

УДК 621.669.14

ПРОКАТКА МІДНОЇ СТРІЧКИ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ**О. В. Аниськов**Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»
вул. Димитрова, 101/84, м. Кривий Ріг, 50086, Україна. E-mail: aniskov@softproject.com.ua

Досліджується вплив дії електричного струму, постійного та імпульсного, на фізико-механічні властивості мідної стрічки під час її прокатки – електропластичної та звичайної. Досліджуються зміни питомого опору стрічки під дією електричного струму. Розглянуті різні способи підведення постійного та імпульсного струму у зону пластичної деформації. З'ясовано, що найбільш ефективним є розташування ковзких контактів для підведення електричного струму до та після зони деформування. Під дією постійного та імпульсного струму межа течії та мікротвердість зменшилися відносно до цих показників для зразків, отриманих після прокатки без струму, на 15–20 і 30–35 % відповідно, а питомий електричний опір зменшився на 10 %.

Ключові слова: прокатка, постійний та імпульсний струм, електро-фізико-механічні властивості.

ПРОКАТКА МЕДНОЙ ЛЕНТЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА**О. В. Аниськов**Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»
ул. Димитрова, 101/84, г. Кривой Рог, 50086, Украина. E-mail: aniskov@softproject.com.ua

Исследуется влияние действия электрического тока, постоянного и импульсного, на физико-механические свойства медной ленты после электропластической и обычной прокатки. Исследуются изменения удельного сопротивления ленты под действием электрического тока. Рассматриваются различные способы подведения постоянного и импульсного тока в зону пластической деформации металла. Установлено, что наиболее эффективным является подведение электрического тока с помощью скользящих контактов до и после очага деформации. Под действием постоянного и импульсного тока предел текучести и микротвердость уменьшаются по отношению к значениям этих параметров для образцов после прокатки без тока на 15–20 и 30–35 % соответственно, а удельное электросопротивление на 10 %.

Ключевые слова: прокатка, постоянный и импульсный ток, электро-фізико-механические свойства.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Останніми десятиріччями у світовій практиці широко розробляються енергозберігаючі технології виробництва стрічки та дроту, що дозволяють формувати у металі необхідні, в умовах експлуатації, фізико-механічні властивості. Ці технології базуються на застосуванні імпульсної обробки електричним струмом рухомих стрічки та дроту у поєднанні з процесами пластичної деформації. Така обробка називається електропластичною обробкою металів і сплавів (ЕПО) [1]. Стрічка та дріт після ЕПО застосовуються в атомній енергетиці, космічному приладобудуванні, швидкісному електротранспорті.

Технологічні схеми отримання мідної стрічки з покращеними фізико-механічними властивостями для потреб електротехнічної промисловості, електротранспорту та інших галузей промисловості включають застосування додаткових відпалів [2]. Дослідження російських та українських учених показали, що отримати мідний дріт з підвищеною пластичністю, яка є особливо важливою для гнучких струмовідводів, можна за допомогою ЕПО металу [1, 3–5]. Така обробка дозволяє вилучити із технологічного процесу проміжні відпали, що не завжди позитивно впливають на якість кінцевої продукції.

Метою роботи є визначення оптимальних параметрів ЕПО мідної стрічки різної товщини та оптимальної схеми підведення імпульсного струму до зони деформування під час електропластичної обробки на основі математичної моделі процесу, з метою отримання максимального видовження стрічки у напрямі прокатки, порівняння фізико-механічних

властивостей, змін у структурі після електропластичної та звичайної прокатки без струму.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. На експериментальному прокатному стані були проведені наступні дослідження.

1. Приводився вибір можливих схем підведення імпульсного та постійного струму до зони деформування:

а) підведення струму від валка до валка через стрічку, що деформується, з включенням у електричний ланцюг деформуючих валків прокатного стану (рис. 1);

б) підведення струму за допомогою ковзких контактів до та після зони деформування без включення деформуючих валків у електричний ланцюг (рис. 2);

в) підведення струму за змішаною схемою – один ковзкий контакт до стрічки, а інший – до деформуючих валків прокатного стану (рис. 3).

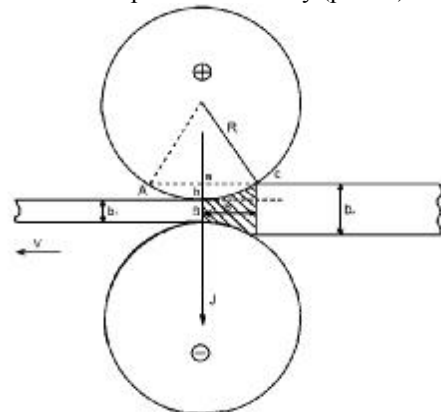


Рисунок 1 – Підведення електричного струму до стрічки через валки

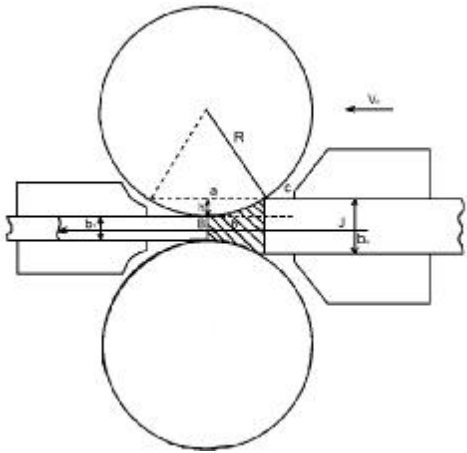


Рисунок 2 – Підведення електричного струму до стрічки за допомогою ковзких контактів

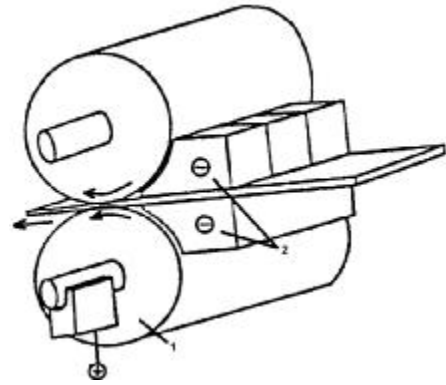


Рисунок 3 – Підведення електричного струму до стрічки через ковзкий контакт і деформуючий валок

Таблиця 1 – Результати дослідів

Режим схема а)	Парам. зразка	1-й перехід	2-й перехід	3-й перехід	4-й перехід	5-й перехід	6-й перехід	7-й перехід	Ефект дії струму
Без струму	Довжина, мм Товщина, мм	$l_1=200$ $h_1=0,18$	$l_2=241$ $h_2=0,13$	$l_3=275$ $h_3=0,1$	$l_4=321$ $h_4=0,08$	$l_5=368$ $h_5=0,06$	$l_6=435$ мм $h_6=0,05$	$l_7=520$ $h_7=0,04$	$\frac{l_7-l_1}{l_1} \times 100\%$
Пост. струм	$I = 12A$	$l_1=200$ $h_1=0,15$	$l_2=250$ $h_2=0,11$	$l_3=304$ $h_3=0,09$	$l_4=347$ $h_4=0,07$	$l_5=410$ $h_5=0,06$	$l_6=475$ $h_6=0,05$	$l_7=580$ $h_7=0,04$	12 %
Імп. струм	$I_m = 330A$ $t = 10^{-2} c$	$l_1=220$ $h_1=0,13$	$l_2=240$ $h_2=0,1$	$l_3=280$ $h_3=0,085$	$l_4=320$ $h_4=0,07$	$l_5=382$ $h_5=0,06$	$l_6=460$ $h_6=0,05$	$l_7=590$ $h_7=0,04$	13 %
Режим схема б)									
Без струму		$l_1=175$ $h_1=0,15$	$l_2=192$ $h_2=0,13$	$l_2=220$ $h_2=0,11$	$l_2=245$ $h_2=0,09$	$l_2=300$ $h_2=0,07$	$l_2=425$ $h_2=0,06$	$l_7=510$ $h_7=0,045$	—
Пост. струм	$I = 20A$	$l_1=175$ $h_1=0,15$	$l_2=195$ $h_2=0,13$	$l_2=222$ $h_2=0,11$	$l_2=255$ $h_2=0,09$	$l_2=325$ $h_2=0,07$	$l_2=462$ $h_2=0,06$	$l_7=550$ $h_7=0,045$	8 %
Імп. струм	$I_m = 500A$ $t = 3 \cdot 10^{-4}$	$l_1=175$ $h_1=0,15$	$l_2=195$ $h_2=0,13$	$l_2=230$ $h_2=0,11$	$l_2=260$ $h_2=0,09$	$l_2=347$ $h_2=0,07$	$l_2=475$ $h_2=0,06$	$l_7=570$ $h_7=0,045$	12 %
Режим схема в)									
Без струму	Довжина, мм Товщина, мм	$l_1=100$ $h_1=0,15$	$l_1=110$ $h_1=0,12$	$l_1=140$ $h_1=0,08$	$l_1=170$ $h_1=0,05$	$l_1=216$ $h_1=0,04$	—	—	—
Пост. струм	$I = 25A$	$l_1=100$ $h_1=0,15$	$l_1=110$ $h_1=0,12$	$l_1=140$ $h_1=0,08$	$l_1=187$ $h_1=0,05$	$l_1=250$ $h_1=0,04$	—	—	6 %
Імп. струм	$I_m = 600A$ $t = 10^{-4} c$	$l_1=100$ $h_1=0,15$	$l_1=115$ $h_1=0,12$	$l_1=150$ $h_1=0,08$	$l_1=195$ $h_1=0,05$	$l_1=246$ $h_1=0,04$	—	—	9 %

2. Визначалася оптимальна довжина зони дії струму за схемами б) і в).

3. Проводилися дослідження температурного розподілу в зоні дії струму та порівняння розрахункових значень температури з експериментальними.

Для кожної схеми підведення струму була побудована математична модель температурного поля.

4. Проводилися дослідження питомого електричного опору зразків. Виконувалося від трьох до восьми переходів з одиничним обжимання 10–12 %.

Під час прокатки стрічки з підведенням струму не змінювався напрям прокатки по переходах. Контрольні зразки стрічки без струму прокатувалися так само, як і зі струмом. Після кожного переходу вимірювалося видовження зразків та проводилися вимірювання фізико-механічних властивостей. Отримані результати зведені до табл. 1.

Для дослідження дії струму за схемою а) на пластичні та інші властивості мідної стрічки товщиною 200 мкм використовувався постійний та випрямлений змінний імпульсний струм різної частоти слідування імпульсів. Після кожного переходу досліджувалися фізико-механічні властивості зразків. Із табл. 1 видно, що під дією постійного струму за схемою а) збільшується деформація у напрямі прокатки на 10%, а під дією імпульсного – на 20–25 %. Збільшення числа переходів до 20 при тих же одиничних обжиманнях під дією як імпульсного, так і постійного струму, показало, що збільшення довжини стрічки в результаті прокатки з постійним струмом склало 5–6 та 8–10 % під дією імпульсного струму.

Дослідження дії струму за схемою б) відбувалося наступним чином. Оскільки на початковій та кінцевій стадіях процесу під час виходу стрічки із зони дії струму електричний ланцюг розривався, то кінці зразків відкидалися, і досліджувалася лише центральна частина зразка. Ефект видовження зразків стрічки після шести переходів склав від 6 % при дії постійного струму до 9 % при дії імпульсного струму. Крім того, при підведенні постійного струму важливе значення мала полярність підведення струму (мінус до зони деформування і плюс після неї). Після 25 переходів при таких же одиничних обжиманнях ефект збільшення довжини складав уже 15–20 %

при постійному струмі і 20–25 % при імпульсному. Параметри обробки склали: $I = 20 \text{ A}$ для постійного струму та $I = 700 \text{ A}$, $F = 80 \text{ Гц}$, $\tau = (1-5) \cdot 10^{-4} \text{ с}$ для імпульсного.

Дослідження дії струму підведеного за схемою в) показав, що видовження стрічки склало 3–5 %, що порівняно менше ніж за схемами а) та б).

Механічні властивості стрічки перевірялися на розривній машині Р-05 і мікротвердомірі ПМТ-3. Розривна машина була оснащена додатковими пристосуваннями для проведення випробувань стрічки пристроєм, що вимірює силу, 500 N, стійкою приладів з блоком керування. Відносна похибка вимірювань складала 5–7 %.

Вимірювання електричного опору відбувалося чотирихконтактним способом. Для цього через зразок вирізаний зі стрічки пропускався постійний струм силою $I = 1 \text{ mA}$ та вимірювалося падіння напруги на ньому за допомогою цифрового вольтметра. За законом Ома розраховувався опір зразка стрічки та питомий опір за формулою $r = \frac{US}{Il}$, де

U, S, l – напруга, площа поперечного перетину стрічки та її довжина. У вимірюваннях температурним коефіцієнтом опору знехтувано. Основним джерелом похибки була термоелектрична ЕРС, що склала не більше 5 %.

У табл. 2 наведені результати вимірювань електрофізичних властивостей зразків із мідної стрічки міцності та питомого опору при різних режимах обробки. Похибка вимірювань фізико-механічних властивостей у всіх випадках складала близько 5 %.

Таблиця 2 – Результати вимірювань електрофізичних властивостей зразків із мідної стрічки міцності та питомого опору при різних режимах обробки

Режим	$r \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ Питомий опір	$s_m \left[\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \right]$	$s_m \left[\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \right]$	Мікротвердість HV	Відносне видовження, $\frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%$
Без прокатки	1,85	20	33	120	2,5
Після звичайної прокатки	3,6	35	44	170	2,1
Прокатка з постійним струмом	2,9	30	45	122	2,2
Прокатка з імпульсним струмом	2,00	29	44	110	2,3

Із табл. 2 видно, що найбільші зміни у властивостях зразків відбувалися після звичайної прокатки. Тут різко зросла твердість, питомий опір, характеристики міцності. Цей факт добре відомий. Його зазвичай пов'язують з різким збільшенням числа дислокацій та зменшенням їхньої рухливості. Як свідчать дані табл. 2, протікання електричного струму, як постійного, так і імпульсного, під час прокатки стрічки суттєво впливає на їхні кінцеві

фізичні властивості. Зменшується твердість, границя течії, збільшується відносне видовження у порівнянні зі звичайною прокаткою. Це свідчить про те, що пропускання електричного струму під час прокатки значно полегшує сам процес прокатки, знижуючи енерговитрати на нього. Такий ефект можна пояснити взаємодією дислокацій з електронами провідності і, як наслідок, збільшенням їх рухливості, зменшенням енергії їх зв'язку. Під час пластичної

деформації формуються різні групи дислокацій (загальмовані дислокаційні скупчення, групи скупчень уздовж лінії ковзання і т. і.). Імпульс струму викликає їх розрядку, що супроводжується мікропластичною деформацією. При цьому основний внесок у скачок деформації, що спостерігається, складає енергія внутрішньої напруги, яка накопичується під час попередньої пластичної деформації, а імпульс струму ініціює цю розрядку, і тому може бути незначним за рівнем еквівалентної дії.

ВИСНОВКИ. Після звичайної прокатки без дії струму різко підвищуються такі характеристики міцності мідної стрічки, як твердість, зменшується відносне видовження (пластичність) під час випробування на розрив, збільшується електричний опір стрічки, що пояснюється протіканням процесів зміцнення під час прокатки за рахунок збільшення числа заблокованих дислокацій, зменшення їх рухливості. Для зменшення електричного опору стрічки та збільшення відносного видовження необхідно проводити додаткові відпали. Як свідчать дані табл. 2, в результаті дії струму під час електропластичної прокатки зменшується мікротвердість та межа течії, збільшується відносне видовження зразків. Обробка імпульсним електричним струмом мідної стрічки

одночасно з пластичною деформацією дозволяє покращити фізико-механічні та експлуатаційні властивості таких виробів, як гнучкі струмовідводи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
2. Днестровский Н.З. Волочение цветных металлов. – М.: Metallurgizdat, 1954. – 268 с.
3. Влияние электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов: Коллективная монография / Под. ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ», 2011. – 218 с.
4. Электропластическое волочение тонкой проволоки / О.А.Троицкий, В.И. Сташенко, В.Г. Рыхков и др. // Материалы 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16–20 мая 2011 г. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2011. – С. 360.
5. Электропластическое волочение и новые технологии создания облегченных проводов / О.А. Троицкий, В.И. Сташенко, В.Г. Рыхков и др. // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). – Харьков, 2011. – Вып. 4/2011. – С. 111–117.

THE DRAWING OF COPPER STRIP UNDER THE INFLUENCE OF ELECTRIC CURRENT

A. Anis'kov

State institution of higher education «Kryvyi Rih National University»

vul. Dimitrova, 101/84, Krivoy Rog, 50086, Ukraine. E-mail: aniskov@softproject.com.ua

The influence of electric direct and pulse current on physical-mechanical properties of copper strip (tape) during its electroplastic and conventional (general) rolling has been researched in the paper. The changing of resistivity of strip under the influence of electric current has been studied. Different techniques (methods) of direct and pulse current application to the plastic deformation zone has been analysed. The most effective techniques of placement of sliding contacts for application of electric current is discovered to be such as placed before and after plastic deformation zone. Under the influence of direct and pulse electric current the flow boundary and microhardness has reduced towards these measures of samples obtained after rolling without current on 15-20% and 30-35% accordingly, and resistivity has reduced on 10%.

Key words: rolling, direct and pulse electric current, electrical-physical-mechanical properties.

REFERENCES

1. Spitsyn V.I., Troitsky O.A. *The electroplastic deformation of metals*. – M.: Science, 1985. – 160 p. [in Russian]
2. Dnestrovsky N.Z. *The drawing of nonferrous metal*. – M.: Metallurgizdat, 1954. – 268 p. [in Russian]
3. *The influence of electromagnetic fields on plasticity and strength of metals: The multi-authored monograph* / Edited by V.E. Gromov. – Novokuznetsk: Publishing house "SIBGIU", 2011. – 218 p. [in Russian]
4. Troitsky O.A., Stashenko V.I., Ryzhkov V.G., Liashenko V.P., Kobielskaya E.B. The electroplastic drawing of fine wire // *Materials of 51st international conference "The topical problems of the strength"*, 16–20 May 2011. – Kharkov: NNC HFTI, 2011. – 360 p. [in Russian]
5. Trinity O.A., Stashenko V.I., Ryzhkov V.G., Liashenko V.P., Kobielskaya. The electroplastic drawing and new technology of production of the lightweight wires // *Problems of atomic science and technology (VANT)*. – Kharkov, 2011. – Iss. 4/2011. – PP. 111–117. [in Russian]

Стаття надійшла 17.10.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Драгобецький В.В.