

**Аніщенко О.С.,  
Кухар В.В.,  
Присяжний А.Г.**

ДВНЗ «Приазовський державний  
технічний університет»,  
м. Маріуполь, Україна  
E-mail: aas540628@gmail.com

## ВПЛИВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ДРОТУ З ІНВАРУ

УДК 621.778: 669-1: 53.092

Показано, що холодне волочіння дроту з інвару з коефіцієнтом витяжки  $\geq 12,5$  забезпечує при температурах: 20 ... 50 °С тепловий коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР)  $< 0$ ; 20...100 °С – стабільне значення ТКЛР  $\leq 1,0 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup>. Для досягнення стандартного ТКЛР  $\leq 1,5 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> витяжку при волочінні можна зменшити до 3,58. Для всіх випадків не потрібна фінішна термічна обробка.

**Ключові слова:** інвар, дріт, волочіння, тепловий коефіцієнт лінійного розширення, загартовування, відпуск, старіння.

### Вступ

При виготовленні побутових газових плит для регулювання температурного режиму роботи духовки застосовують термобіметали. Одним з компонентів термобіметалів є інвар, що має аномально низький і майже постійний тепловий коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) в інтервалах температур (-60 ... + 100) °С [1 - 3]. Таке значення ТКЛР досягається поєднанням термічної обробки інвару з обробкою тиском. Загартовування з 840 °С в воду забезпечує мінімум ТКЛР, відпуск при 315 °С 1 ч призначений для стабілізації значення ТКЛР в процесі експлуатації. Оскільки з часом деталі з інвару мають тенденцію до збільшення розмірів (~ 0,5 мкм на 1 м довжини на рік), то вводиться операція старіння ( $T = 95$  °С 48 год). Якщо немає необхідності (наприклад, в газових плитах) враховувати ці досить незначні відхилення розмірів, то від старіння можна відмовитися.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомо [1], що ТКЛР можна знизити листовою прокаткою з обтисненням не більше ніж на 30 %. В інварі, дуже чистому за домішками (при наявності кобальту  $Co < 0,1$  %), а також при формуванні в ньому спеціальної структури різними методами, зокрема, обробкою лазером можна досягти ТКЛР  $< 0$  [4 - 5]. Але такий інвар дорого коштує. Значно менше мається відомостей про вплив сукупності всіх видів обробки тиском і термообробки на ТКЛР інвару. Нормативні стандарти (ГОСТи 14082 і 14081) передбачають для прутків і дроту з інвару значення ТКЛР не вище  $1,5 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> в інтервалі температур 20 ... 80 °С після вищенаведених видів загартовування та відпуску. Однак постійно існує проблема пошуку економічно прийнятних для виробництва технологій зниження ТКЛР інвару для збільшення ефективності його роботи в складі різних пристроїв.

### Мета роботи

Метою цієї роботи є визначення оптимального комплексу прокатки, термічної обробки і волочіння дроту з інвару, що забезпечує мінімальний ТКЛР.

### Викладення основного матеріалу

Дослідження проводили на прутках діаметром 9,05 мм, отриманих гарячою прокаткою, і дроті діаметрами 5,02, 2,56 і 2,02 мм з інвару, який має склад: 35% Ni, 0,03% C, 0,54% Mn, 0,03% Cr, 0,28% Si, 0,015% S, 0,013% P.

Дріт виготовляли холодним волочінням з прутків діаметром 9,05 мм на волочильному стані ВС 1/550 [6]. Оскільки високі швидкості волочіння викликають деформаційний розігрів дроту, волочіння проводили зі зниженими швидкостями з метою забезпечення умов саме холодної деформації інвару. Для поліпшення умов нанесення мастила, в якості якого використовували сухий порошок господарського мила, вихідні прутки піддавали 5-тихвилинному вапнуванню, після чого висушували під калорифером.

Термічну обробку інвару здійснювали в електропечі типу СНОЛ 1, 6.2, 5.1 / 11-И2, для контролю температури використовували три хромель-алюмелеві термопари, які були підключені до потенціометру.

Механічні властивості дроту визначали на випробувальній машині ИМ-4 з триразовим повтором дослідів. Випробування дроту діаметрами 2,02 і 2,56 мм проводили згідно ГОСТ 10446, а діаметром 9,05 і 5,02 мм – за вимогами ГОСТ 1497. Використовували зразки дроту з робочою довжиною  $20 \pm 0,2$  і діаметром 3 та 1,5 мм.

Дослідження мікроструктури проводили за допомогою мікроскопу МИМ-8М, мікротвердість замірювали приладом МТ-3, умовний діаметр зерна визначали методом січних за ГОСТ 5639.

ТКЛР визначали за результатами випробувань зразків з базовою довжиною  $65 \pm 0,1$  мм на дилатометрі фірми «Бауервайс» з похибкою  $\pm 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Випробування проводили безпосередньо після термомеханічної обробки, а також через 1000 і 2000 годин після вилежування.

Досліджували дріт після обробки за такими режимами:

«1» – гаряча прокатка + загартовування від  $840 \text{ }^\circ\text{C}$  в воді + відпуск при  $315 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 1 год + охолодження з піччю (стандартний режим згідно ГОСТ 14082);

«2» – гаряча прокатка;

«3» – гаряча прокатка + відпал при  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  30 хв з охолодженням на повітрі;

«4» – гаряча прокатка + відпуск при  $315 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 1 год;

«5» – гаряча прокатка + холодне волочіння;

«6» – гаряча прокатка + відпал при  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 30 хв з охолодженням на повітрі + холодне волочіння;

«7» – гаряча прокатка + відпуск при  $315 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 1 год. + холодне волочіння;

«8» – гаряча прокатка + холодне волочіння + загартовування від  $830 \text{ }^\circ\text{C}$  в воді + відпуск при  $315 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 1 год. + старіння при  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 48 год.

Попередня термообробка гарячекатаних прутків (режими «3», «4», «6», «7») дозволила при волочінні збільшити граничний витяг за переходами на  $1,6 \dots 8,4 \%$  у порівнянні з волочінням прутків, що не термооброблювали. За рахунок цього кількість переходів було зменшено на один, три і чотири при волочінні дроту діаметром відповідно  $5,02$ ,  $2,56$  і  $2,02$  мм. Крім того, витяжку за переходами можна було регулювати в більш широких межах, використовувати волокни з більшим ступенем зношування, мобільно змінювати маршрути волочіння і використовувати меншу кількість волок.

Експериментальним шляхом було встановлено, що найбільш доцільно волочіння зі швидкістю  $0,35$  м/с за наступними деформаційними режимами:

- для дроту діаметром  $5,02$  мм витяжка за один перехід  $\mu = 1,14 \dots 1,27$ , кількість переходів 7, сумарна витяжка  $\Sigma\mu = 3,58$ ;

- для дроту діаметром  $2,56$  мм витяжка за один перехід  $\mu = 1,07 \dots 1,27$ , кількість переходів 15, сумарна витяжка  $\Sigma\mu = 12,50$ ;

- для дроту діаметром  $2,02$  мм витяжка за один перехід  $\mu = 1,06 \dots 1,27$ , кількість переходів 20, сумарна витяжка  $\Sigma\mu = 20,07$ .

Найбільший ступінь зношування волок з твердого сплаву ВК-8 спостерігали при волочінні гарячекатаного прутка. Збільшення діаметру волокни при  $\mu = 1,21$  складало  $0,04$  мм на  $500$  кг дроту. При волочінні прутка, що попередньо термооброблювали, при такому ж зношуванні волок маса виготовленого дроту збільшується з  $500$  до  $560$  кг.

Встановлено, що відпал та відпуск прутків діаметром  $9,05$  мм незначно знижують властивості міцності гарячекатаного інвару (табл. 1, режими «3», «4»). Подальший наклеп при холодному волочінні забезпечує  $\sigma_e$  та  $\sigma_{0,2}$ , які не залежать від режимів термічної обробки прутків і визначаються лише об'ємом деформованого металу.

Витяжка при волочінні неоднаково впливає на механічні властивості інвару. При  $\Sigma\mu = 3,58$  в дроті фіксується збільшення  $\sigma_e$  і  $\sigma_{0,2}$  майже в 2 рази. При цьому відносне подовження зменшується в 3 рази. Наступне волочіння з сумарною витяжкою  $\Sigma\mu = 20,07$  супроводжується різким зниженням  $\delta$  (з  $37 \dots 48 \%$  до  $1,5 \dots 2,5 \%$ ), тоді як  $\sigma_{0,2}$  збільшується на  $9 \dots 12 \%$ , а  $\sigma_b$  – тільки на  $10 \dots 15 \text{ Н/мм}^2$  ( $1 \dots 3 \%$ ). Слід відзначити, що зниження відносного звуження  $\psi$  з ростом  $\Sigma\mu$  має монотонний характер.

Наклеп при холодному волочінні викликає підвищення мікротвердості на  $20 \dots 45 \%$  як в центральній зоні дроту  $\varnothing 5,02$  мм, так і на поверхні (табл. 2). Хоча відносна різниця значень  $H_{\mu 50}$  для прутків та дроту не змінюється, приріст абсолютних значень мікротвердості на поверхні на  $100 \dots 200$  МПа вище, ніж в центральній зоні дроту. Слід відмітити, що дані про мікротвердість на поверхні зразків з інвару відповідають результатам вимірів у поперечному перерізі на відстані  $0,02$  мм від краю зразків. Там, де вдалося достовірно виміряти мікротвердість на відстані  $0,01$  мм від краю зразків, значення  $H_{\mu 50}$  коливалися від  $2700$  до  $7700$  МПа, що, ймовірно, явилось наслідком поверхневої термомеханічної обробки інвару при підготовці шліфів до досліджень.

Для визначення розмірів зерна шліфи піддавали травленню протягом однієї години в реактиві, що містить  $4$  г пікринової кислоти,  $8$  крапель соляної кислоти та  $10$  мл етилового спирту. Було встановлено, що в поперечному перерізі прутків і дроту зерно має рівноважну форму, а в поздовжньому перерізі витягнуто вздовж напрямку прокатки та волочіння, при чому переважне орієнтування зерен більш наочно виражено у дроті (табл. 2).

Зменшення розміру зерен в прутках діаметром 9,05 мм після відпуску при 315 °С було пов'язане з тим, що у вихідній аустенітній структурі з'явилися «бульбашки»  $\alpha$ -фази більш дрібних розмірів, ніж  $\gamma$ -фаза. Холодний наклеп сприяє незначному зменшенню розміру зерна у поперечному перерізі дроту, а в поздовжньому перерізі – дробленню аномально великого зерна і зменшенню розмірів інших зерен, що вимірюються перпендикулярно напрямку волочіння. В наслідок цього середній умовний діаметр зерен зменшується майже в 2 рази.

Таблиця 1

**Механічні властивості інвару після різних режимів термомеханічної обробки**

Сортамент	Режим обробки	$\sigma_e$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$
		Н/мм <sup>2</sup>		%	
Пруток (Ø9,05 мм)	«1»*	455	260	40	78
	«2»	470	310	38	82
	«3»	450	300	37	81
	«4»	450	290	48	78
Пруток (Ø5,02 мм)	«5»	850	780	12	64
	«6»	840	780	14	65
	«7»	840	750	12	62
Дріт (Ø2,56 мм)	«5»	860	840	2,6	46
	«6»	860	850	1,6	39
	«7»	870	850	2,3	42
	«8»	460	270	42	72
Дріт (Ø2,02 мм)	«5»	865	845	2,5	44
	«6»	860	850	1,5	37
	«7»	875	855	2,0	40
	«8»	460	275	42	71

\* дані [1]

Таблиця 2

**Мікротвердість та розмір зерна прутків та дроту з інвару**

Сортамент	Режим обробки	Мікротвердість, МПа		Розмір зерна, мкм	
		в поперечному перерізі	на боковій поверхні	в поперечному перерізі	в поздовжньому перерізі
Пруток (Ø9,05 мм)	«2»	1510	1860	5,0	8,3
	«3»	1680	1840	6,2	9,5
	«4»	1770	1940	4,6	7,7
Дріт (Ø5,02 мм)	«5»	2200	2640	4,5	5,0
	«6»	2260	2620	6,0	5,0
	«7»	2060	2600	4,5	4,0

За даними табл. 3, у гарячекатаного прутка, що зазнав відпалу та відпуску, ТКЛР в інтервалі 20 ... 100 °С з часом збільшується до  $(2,5...2,7) \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup>.

Холодне волочіння при  $\Sigma\mu = 3,58$  з будь-якими режимами термічної обробки забезпечує отримання інвару зі стандартним значенням ТКЛР навіть через 2000 годин після деформації. Збільшення сумарної витяжки до  $\Sigma\mu = 12,50$  і 20,07 дозволяє при будь-яких режимах термомеханічної обробки і витримці понад 1000 годин одержати дріт з інвару зі стабільним у часі ТКЛР  $\leq 1,0 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup>.

Інтенсивний наклеп при холодному волочінні прутків стимулює зменшення магнітострикційної складової їх об'єму при подальшому нагріванні дроту до 50 ... 100 °С, про що свідчать значення ТКЛР < 0. Після стандартної термічної обробки інвару із застосуванням старіння (режим «8») також маємо ТКЛР < 0. Це слід враховувати при використанні інвару у якості пасивних елементів термобіметалів, які тарують на спрацьовування при температурах, що знаходяться в діапазоні 20 ... 100 °С. Зокрема, чутливість термобіметалів в інтервалі 20 ... 100 °С, яка розраховується за різницею ТКЛР активного і пасивного елементів [3], буде визначатися (табл. 2, режим «8») величиною ТКЛР, що дорівнює (для дроту Ø2,02 мм):  $-1,2 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> (в інтервалі 20 ... 50 °С);  $[0,5 - (-1,2)] \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> =  $1,7 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> (в інтервалі 50 ... 80 °С);  $[0,8 - 0,5] \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> =  $0,3 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> (в інтервалі 80 ... 100 °С).

Кінетика змінення ТКЛР показує, що максимум стабільності ТКЛР відповідає інтервалу температур 80...100 °С. Для прутків та дроту діаметром 9,05 і 5,02 мм ТКЛР в процесі природного старіння несуттєво збільшується, тоді як в дроті діаметром 2,56 і 2,02 мм в інтервалі температур 80 ... 100 °С значення ТКЛР максимальні безпосередньо після термічної обробки і мінімальні після витримки 2000 годин. Виявлену аномалію змінення ТКЛР при витримці підтвердили додаткові випробування на дилатометрі.

Таблиця 3

**Значення ТКЛР в залежності від термомеханічної обробки,  
температури випробувань та часу витримки інвару**

Сортамент	Режим обробки	ТКЛР · 10 <sup>-6</sup> град. <sup>-1</sup> в інтервалі від + 20 °С до Т, °С								
		+50			+80			+100		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
Пруток (Ø 9,05 мм)	«1»*	-	-	-	-	-	-	0,8	-	-
	«2»	-	-	1,2	-	-	1,2	-	-	1,3
	«3»	0,5	1,1	1,3	0,8	1,5	1,7	1,0	2,5	2,5
	«4»	0,5	1,1	1,3	0,7	1,5	1,5	0,9	2,5	2,7
Пруток (Ø 5,02 мм)	«5»	-1,2	0,5	1,3	-1,1	0,7	1,5	-1,0	0,8	1,7
	«6»	-1,2	0,5	1,1	-1,1	0,9	1,5	0,5	1,0	1,5
	«7»	-0,9	0,5	1,1	0,7	0,7	1,5	0,8	1,0	1,5
Дріт (Ø 2,56 мм)	«5»	-1,5	-1,3	-0,7	1,5	0,6	0,6	1,5	0,6	1,0
	«6»	-1,1	-1,0	-0,9	1,5	0,5	0,5	2,5	1,0	1,0
	«7»	-1,1	-0,9	-0,9	1,5	0,6	0,5	1,8	1,5	1,0
	«8»	-1,6	-1,4	-1,0	0,4	0,5	0,5	1,0	1,1	0,8
Дріт (Ø 2,02 мм)	«5»	-1,6	-1,4	-0,8	1,4	0,8	0,7	1,4	0,8	1,0
	«6»	-1,2	-1,1	-1,0	1,4	0,6	0,5	2,2	0,8	1,0
	«7»	-1,2	-1,0	-0,9	1,3	0,5	0,4	1,7	1,5	1,0
	«8»	-1,7	-1,6	-1,2	0,3	0,4	0,5	1,0	1,0	0,8

\* дані [3].  
Позначки: I – випробування одразу після обробки;  
II, III – випробування після витримки 1000 та 2000 годин відповідно.

### Висновки

Встановлено, що дріт з інвару зі стабільним значенням ТКЛР  $\leq 1,0 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> в інтервалі температур 20 ... 100 °С можна отримати шляхом холодного волочіння з сумарною витяжкою  $\Sigma\mu \geq 12,50$ . Показано, що для досягнення стандартного значення ТКЛР  $\leq 1,5 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> сумарну витяжку при волочінні можна зменшити до  $\Sigma\mu = 3,58$ . В обох випадках фінішна термічна обробка не потрібна, що суттєво поліпшує техніко-економічні показники термомеханічної обробки інвару. Визначено, що наклеп при холодному волочінні дроту з інвару визиває збільшення властивостей міцності майже в 2 рази і різке зниження відносного подовження. Експериментальним шляхом встановлено, що сумарна витяжка  $\Sigma\mu = 3,58$  при волочінні прутка підвищує на 20 ... 45 % мікротвердість дроту, зменшує розмір зерна та його різницю в поперечному та поздовжньому перерізі дроту.

### Література

1. Афанасьев В.К. Инвары / В.К. Афанасьев [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 126 с.
2. Гапонова О.П. Сталі та сплави з особливими властивостями / О.П. Гапонова, А.Ф. Будник. – Суми: СумДУ, 2013. – 241 с.
3. Арзамасов Б.Н. Справочник по конструкционным материалам / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. – 640 с.
4. Harrison N.J. Thermal expansion coefficient in in Invar processed by selective laser melting / N.J. Harrison, I. Todd, K. Mumtaz // Journal of Materials Science September, 2017. – v. 52. – Issue 17. – P. 10517-10525.
5. Takenaka K. Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion / K. Takenaka // Science Technology Advanced Materials. – 2012. – No. 13 (1). – 013001. – Published online 2012 Feb. 2. DOI: [10.1088/1468-6996/13/1/013001](https://doi.org/10.1088/1468-6996/13/1/013001).
6. Анищенко А.С. Совершенствование технологии волочения проволоки из сплава 36Н / А.С. Анищенко, Е.В. Анищенко // Вопросы материаловедения. – 1996. – № 1 (40). – С. 25-29.

Поступила в редакцію 11.09.2017

Anishchenko O.S., Kukhar V.V., Pryisyazhnyi A.G. **Influence of thermomechanical processing to invar wire properties.**

The article contains information on thermomechanical processing of rolled metal and wire from invar. Thermomechanical treatment of Invar contained operations of pressure treatment in the form of rolling and drawing, as well as heat treatment in the form of quenching, tempering and aging. The authors investigated 8 treatment regimes: «1» – hot rolling + quenching from 840 °C in water + tempering at 315 °C during 1 h + cooling with the furnace (standard mode according to GOST 14082); «2» – hot rolling; «3» – hot rolling + annealing at 850 °C during 30 min with cooling in air; «4» – hot rolling + tempering at 315 °C during 1 h; «5» – hot rolling + cold drawing; «6» – hot rolling + annealing at 850 °C during 30 min with air cooling + cold drawing; «7» – hot rolling + tempering at 315 °C during 1 h + cold drawing; «8» – hot rolling + cold drawing + hardening from 830 °C in water + tempering at 315 °C during 1 h + aging at 95 °C during 48 h. Authors have established that the cold drawing of a wire from invar with a draw ratio of 12.5 provides: at temperatures of 20...50 °C, the thermal expansion coefficient (TEC) < 0, and in the temperature range of 20...100 °C – a stable value of  $TEC \leq 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$  after 1000 and 2000 h of aging. Cold wire drawing with an hood wire stretching of 3.58 provides a standard value of  $TEC \leq 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$  if the drawing is the last operation of thermomechanical invar treatment.

**Key words:** invar, wire, drawing, thermal expansion coefficient, hardening, tempering, aging.

### References

1. Afanasiev V.K. [i dr.]. Invary, Novokuznetsk, SibGIU, 2006, 126 p.
2. Gaponova O.P., Budnik A.F. Stali ta splavy z osoblyvymy vlastyvoostiamy, Sumy, SumDU, 2013, 241 p.
3. Arzamasov B.N. [i dr.]. Spravochnik po konstruktsionnym materialam, Moscow, Izd-vo MGTU im. Baumana, 2005, 640 p.
4. Harrison N.J., Todd I., Mumtaz K. Thermal expansion coefficient in in Invar processed by selective laser melting, *Journal of Materials Science*, 2017, September, v. 52, issue 17, pp. 10517-10525.
5. Takenaka K. Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion, *Science Technology Advanced Materials*, 2012, Feb, 13 (1): 013001. Published online 2012 Feb 2. DOI: [10.1088/1468-6996/13/1/013001](https://doi.org/10.1088/1468-6996/13/1/013001).
6. Anishchenko A.S., Anishchenko E.V. Soverchenstvovanie tehnologii volochenya provoloki iz splava 36H, *Voprosy materialovedenya*, 1996, No. 1 (46), pp. 25-29.