

Авторы благодарны за финансовую поддержку РФФИ и БРФФИ (гранты 04-02-81058, 05-08-50341 и Т06М-227), ГКПНИ «Нанотех» (задание 3.15), а также Совету по грантам Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-8269.2006.2).

### Список литературы

1. Murray S.J. et al. 6% magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni-Mn-Ga. // *Appl. Phys. Lett.* V. 77, N 6. 2000. P. 886 – 888.
2. Васильев А.Н., Бучельников В.Д., Такаги Т., Ховайло В.В., Эстрин Э.И. Ферромагнетики с памятью формы. // *УФН.* Т. 173, №6. 2003. С. 577-608.
3. Worgull J., Petti E., Trivisonno J. Behavior of the elastic properties near an intermediate phase transition in Ni<sub>2</sub>MnGa. // *Phys. Rev. B.* V. 54, N. 22. 1996. P. 15695 – 15699.
4. Stenger T.E., Trivisonno J. Ultrasonic study of the two-step martensitic phase transformation in Ni<sub>2</sub>MnGa. // *Phys. Rev. B.* V. 57, N 5. 1998. P. 2735 – 2744.
5. Gonza'lez-Comas A. et al. Premartensitic and martensitic phase transitions in ferromagnetic Ni<sub>2</sub>MnGa. *Phys. Rev. B.* V. 60, N 10. 1999. P. 7085 – 7090.
6. Suzuki M., Ohtsuka M. et al. Fabrication and characterization of sputtered Ni<sub>2</sub>MnGa thin films. // *Mater. Trans. JIM.* V. 40, N10. 1999. P. 1174 – 1177.
7. Dong J. W. et al. Molecular beam epitaxy growth of ferromagnetic single crystal (001) Ni<sub>2</sub>MnGa on (001) GaAs. // *Appl. Phys. Lett.* V. 77, N 10. 1999. P. 1443 – 1445.
8. Pan Qi, Dong J. W. et al. Magnetic domain observations of freestanding single crystal patterned Ni<sub>2</sub>MnGa films. // *Journ. of Appl. Phys.* V. 91, N 10. 2002. P. 7812 – 7814.
9. Tello P.G., Castaño F.J. et al. Ni-Mn-Ga thin films produced by pulsed laser deposition. // *Journ. of Appl. Phys.* V. 91, N 10. 2002. P. 8234 – 8236.
10. Wuttig M. et al. Phase transformations in ferromagnetic NiMnGa shape memory films. // *Mater. Trans. JIM.* V. 41, N 8. 2003. P. 933 – 937.
11. Buchelnikov V.D., Kuzavko Yu.A., Shavrov V.G. et al. Ultrasound induced martensitic transition in ferromagnetic Ni<sub>2.15</sub>Mn<sub>0.81</sub>Fe<sub>0.04</sub>Ga shape memory alloy. // *JMMM.* V. 272 – 276. 2004. P. 2025–2027.
12. Каргук М.М., Костюк Д.А., Кузавко Ю.А., Шавров В.Г. Особенности распространения акустических волн через границу жидкость - ферромагнитный сплав Гейслера. // *Акустич. журн.* Т. 51, N 5. 2005. С. 665 – 673.
13. Костюк Д.А., Кузавко Ю.А., Шавров В.Г. Отражение и преломление акустических волн на границе ферромагнитный сплав Гейслера-диэлектрик. // *ФММ.* Т. 101, N 6. 2006. С. 575-588.
14. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 286 с.

УДК 539.4.019.3

## ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОВОЛОКИ

Савенко В. С., Шаврей С. Д.

УО «Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина»,  
Мозырь, Беларусь  
[savenko-vl@rambler.ru](mailto:savenko-vl@rambler.ru)

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 локализа-

ция пластической деформации являются основными причинами обрыва проволоки при ее изготовлении или в процессе эксплуатации. Для получения 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.

В последнее время для 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/мм<sup>2</sup>) 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 широко изучены и внедрены процессы электропластической деформации при обработке металлов давлением для волочения медной и стальной проволоки [3], а также проволоки из других технически важных металлов [4]. Исследование электропластической деформации на стандартном волочильном стане при многоходовом технологическом цикле, а также изучение электромеханических характеристик алюминиевой проволоки в условиях электропластического волочения еще не проводились.

Алюминиевая катанка марки АКП-5 ПТ, полутвердая, с максимальным сечением 196 мм<sup>2</sup> ( $d = 14$  мм) подвергалась электропластическому волочению на волочильном станке СМВ-1-9М4. В процессе волочения осуществлялся подвод импульсного тока к алюминиевой проволоке для каждой волюки, установленной на волочильном стане, согласно технологического маршрута волочения (максимальное количество волок – 9). Импульсы тока подавались генератором мощностью 70 кВт. Электрическое сопротивление каждого контактного узла электропластического волочения при натянутой алюминиевой проволоке не превышало значения  $R = 0,005$  Ом.

Применялись следующие режимы волочения: обычное волочение без подвода тока; электропластическое волочение с импульсным током до 1000 А/мм<sup>2</sup>, пропускаемым через зону деформации, при полярности плюс источника тока до зоны деформации; тоже с полярностью минус источника тока до зоны деформации.

Электрическое сопротивление метровых образцов проволоки измерялось по мостовой компенсационной схеме на УПП-60 М (класс точности 0,1), а удельное электросопротивление рассчитывалось по усредненному диаметру проволоки, измеренному микрометром (с точностью до 1 мкм). Механические свойства — разрывное усилие и относительное удлинение — измерялись на разрывной машине РМУ-0,05 с точностью 1% (относительное удлинение определялось на базе 200 мм). Рентгеноструктурные исследования проводились дифрактометром ДРОН-УМ-1 на кобальтовом излучении (трубка БСВ-23).

Изучение зависимости числа перегибов  $n$  от истинного сужения  $L_i = d_i/d_n$ , где  $d_0$  — начальный диаметр проволоки,  $d_n$  — диаметр проволоки после  $n$ -перегиба (рис.1) 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  $L_i = d_i/d_n$  (рис. 2). Как видно из анализа графиков при элек-

тропластической деформации на последнем этапе волочения  $L_i$  более чем в 2 раза меньше чем без тока.

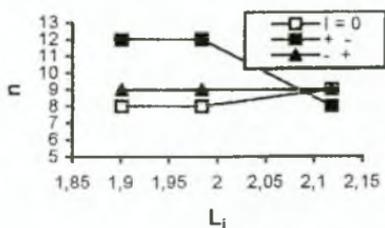


Рис. 1. Зависимость числа перегибов  $n$  от истинного сужения  $L_i$

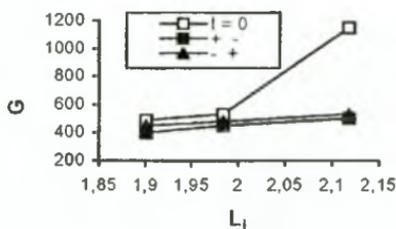


Рис. 2. Зависимость временного сопротивления  $G$  от истинного сужения  $L_i$

Электропластическое волочение приводит к увеличению относительного удлинения (рис. 3), что служит показателем снижения энергозатрат.

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. Кроме этого в сторону улучшения меняются и физические характеристики, например, уменьшается удельное сопротивление (рис. 4).

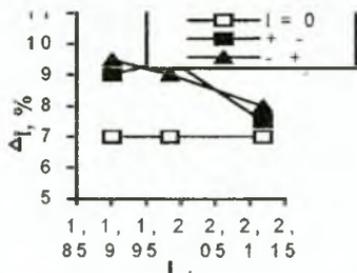


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения  $\Delta l$  от истинного сужения  $L_i$

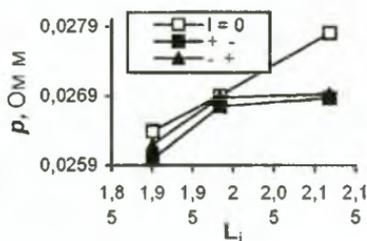


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от истинного сужения  $L_i$

Электропластическая деформация оказывает влияние и на внутреннюю структуру деформируемых материалов. В результате рентгеноструктурных исследований получено, 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 микроскажениях.

На фотографиях приведены изображения продольных шлифов образцов полученных после деформации без тока (рис. 5) и с током полярностью плюс источника тока до зоны деформации (рис. 6). 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. По мере нарастания деформации происходит дробление зерен с уменьшением фрагментации, также увеличивает

ся 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.

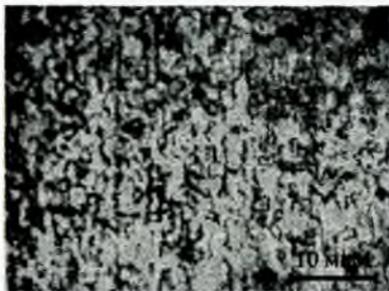


Рис. 5

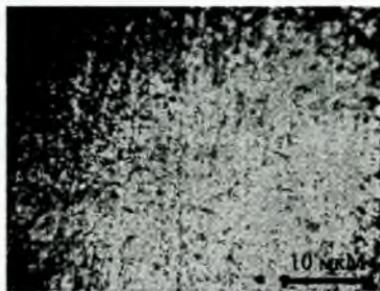


Рис. 6

Микроструктура деформированной волочением алюминиевой проволоки. Без тока (рис.5), с импульсом тока 1000 А/мм<sup>2</sup>, длительностью 10<sup>-4</sup> с (рис.6)

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 энергзатратного отжига. Кроме этого, предложенная технология волочения по сравнению с обычной снижает усилия деформации. Этот эффект приводит не только к снижению энергетических затрат, но и повышает ресурс стана в том числе износостойкость деформационных деталей волок.

#### Список литературы

1. В.И. Спицын, О.А. Троицкий. Электропластическая деформация металлов. - М.: Наука, 1985. - 160с.
2. В.С. Савенко. Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий. - Мн.: БГУ, 2003. - 200с.
3. Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. - М.: МГИУ, 2001. - 844с.
4. В.С. Савенко, О.А. Троицкий, П. Шеппард, А.А. Кайзер. Преимущества электропластической прокатки (ЭПП) и электропластического волочения (ЭПВ) золота, серебра, меди и стали, а также вольфрама, молибдена и ниобия. Мат. междунар. науч.-практ. конф. Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов - М.: ИМАШ РАН, 2006.