експерименти показали, що температура у зоні дії імпульсного струму підвищується несуттєво і не впливає на зростання пластичності металу.

ELECTROPLASTIC WIRE DRAWING AND NEW TECHNOLOGY DEVELOPMENT LIGHT WIRE

O.A. Troitsky, V.I. Stashenko, V.G. Ryzhkov, V.P. Lyashenko, E.B. Kobilskaya

The results of experimental and theoretical research on the impact of components electroplastic effect on the plastic properties of the wire. The mechanism of action of pulse current on the structure of the metal and reduce its electrical resistance. On the basis of the boundary problem for the heat equation, a mathematical model of temperature field in the zone of pulsed current. The numerical experiments showed no significant increase in temperature and the influence of the thermal component of the growth plasticity of the metal by a pulsed current.