

## ВПЛИВ МАРШРУТІВ ВОЛОЧІННЯ ТЕРМОПАРНИХ ДРОТІВ НА ЇХ ЕЛЕКТРО-ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

*В статті розглядається вплив холодної деформації волочинням на інтегральну термо-е.р.с. та питомий опір термоелектричних сплавів хромель, конпель і сплавів системи нікель-молібден.*

*In the article influence of cold deformation is examined dragging on integral thermopower but specific resistance of thermo-electric alloys chromel, constantan and alloys of the system nickel-molybdenum.*

Ресурсозбереження і підвищення якості готових виробів є основними тенденціями розвитку машинобудування в сучасних умовах. Розробка й впровадження нових ресурсозберігаючих технологій, вдосконалення існуючих та підвищення ефективності виробництва за їх рахунок були й залишаються пріоритетними напрямками обробки металів тиском (ОМТ). Найбільш поширеним безвідходним способом ОМТ є холодне волочиння, яке є основним способом виготовлення довгомірних виробів типу прутків чи дроту і дозволяє звести до мінімуму або повністю виключити необхідність наступної обробки (доводки) готових виробів.

Технологічний процес волочиння є циклом, який складається з ряду операцій: виготовлення заготовки, попередньої її термічної обробки, підготовки до волочиння, одно- або багатоперехідного процесу волочиння, проміжної термообробки, підготовки до наступного циклу волочиння тощо.

Традиційні методи розрахунку технологічних маршрутів волочиння ґрунтуються на знаходженні середньої витяжки за перехід, при цьому основним показником є коефіцієнт міцності протягнутої частини заготовки, який знаходять, виходячи з багаторічної практики волочинного виробництва або шляхом багаточисленних експериментів та проб. [1]. Такий емпіричний підхід не дозволяє раціонально використовувати пластичні властивості матеріалу та керувати процесом формування технологічних характеристик готового виробу.

Разом з тим, феноменологічна теорія деформуємі металів дозволяє на стадії проектування технологічного процесу прогнозувати властивості і оцінювати граничні формозміни заготовок в процесі ОМТ, а також управляти властивостями готових виробів змінюючи технологію їх отримання. В феноменологічній теорії деформуємі основною характеристикою металу є пластичність, а в якості міри пластичності приймають накопичену до моменту руйнування інтенсивність деформацій

$$e_u = \sqrt{\frac{2}{3}} \int_0^{\tau_p} \sqrt{\dot{\epsilon}_{kl} \cdot \dot{\epsilon}_{kl}} dt ; \quad (1)$$

де  $\dot{\epsilon}_{kl}$  – компоненти тензора швидкості деформацій;

$\tau_p$  – час від початку деформації до руйнування.

Пластичність залежить від багатьох факторів, серед яких, крім природи самого матеріалу є термомеханічні параметри процесу, такі як температура, швидкість деформування, вид напруженого стану.

Умови деформування без руйнування можна записати, виходячи з наступного: якщо в процесі формозмінення показник напруженого стану [ 2 ]  $\eta = const$ , то до того часу, поки накопичена інтенсивність деформацій  $e_u$  не досягне граничної величини  $e_p$  руйнування не буде, а використаний ресурс пластичності  $\psi = e_u/e_p < 1$ . Якщо  $\eta \neq const$ , деформуємі металу можна оцінити за критеріями В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова або Г.Д. Деля – В.А. Огороднікова [3]. Якщо ресурс пластичності виробляється, призначається проміжна термообробка для відновлення пластичних властивостей заготовки.

Дані критерії отримані з використанням гіпотези про пропорційну залежність накопичення пошкоджень від ступеню деформації зсуву, однак вони не враховують структурну не-

однорідність матеріалів і деформаційну анізотропію пластичності, тому більшою мірою особливостям руйнування в результаті пластичного деформування відповідає тензорний опис пошкоджуваності поверхні заготовок. Тут в якості міри пошкоджуваності прийнято другий інваріант тензора пошкоджень [4]. Розрахунок маршрутів волочіння за методикою [4,5] дозволяє призначати термообробки після використання ресурсу пластичності і активно управляти властивостями готових виробів.

Діаметр дроту після проходу через волоку:

$$d_i = D_i(1 - \gamma^2) \exp\left(\frac{-\Psi \cdot e_{ip}}{\sqrt{4 + 3\gamma^2}}\right); \quad (2)$$

або, якщо врахувати попередню історію деформування

$$d_i = D_i \exp\left[\frac{-e_{ip} \Psi_i \left(\frac{1}{1+0,2C_\alpha}\right)}{\sqrt{4 + 3\Phi\gamma^2}}\right]; \quad (3)$$

де  $D_i$  і  $d_i$  – відповідно початковий і кінцевий діаметри заготовки на  $i$ -му переході волочіння;  $\Phi$  – функція току;  $\Psi_i$  – використаний ресурс пластичності за перехід,  $\gamma$  – коефіцієнт витяжки;  $C_\alpha$  – кут на  $i$ -му переході волочіння.

При цьому діаграму пластичності можна будувати за результатами одного випробування:

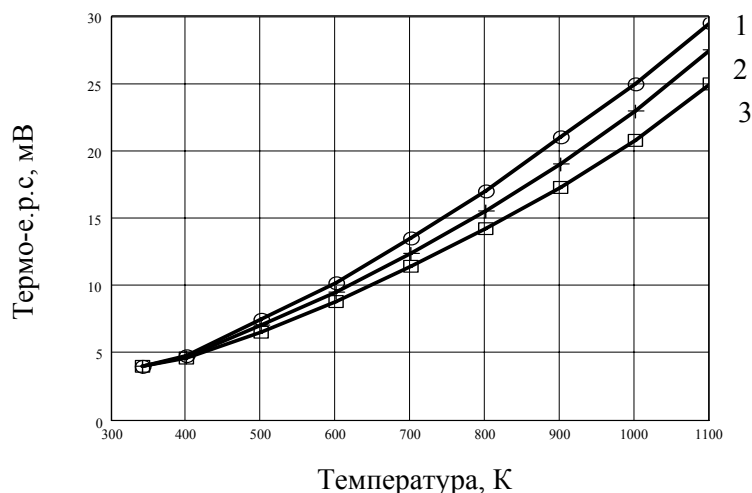
$$e_{ip} = 2 \ln \frac{D}{d_{iu}}; \quad (4)$$

де  $D$  – вихідний діаметр дроту,  $d_{iu}$  – діаметр шийки після руйнування зразка при розтягуванні.

Для експериментальних досліджень було вибрано передільний термопарний дріт товщиною 1,0 і 0,5 мм із сплавів хромель (НХ9,5), копель (МНМц43-0,5) та відливки сплаву нікель-молібден ( $\text{Ni}_{80-x}\text{Mo}_x$ ), за формулою (4) та за методикою, описаною в [4, 5] розраховані маршрути волочіння і виготовлені тонкі дроти діаметром 300, 180, 100 і 70 мкм. При виборі зразків для досліджень враховувалось те, що нормативні документи на термопарні дроти описують їх метрологічні характеристики для діаметрів від 200 мкм і для дротів з термопарних сплавів хромель і копель діаметром менше 200 мкм технологія волочіння в літературі не описана, оскільки традиційні методи розрахунку маршрутів волочіння не забезпечують стабільності електрофізичних характеристик в залежності від попередньої історії пластичного деформування. Готові дроти відпалювались у вакуумній печі для зняття напруг наклепу і вирівнювання структури. Використовували відпалювання першого роду. Досліджувався вплив пластичної деформації за різними маршрутами волочіння на інтегральну термо-е.р.с. і питомий опір сплавів. Для вивчення зміни інтегральної термо-е.р.с. тонких дротів в процесі волочіння використано методику, описану в [5]. Інтегральну термо-е.р.с. визначали градуванням термопар, які складались з дротів, отриманих в процесі волочіння, та платини. В якості електрода порівняння використовували платиновий електрод зразкової платинородій - платинової термопари II розряду, за допомогою якої контролювалась температура дослідів. Гарячий спай зварювали на повітрі та в середовищі очищеного аргону. Електроди ізолювали алундовими трубками, які попередньо обпалювались при температурі 1200К для видалення залишків органічних речовин. Градування проводилось в високотемпературній печі з залишковим тиском  $2 \cdot 10^{-5}$  Па та в середовищі інертного газу (очищений аргон). Корпус високотемпературної печі виготовлений з бориду ніобію, нагрівник - вольфрам. Внутрішній діаметр печі - 4мм, зовнішній - 15мм, довжина - 200мм. Для зменшення розсіювання тепла піч захищена подвійним екраном з ніобію, виготовленим з листа товщиною 0,3 мм, торці екрану закривались кришками в яких зроблено отвори для виведення кінців термопар. Холодні спаї термостатувались при температурі 273К.

Результати дослідження впливу режимів волочіння та термообробки на інтегральну термо-е.р.с. мікродротів з сплавів хромель, копель та ( $\text{Ni}_{80-x}\text{Mo}_x$ ) показані на рис.1-3.

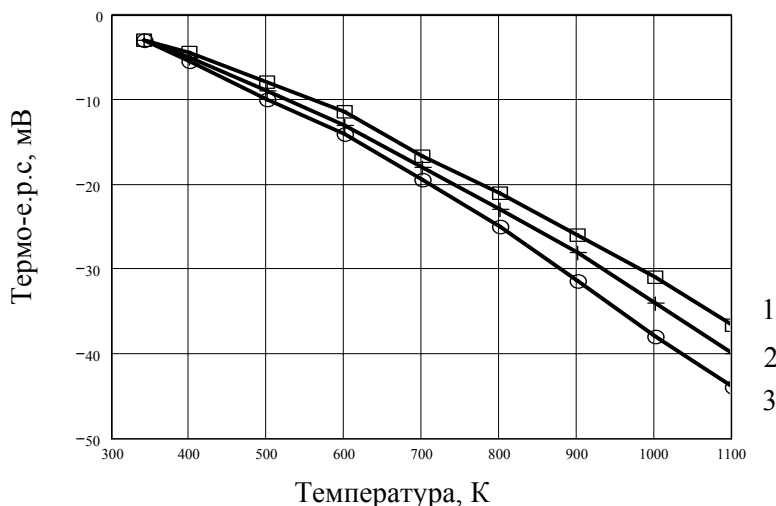
Як видно з рисунків, термо-е.р.с. хромелю в процесі деформації знижується в середньому на 6%. Підбором режимів термообробки вдається трохи скомпенсувати це зниження, але повністю уникнути його не вдається. Для копелю вплив деформації зворотній: в процесі волочіння термо-е.р.с. копелю зростає на 7-8%. Це збігається з даними, приведеними в [6]. Таким чином термо-е.р.с. пари хромель-копель в процесі волочіння залишається практично постійною і не виходить за межі похибок термопари.



1, 2, 3 – дроти діаметром відповідно 300, 180, 70 мкм

Рис. 1 – Вплив холодної деформації волочінням на інтегральну термо-е.р.с хромелю відносно платини

Термо-е.р.с. сплавів Ni - Мо в процесі деформації знижується в залежності від складу сплаву (рис.3) від 1-1,5% для сплаву Ni+6 ат%Мо до 8-10% для сплаву Ni+16,6 ат%Мо. Для сплавів з вмістом молібдену менше 6% вплив деформації знаходиться в межах похибки експериментів.

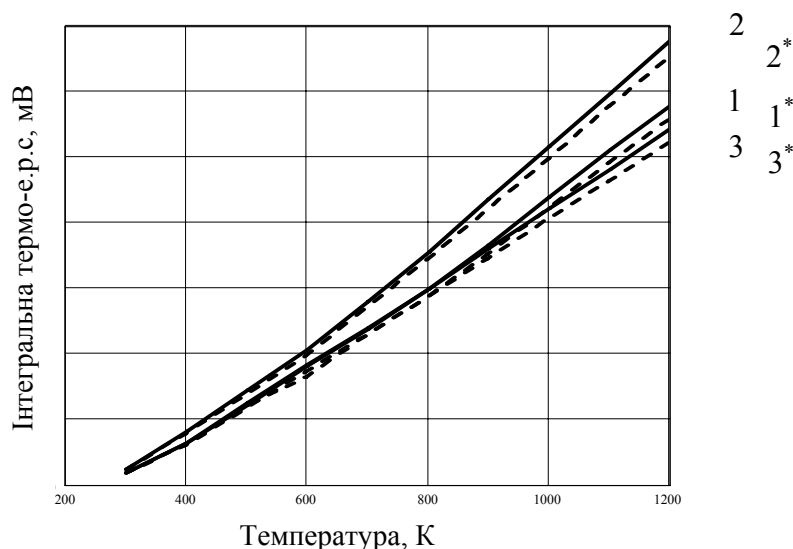


1, 2, 3 – дроти діаметром відповідно 300, 180, 70 мкм

Рис. 2 – Вплив холодної деформації волочінням на інтегральну термо-е.р.с копелю відносно платини

Питомий опір вимірювали двохзондовим методом, до зразка приварювали мідні струмопідводи. В двох точках до зразка приварювались термопари платинородій-платина II розряду, платинові вітки яких використовувались як зонди, а самі термопари - для контролю температури зразка. Різниця потенціалів на зондах знаходилась компенсаційним методом, тому що при вимірюванні вольтметром спад напруги на самих зондах та в точках контакту їх із

зразком - величини одного порядку з вимірюваною напругою. Для виключення впливу електричної асиметрії зондів та впливу ефекту Пельтьє виміри проводились при двох напрямках струму через зразок. Оскільки зразки готувались з дроту, то переріз зразка можна вважати постійним, а зонди приварювались на відстані 2-3 діаметрів зразка від струмових контактів, для виключення викривлення ліній струму та зменшення похибки вимірювань. Питомий опір розраховували за формулою:  $\rho = \frac{U \times S}{I \times l}$ , де:  $l$  - відстань між зразками;  $S$  - площа поперечного перерізу;  $I$  - струм через зразок;  $U$  - падіння напруги на зондах.

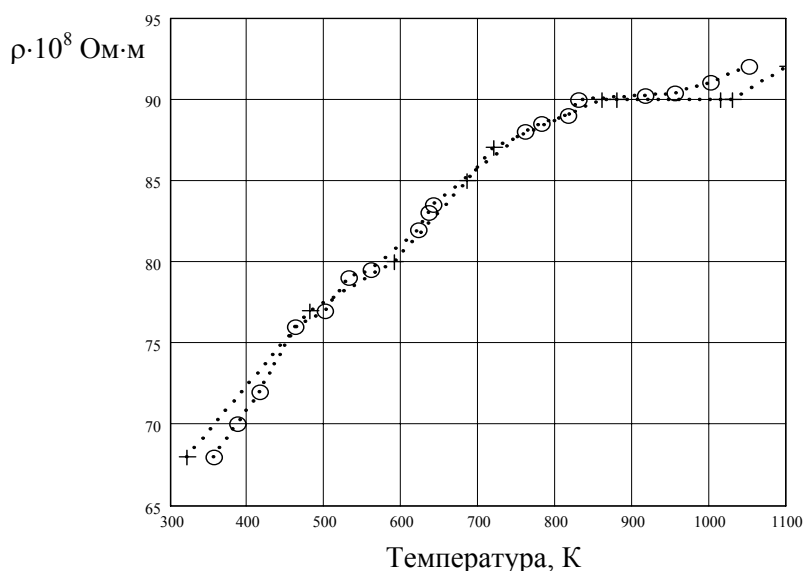


1 – 94%Ni+6%Mo; 2 – 83,4%Ni+16,6%Mo; 3 – хромель

1,2,3 – дроти діаметром 500 мкм; 1\*,2\*,3\* – дроти діаметром 100 мкм;

Рис. 3 – Вплив деформації волочінням на інтегральну термо-е.р.с. сплавів нікель-молібден

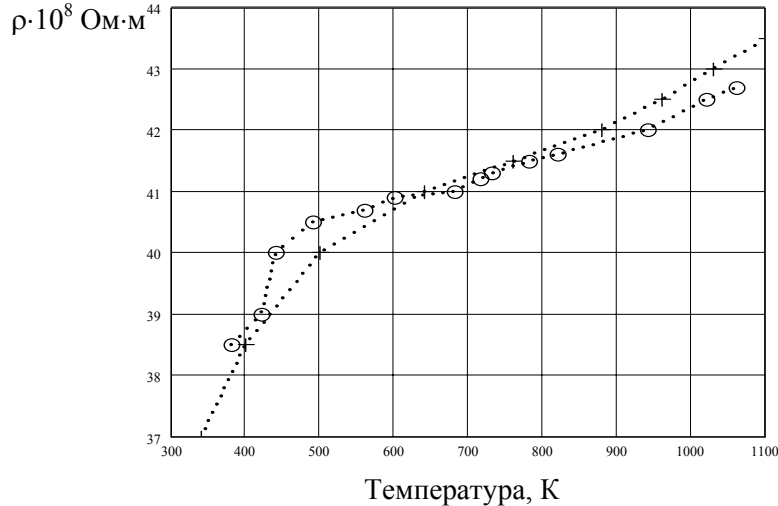
Результати дослідження впливу режимів волочіння на питомий опір мікродротів з сплавів хромель та копель показані на рис.4, 5.



+ - діаметр 500 мкм (вихідний зразок); O - діаметр 100 мкм (зразок після волочіння)

Рис. 4 – Зміна питомого опору термопарного сплаву хромель в результаті волочіння від  $d=500$  мкм до  $d=100$  мкм

Вплив пластичної деформації волочінням на питомий опір (і електропровідність) термопарних сплавів хромель і копель (досліджувались дроти діаметром 100 мкм, отримані волочінням із передільного дроту діаметром 500 мкм, незначний. Зміна питомого опору в процесі волочіння, за нашими даними, значно менша ніж зміна термо-е.р.с., як для хромелю так і для копелю. Цей висновок підтверджують також і літературні дані, наприклад [7].



+ - діаметр 500 мкм (вихідний зразок); ○ - діаметр 100 мкм (зразок після волочіння)

Рис. 5 – Зміна питомого опору термопарного сплаву копель в результаті волочіння від  $d=500$  мкм до  $d=100$  мкм

### Висновки

1 Феноменологічна теорія деформуєності у використанні для волочіння тонких (100-70 мкм) термопарних дротів дозволяє розробляти маршрути волочіння без виконання великого об'єму експериментальних досліджень і при цьому управляти властивостями готових виробів.

2 Тензорний опис пошкоджуваності поверхні заготовок враховує попередню історію деформування і використаний ресурс пластичності, що мінімізує кількість термообробок для його відновлення.

3 Розроблено технологічні режими волочіння тонких термопарних дротів, що забезпечують одержання мікродротів діаметром до 70 мкм.

4. Проведені експериментальні дослідження свідчать, що термопари копель–хромель, та копель–NiMo з мікродротів задовольняють стандартні градуєвальні характеристики з похибкою не більше 2%.

### ЛІТЕРАТУРА

- 1 Перлин И. Л., Ермонок Н. З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448с.
- 2 Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формирозменении. – К.: УМК ВО, 1989. – 150с.
- 3 Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – К.: Вища школа, 1983. – 173с.
- 4 Огородников В., Чалев. Д. – Метод за исчислене на маршрутите при телозтеглене, основан на теоритета за деформируемост. – София: Машиностроение, 1987. – №3. – С.118-126.
- 5 Співак О. Ю., Мельник І. Г., Гуменюк В. С. Тонкі термопарні дроти: розробка технологічних режимів волочіння та дослідження їх впливу на термоелектричні властивості сплавів хромель та копель. Деп. в ДНТБ України 17.10.94, № 2036 – Ук94. – 20с.
- 6 Исследование сплавов для термопар III. Вып. XXIX. – М.: Металлургия, 1969. – 174с.
- 7 Рогельберг И. Л., Бейлин В. М., Сплавы для термопар: Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 360с.