

УДК 539.2

В.С. Савенко, С.Д. Шаврей

ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДИФИКАЦИЯ АЛЮМИНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

В статье представлены результаты явления электропластичности деформационного алюминия. Показано изменения числа перегибов n , временного сопротивления G и удельного сопротивления ρ от истинного сужения L_i , а также параметры кристаллической решетки, размеры блоков и микроискажения в образцах алюминия, деформированного при различных значениях плотности и полярности действия тока. Показано, что наложение импульсного тока на зону деформации во время электропластического волочения приводит к изменению деформационных процессов и, как следствие, влияет на механические характеристики алюминиевой проволоки после деформации, что приводит к улучшению служебных характеристик изделия, сокращению энергетических затрат в технологическом процессе.

Обработка металлов давлением имеет широкое применение в промышленности и основана на использовании характерного для металлов свойства пластичности. Пластичность материала является одной из важнейших характеристик при изготовлении проволок из меди, алюминия, вольфрама. Высокие внутренние напряжения и локализация пластической деформации являются основными причинами обрыва проволоки при ее изготовлении или в процессе эксплуатации. Для улучшения служебных характеристик, соответствующих ГОСТу, получения энергетически равновесной внутренней структуры с минимальными внутренними напряжениями традиционно используют отжиг, который требует больших энергетических и временных затрат, усложнения технологического процесса. Для интенсификации технологических процессов и устранения неоднородности пластической деформации при обработке металлов давлением используют явление электропластичности, которое возникает при наложении на зону деформации импульса тока большой плотности ($\sim 10^3$ А/мм²) и малой продолжительности ($\sim 10^{-4}$ с). Действие тока в этом случае не вызывает существенного нагрева металла и поэтому принципиально отличается от джоулевого эффекта, лежащего в основе электроконтактного нагрева. Изменение пластических свойств металла в этом случае происходит без заметных изменений его прочности [1; 2]. Взаимодействие деформируемого металла с электрическим током большой плотности приводит к снижению сопротивления металла деформированию и меняет его служебные характеристики.

Достаточно полно изучены и широко внедрены процессы электропластической деформации при обработке металлов давлением для волочения медной и стальной проволоки [3], а также проволок из других технически важных металлов [4]. Изучение электромеханических характеристик алюминиевой проволоки в условиях электропластического волочения начаты недавно [5; 6].

Внешние энергетические воздействия в условиях деформации существенно стимулируют электродинамические процессы электронно-дислокационного взаимодействия, что приводит к срыву скоплений дислокаций со стопоров и других препятствий, увеличению их скорости и как следствие реализации электропластической деформации. При электропластическом волочении металлических проволок было установлено наличие влияния электрического тока на их механические и физические характеристики, причем для тока разной полярности это влияние различно. В случае многократного волочения происходит накопление электропластического действия тока после каждого перехода [3–6].

Представляет научный и практический интерес исследовать влияние многократ-

ного электропластического волочения алюминиевой проволоки на ее свойства после такой обработки. При этом важной целью является определение возможности улучшения физико-механических характеристик изделия и упрощения изготовления алюминиевой проволоки путем замены обычного волочения на электропластическое с исключением из технологического процесса операций отжига, на который требуется большие временные и энергетические затраты.

В работе представлены результаты исследования структуры и электромеханических характеристик алюминиевой катанки марки АКЛП-5 ПТ с максимальным сечением 196 мм^2 ($d=14 \text{ мм}$), которая подвергалась электропластическому волочению на волочильном станке СМВ-1-9М4. В процессе волочения осуществлялся подвод импульсного тока к алюминиевой проволоке для каждой волоки, установленной на волочильном стане, согласно технологического маршрута волочения (максимальное количество волок – 9). Импульсы тока подавались генератором мощностью $P=70 \text{ кВт}$. Электрическое сопротивление каждого контактного узла электропластического волочения (ЭПВ) при натянутой алюминиевой проволоке не превышало значения $R=0,005 \text{ Ом}$.

Применялись следующие режимы волочения: 1 – обычное волочение без подвода тока; 2 – электропластическое волочение с импульсным током до $j=1000 \text{ А/мм}^2$, который пропусклся через зону деформации, при полярности плюс источника тока до зоны деформации; 3 – тоже с полярностью минус источника тока до зоны деформации.

Структурные исследования проводились на приборе «Пост микроконтроля МК-3 (на базе микроскопа МИ-1) с использованием программ Autoscan Object (программа выделения и анализа объектов на растровых изображениях) и Autoscan Areas (программа выделения и анализа площадей на растровых изображениях). Образцы проходили специальное химическое травление. Рентгеноструктурные исследования проводились дифрактометром ДРОН-УМ-1 на кобальтовом излучении (трубка БСВ-23).

Электрическое сопротивление метровых образцов проволок измерялось по мостовой компенсационной схеме на УПИП-60М, а удельное электросопротивление рассчитывалось по усредненному диаметру проволоки. Механические свойства – разрывное усилие и относительное удлинение измерялись на разрывной машине РМУ – 0,05 с точностью 1% (относительное удлинение определялось на базе 200 мм).

При волочении проволоки, одним из видов пластической деформации металлов, в очаге деформации – волоке – происходит генерирование дефектов в металл со скоростью деформации, связанной со скоростью волочения и степенью деформации проволоки в волоке. В зависимости от полярности тока электроны движутся в направлении деформации или в противоположенную сторону. В случае совпадения направления движения электронов с составляющей деформации (режим 3) электроны способствуют движению дефектов в том же направлении. В противоположном случае (режим 2) электроны затормаживают движение дефектов, или действуют только термически.

Исследования по параметру длина зерна (рисунок 1) показали, что наибольшему деформационному влиянию подвержены образцы с направлением тока от плюса к минусу.

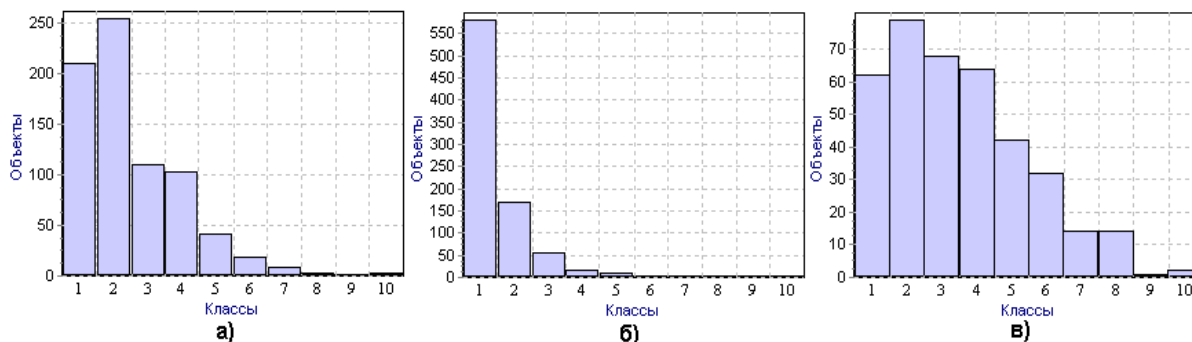


Рисунок 1 – Гистограммы распределения зерен по длине:
а) без тока; б) с током от плюса к минусу; в) с током от минуса к плюсу

Расчеты по параметру минимальный радиус зерна (рисунок 2) показали что, наиболее мелкозернистую структуру имеют образцы с направлением тока от плюса к минусу.

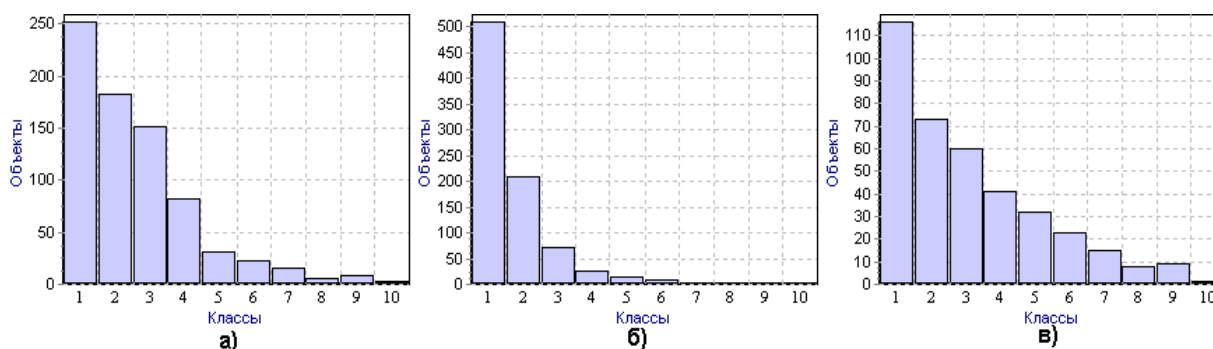


Рисунок 2 – Гистограммы распределения зерен по минимальному радиусу:
а) без тока; б) с током от плюса к минусу; в) с током от минуса к плюсу

По мере нарастания деформации происходит дробление зерен с уменьшением фрагментации, также увеличивается разориентация зерен, формируются размытые текстурные максимумы, характерные для мелких зерен и блоков. Импульс электрического тока, проходящий через деформационное поле проволоки во время волочения, приводит к повышению пластичности исследуемых образцов, зерна в большей степени деформируются и приобретают неравноосную форму. Деформированные зерна располагаются своим минимальным сечением параллельно плоскости шлифа. При этом растет степень совершенства аксиальной текстуры алюминиевой проволоки.

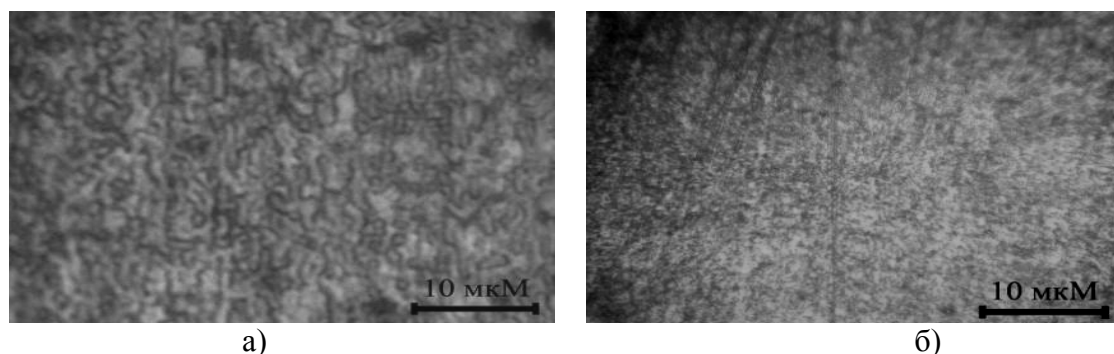
Таким образом, электропластическая деформация изменяет внутреннюю структуру деформируемых материалов. По результатам рентгеноструктурных исследований можно сделать вывод, что деформация в режиме электропластического волочения дает более равновесную структуру, чем обычное волочение. При деформации полярностью плюс источника тока до зоны деформации происходит более существенное измельчение структуры, и деформация осуществляется при больших микроискажениях.

Микроискажения в поперечных шлифах проволок, протянутых при направлении тока от плюса к минусу составляют $0,74 \cdot 10^{-4}$, при направлении тока от минуса к плюсу $1,34 \cdot 10^{-4}$, деформация проволок по режиму от плюса к минусу дает меньшее искажение в проволоке, чем при направлении тока от минуса к плюсу, что хорошо согласуется с теоретическими представлениями теории электропластичности.

Размеры областей когерентного рассеяния максимальны у образцов, деформированных при токе от минуса к плюсу, минимальны при деформации от плюса к минусу,

при отсутствии тока имеют промежуточные значения. Таким образом, можно сделать вывод, что деформация по режиму от минуса к плюсу дает более равновесную структуру, чем деформация без тока, деформация по режиму от плюса к минусу – наиболее искаженную структуру.

На микрофотографиях приведены изображения продольных шлифов образцов алюминиевой проволоки (рисунок 3), прошедшей обычное волочение (а) и электропластическое волочение с током полярностью плюс источника тока до зоны деформации (б). Из анализа фотографий видно, что под влиянием тока большой плотности происходит измельчение микроструктуры шлифа. Размеры зерен алюминиевой проволоки деформированной без тока на много больше, чем с током, что свидетельствует о достаточно высоком уровне остаточных напряжений. Показано, что измельчения зерен тем выше, чем больше плотность тока.



а) без тока; б) с импульсом тока 1000 А/мм^2 , длительностью 10^{-4} с .

Рисунок 3 – Микроструктура деформированной волочением алюминиевой проволоки

Важной механической характеристикой при волочении является истинное сужение $L_i = d_0/d_n$, где d_0 – начальный диаметр проволоки, d_n – диаметр проволоки после перегиба. Зависимость числа перегибов n и временного сопротивления G от истинного сужения представлены на рисунке 4. Изучение зависимости числа перегибов n от истинного сужения показало, что наложение импульсного тока на зону деформации во время электропластического волочения деформационного алюминия приводит к увеличению числа перегибов. С ростом глубины проработки током материала, т.е. с уменьшением диаметра проволоки, эффект возрастает и наиболее выражен при полярности плюс источника тока до зоны деформации.

Этот вывод подтверждает и зависимость временного сопротивления G от истинного сужения L_i . Как видно из анализа графиков, при электропластической деформации на последнем этапе волочения L_i более чем в 2 раза меньше чем без тока.

Таким образом, наложение импульсного тока на зону деформации во время электропластического волочения приводит к изменению деформационных процессов и, как следствие, влияет на механические характеристики алюминиевой проволоки после деформации.

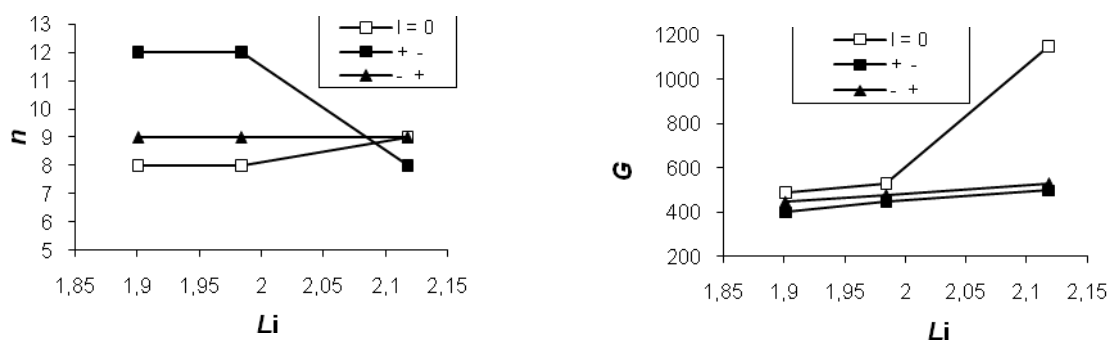


Рисунок 4 – Зависимость числа перегибов n и временного сопротивления G от истинного сужения L_i

Кроме этого, в сторону улучшения меняются и физические характеристики, например, уменьшается удельное сопротивление (рисунок 5). Эффект растет с увеличением суммарной степени деформации алюминиевой проволоки. Снижение удельного электрического сопротивления после многократного электропластического волочения имеет важное практическое значение, в производстве кабелей различной номенклатуры, так как это приводит к снижению рассеиваемой мощности сигнала, передаваемой по кабелю. Использование электротехнических кабелей меньшего сечения с улучшенными служебными характеристиками существенно снижает металлоемкость изделия.

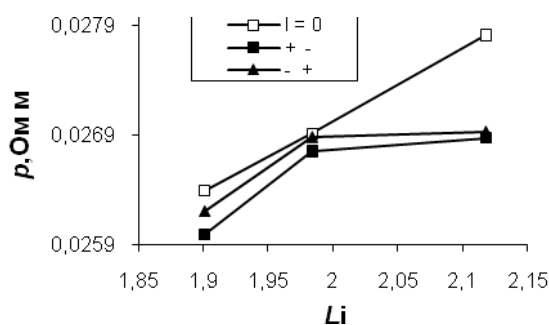


Рисунок 5 – Зависимость удельного сопротивления ρ от истинного сужения L_i

Изменение внутренней структуры материала после электропластической деформации влияет на физико-механические характеристики изделия. Увеличивается относительное удлинение, число перегибов, незначительно падает временное сопротивление. Электропластическое волочение приводит к уменьшению удельного сопротивления, что открывает определенные возможности в упрощении процесса изготовления алюминиевой проволоки с улучшенными служебными характеристиками путем замены обычного волочения электропластическим с исключением из технологического цикла операций энергозатратного отжига. Кроме этого, предложенная технология волочения по сравнению с обычной снижает усилия деформации. Этот эффект не только приводит к снижению энергетических затрат, но и повышает ресурс стана, в том числе износостойкость деформационных деталей волок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спицын, В.И. Электропластическая деформация металлов. // В.И. Спицын, О.А. Троицкий. – М. : Наука, 1985. – 160 с.
2. Баранов, Ю.В. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы // Ю.В. Баранов [и др.] – М. : МГИУ, 2001. – 844 с.
3. Савенко, В.С. Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий / В.С. Савенко. – Минск : БГУ, 2003. – 200 с.
4. Савенко, В.С. Преимущества электропластической прокатки (ЭПП) и электропластического волочения (ЭПВ) золота серебра меди и стали, а также вольфрама, молибдена и ниобия / В.С. Савенко [и др.] // Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов : мат. междунар. науч.-практ. конф. – М. : ИМАШ РАН, 2006.
5. Savenko, V.S. Influence of electroplastic deformation on physicomachanical characteristics of deformation aluminum // First Russia-China Joint Symposium on the electroplasticity effect in metals Shenzhen, China, May 31 – June 4, 2007. – S. 218.
6. Савенко, В.С. Влияние электропластического волочения на физико-механические характеристики деформационного алюминия / В.С. Савенко, О.А. Троицкий // XVII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 90-летию со дня рождения проф. А.Н. Орлова : тез. докл. междунар. науч.-технич. конф. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – 2007. – С. 64. СПб.

V.S. Savenko, S.D. Shavrey. Aluminum Deformation Modification under Pulsed Electric Current

Processing of metals by pressure has wide application in industry and is based on use characteristic for metals property of plasticity. Plasticity of material is one of the major characteristics at manufacturing wires from copper, aluminum, tungsten.

Рукапіс паступіў у рэдкалегію 19.09.2012