

УДК 621.78

к.т.н. Кучма С. Н.,  
Стародубов С. Ю.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛИНВАРНЫХ СПЛАВОВ

*Разработана установка для термомеханической обработки элинварных сплавов, обеспечивающая повышение эффективности её проведения за счёт совмещения в одном устройстве процессов пластической деформации (волочения) и старения под нагрузкой (динамического старения).*

**Ключевые слова:** элинварный сплав, установка, термомеханическая обработка, динамическое старение, волочение.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Элинварные сплавы — это прецизионные безуглеродистые сплавы системы «железо-никель» с аномальным характером зависимости модуля упругости  $E$  от температуры. В эксплуатационном интервале температур (как правило  $-60...+85$  °С) значения температурного коэффициента модуля упругости (ТКМУ) этих сплавов положительные или близки к нулю.

Элинварные сплавы являются основным и практически единственным конструкционным материалом для изготовления упруго-чувствительных элементов (УЧЭ) приборов и изделий радиоэлектронной промышленности, например, таких как плоские, спиральные и геликоидальные пружины, пружины часовых механизмов, ультразвуковые линии задержки, резонаторы электромеханических фильтров, барокоробки, сильфоны, звукопроводы, трубки Бурдона и т. д. Работоспособность УЧЭ обеспечивается сочетанием оптимального уровня комплекса специальных термоупругих свойств элинварных сплавов: высокой ( $Q > 15000$  ед.) добротностью при близких к нулю значениях ТКМУ и температурного коэффициента частоты (ТКЧ).

Как показано в работе [1], перспективным технологическим методом формирования оптимального уровня комплекса специальных термоупругих свойств элинварных сплавов является термомеханиче-

ская обработка (ТМО), а именно — динамическое старение. Согласно [2], динамическое старение элинварных сплавов — это дополнительное старение с приложением растягивающего механического напряжения, проводимое при температуре, более низкой, чем температура их основного старения. При динамическом старении происходит дораспад твёрдого раствора с образованием полигонизированных структур, закреплённых частицами избыточных фаз, что приводит к повышению прочностных и специальных термоупругих свойств сплава.

Однако промышленное применение динамического старения элинварных сплавов требует создания специального оборудования, что обуславливает актуальность вопроса повышения технико-экономических показателей данного процесса.

**Постановка задачи.** Целью работы является усовершенствование технологической установки динамического старения дисперсионно-твердеющих элинварных сплавов типа 45НХВТЮ для повышения технико-экономических показателей процесса.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1) установить основные направления совершенствования установок для термомеханической обработки сталей и сплавов и выбрать наиболее перспективные из них с точки зрения технологии элинварных сплавов;

2) разработать принципиальную схему установки для термомеханической обработки дисперсионно-твердеющих элинварных сплавов типа 45НХВТЮ и определить её основные технологические параметры;

3) определить количественные значения основных технических показателей разработанной установки и оценить эффективность предложенной схемы.

**Изложение материала и его результаты.** Термомеханическая обработка является одним из сравнительно новых направлений обработки, соединяющей термическое и механическое воздействие на сплав. Этим объясняется то, что проблемам термомеханической обработки сталей и сплавов уделяется большое внимание. Основными направлениями исследований являются:

– изучение влияния ТМО на структуру и свойства сталей и сплавов;

– перспективы применения данного вида обработки для получения высокого уровня механических свойств металлических материалов;

– поиск и разработка новых схем ТМО.

Однако, как показывает анализ доступных авторам литературных источников, работ, посвящённых исследованиям непосредственно технологии и оборудования для проведения ТМО, относительно немного. Тем не менее, проведённый авторами анализ изобретений и полезных моделей, относящихся к оборудованию для ТМО сталей и сплавов [3], позволил выявить следующие актуальные направления их развития и совершенствования:

– разработка устройств, обеспечивающих получение объёмно-деформированного состояния материала с формированием направленного характера волокон;

– расширение методов воздействия на обрабатываемый материал, например, применение виброударной нагрузки в процессе ТМО;

– повышение качества обработки, в том числе и за счёт исключения повреждения поверхностного слоя в процессе её проведения;

– повышение производительности процесса за счёт совмещения операций формообразования и ТМО;

– расширение технологических возможностей установок для ТМО, например, за счёт обеспечения обработки изделий различного сечения.

При проектировании оборудования для ТМО элинварных сплавов также следует учитывать, что изготавливаемые из этих сплавов УЧЭ имеют относительно небольшие габариты. Одним из основных видов полуфабрикатов для изготовления УЧЭ, например резонаторов электромеханических фильтров, являются прутки малого диаметра. На рисунке 1 представлены варианты технологического процесса получения прутков  $\varnothing 3,4 \pm 0,15$  мм из элинварных сплавов. Исследования проведены для сплава марки 44НХМТ [1] и вновь разработанного [4] марки 45НХВТЮ.

Исходной заготовкой в обоих случаях являлась проволока диаметром 4,5 мм, полученная по технологическому процессу, приведённому в [1]. Исходный уровень специальных термоупругих свойств проволоки составлял:  $Q < 8000$  ед,  $TKЧ < -15 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Проволока подвергалась холодной деформации — волочению со степенью обжатия  $\varepsilon = 43 \%$  на волочильном стане барабанного типа. Для повышения пластических свойств перед волочением проволоку подогревали до температуры 250...400 °С, т. е. ниже температуры рекристаллизации исследуемых сплавов.

Затем часть полученных образцов проходила динамическое старение при температуре 500...750 °С с приложением растягивающего усилия 630...650 Н и выдержкой под напряжением в течение 25 минут.

Вышеуказанная ТМО проводилась в лабораторных условиях.

Полученные таким образом прутки разрезались на заготовки длиной  $110 \pm 1,0$  мм на абразивно-отрезном станке 8В220.

Дальнейшая обработка заготовок, получаемых по базовому варианту, и заготовок из элинварного сплава 44НХМТ, получаемых

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

по предлагаемому варианту процесса обработки (рис. 1), заключалась в их старении (достаривании), которое проводилось в вакуумной печи ОКБ–704 в течение 2-х часов.

На каждой стадии технологического процесса по методикам, приведённым в [1], определялся уровень специальных термоупругих свойств образцов. Обобщённые результаты измерений приведены в таблице 1.

Полученные экспериментальные данные (табл. 1) подтверждают, что ТМО элинварных сплавов является эффективным процессом, позволяющим обеспечить требуемый уровень специальных термоупругих свойств как в структуре комбинированной деформационно-термической об-

работки (сплав 44НХМТ), так и самостоятельно (сплав 45НХВТЮ).

Однако промышленное внедрение ТМО элинварных сплавов требует разработки и усовершенствования специального оборудования.

Изучение технологического процесса получения прутков малого диаметра из элинварных сплавов (рис. 1) и вышеперечисленных актуальных направлений развития и совершенствования оборудования для ТМО позволяет сделать вывод, что наиболее перспективным путём разработки такой установки является усовершенствование существующей волочильной установки [5].

Схема предлагаемой установки для термомеханической обработки приведена на рисунке 2.

Стадии процесса	Заготовительная	Базовый вариант	Предлагаемый вариант	
	Формообразование 1		Элинвар 44НХМТ	Элинвар 45НХВТЮ
	Термическая 1	Проволока $\varnothing 4,5$ мм, закалённая от 1 050° С		
	Формообразование 2	Холодная деформация: барабанное волочение с $\varnothing 4,5$ до $\varnothing 3,4$ мм		
	Термическая 2		Динамическое старение $\sigma=40$ МПа; 500...750° С	
			Разрезка на заготовки длиной $110 \pm 1,0$ мм	
		Старение 500...800° С	Достаривание 500...700° С	
		Пруток $\varnothing 3,4 \pm 0,15 \times 110 \pm 1,0$ мм		

Рисунок 1 Варианты технологического процесса получения прутков из элинварных сплавов

Таблица 1

Уровень специальных термоупругих свойств элинварных сплавов

Вариант технологического процесса	Марка сплава	Холодная деформация		ТМО (динамическое старение)		Старение (достаривание)	
		$Q$	$TKЧ \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$Q$	$TKЧ \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$Q$	$TKЧ \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Базовый	44НХМТ	6500	-13,5...-19,5	–	–	32000*	+1,6...-1,3*
	45НХВТЮ	15000	-3,0...+3,0	–	–	–	–
Предлагаемый	44НХМТ	6500	-13,5...-19,5	14500	-3,0...+3,0	34000	+2,0...-2,0
	45НХВТЮ	15000	-3,0...+3,0	35000	+1,5...-1,5	–	–

Примечание: \* — зависимость специальных термоупругих свойств элинвара 44НХМТ от температуры старения носит выраженный экстремальный характер [1]. В таблице приведено наилучшее достигнутое сочетание уровней специальных термоупругих свойств, обеспечиваемое при старении элинвара 44НХМТ в узком интервале температур:  $570 \pm 5$  °С.

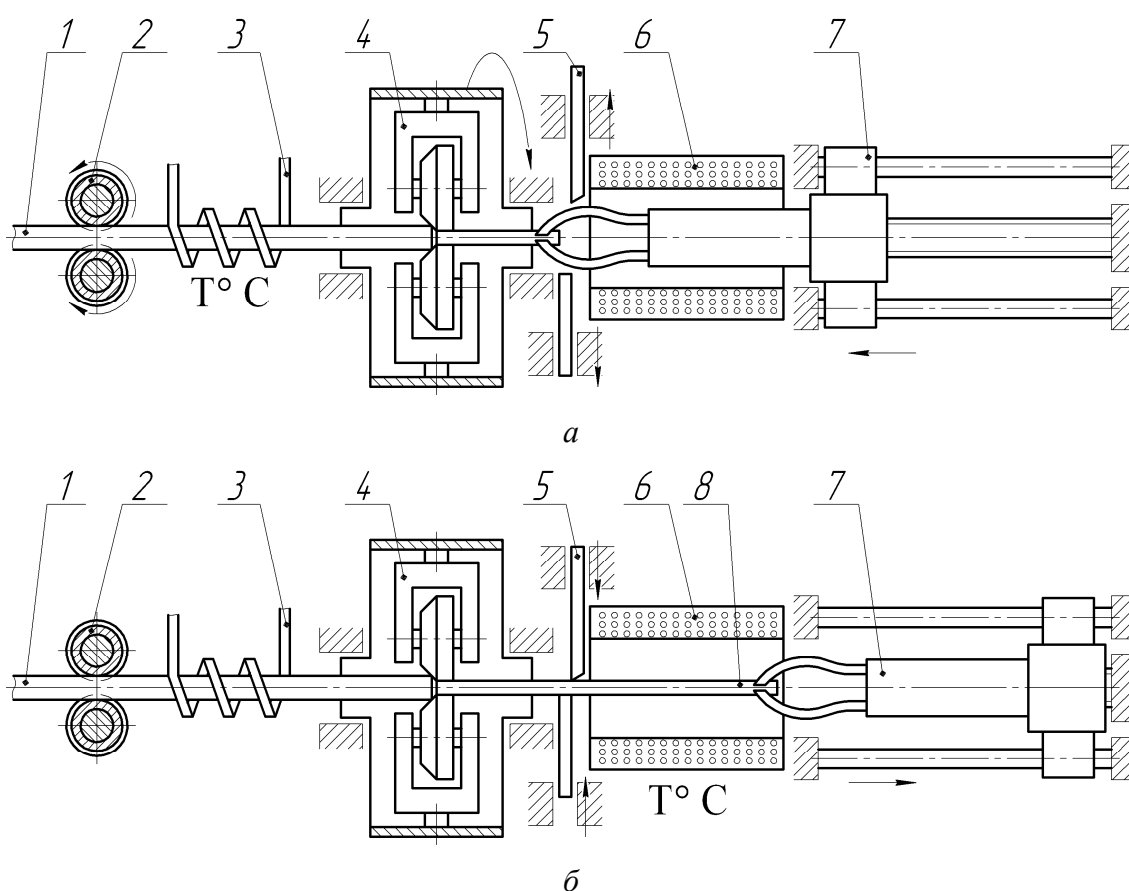


Рисунок 2 Установка для термомеханической обработки элинварных сплавов

Установка включает подающие ролики 2, индуктор предварительного подогрева проволоки 3, деформирующую головку 4, индуктор нагрева прутка 6, тянущее устройство 7 и механизм отрезки прутка 5.

Цикл работы установки следующий. В начале цикла (рис. 2, а) подающие ролики 2 обеспечивают захват и подачу проволоки 1 к деформирующей головке 4. Между подающими роликами и деформирующей головкой расположен индуктор предварительного подогрева проволоки 3. Индуктор подогревает проволоку, обеспечивая некоторое повышение пластичности материала. Температура нагрева не превышает температуру рекристаллизации обрабатываемого сплава и может регулироваться в пределах  $250...400^{\circ}C$ .

Тянущее устройство 7 смещается в крайнее левое положение и захватывает проволоку у деформирующей головки 4.

Деформирующая головка 4 состоит из трёх свободно вращающихся роликов, расположенных равномерно по окружности полого шпинделя. В процессе волочения головка вращается с частотой  $250...350 \text{ мин}^{-1}$ , обжимая проволоку. Степень обжатия составляет  $40...60\%$ .

Тянущее устройство 7, перемещаясь вправо от начального положения, протягивает проволоку через деформирующую головку со скоростью  $v=7...10 \text{ м/мин}$ . Величина тянущего усилия определялась по формуле, предложенной Р. Б. Красильщиковым для стандартных условий волочения:

$$P = K \cdot d^2 \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \sigma_v, \quad (1)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий условия волочения;  $d$  — диаметр исходной проволоки, мм;  $\varepsilon$  — единичное обжатие;  $\sigma_v$  — временное сопротивление разрушению обрабатываемого материала, МПа.

Под стандартными условиями волочения подразумевается:

- подготовка поверхности исходной проволоки согласно [1];
- угол рабочего конуса роликов деформирующей головки  $2\alpha = 12^\circ$ ;
- применение при волочении смазки на основе мыльного порошка.

В указанных условиях единичное обжатие прутков из сплава 45НХВТЮ ( $\sigma_s = 1210$  МПа) с  $\varnothing 4,5$  мм до  $\varnothing 3,4$  мм требует приложения тянущего усилия  $P = 9,6$  кН. Мощность, требуемая на волочение, при этом составляет  $N = 1,1 \dots 1,6$  кВт.

В конце рабочего хода тянущего устройства оно останавливается в правом крайнем положении (рис. 2, б) и развиваемое им усилие снижается до величин, при которых производится динамическое старение:

$$P_{ДС} = (0,24 \dots 0,47) \cdot \sigma_m \cdot d_1^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_m$  — предел текучести обрабатываемого материала, МПа;  $d_1$  — диаметр прутка после волочения, мм.

Для динамического старения прутков  $\varnothing 3,4$  мм из сплава 45НХВТЮ ( $\sigma_m = 1160$  МПа) величина расчётной нагрузки составляет  $P_{ДС} = 3,2 \dots 6,3$  кН.

Также в конце рабочего хода тягового устройства индуктор предварительного нагрева проволоки 3 отключается, включается индуктор нагрева прутка 6 и нагревает пруток 8 до заданной температуры динамического старения ( $500 \dots 700$  °С). Как установлено в работе [1], эливарные сплавы весьма чувствительны к температурному режиму термообработки. Поэтому контроль температуры осуществляется фотоэлектрическим пирометром с погрешностью измерений не более  $\pm 2$  °С и временем отклика не более 250 мс.

По истечении заданного времени динамического старения реле времени отключает индуктор нагрева прутка 6, одновременно запуская механизм отрезки прутка 5 (рис. 2, б).

Основные технические характеристики предлагаемой термоволоочильной установки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Техническая характеристика термоволоочильной установки

Параметр	Значение
Скорость деформации, $v$ , м/мин	7...10
Ход тянущего устройства, мм	1 500
Мощность привода тягового элемента, кВт	4,0
Наибольшее тяговое усилие, $P$ , кН	2,6
Температура динамического старения, °С	500...700
Точность поддержания температуры динамического старения, °С	$\pm 3$
Мощность индуктора нагрева прутка, кВт	2,5
Температура подогрева проволоки, °С	250...400
Мощность индуктора подогрева проволоки, кВт	1,5

Таким образом, разработанная схема термоволоочильной установки обеспечивает совмещение операций формообразования (волочение) и ТМО (динамическое старение).

Факторами, обеспечивающими повышение технико-экономических показателей ТМО эливарных сплавов с применением предлагаемой установки, являются:

1. Снижение брака по уровню специальных термоупругих свойств прутков, что

обусловлено применением более совершенной схемы контроля температуры динамического старения, характеризующейся малой погрешностью определения температуры ( $\pm 3$  °С) и малой инерционностью (не более 1 с).

2. Сокращение длительности производственного цикла за счёт отсутствия пролёживания прутков между операциями волочения и динамического старения.

3. Снижение энергоёмкости процесса. Так как на операцию динамического старения приходит предварительно нагретый в процессе волочения прутки, снижение энергоёмкости составляет 1,35 кВт на одну заготовку  $\varnothing 3,4 \times 1500$  мм.

4. Сокращение потребности в производственных площадях за счёт большей компактности разработанной схемы термоволочильной установки.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Применение ТМО эливарных сплавов в промышленных условиях тре-

бует разработки эффективных схем специального оборудования для её осуществления.

Перспективным направлением создания данного оборудования является совмещение в нём операций формообразования и собственно ТМО. Факторами, обуславливающими в этом случае повышение технико-экономических показателей, являются: снижение брака по уровню специальных термоупругих свойств, сокращение длительности производственного цикла, снижение энергоёмкости процесса и сокращение потребности в производственных площадях.

#### Библиографический список

1. Кучма, С. Н. Улучшение комплекса свойств эливарного сплава 44НХМТ методом комбинированной деформационно-термической обработки [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Кучма Светлана Николаевна ; Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. — Харьков, 2010. — 174 с.

2. Кучма, С. Н. Получение малогабаритных прутков из сплава 44НХТМ методом динамического старения [Текст] / С. Н. Кучма, С. Ю. Стародубов // Стратегія якості у промисловості і освіті : матеріали IV міжнародної конференції. У 2-х томах. Т. 1. — Днепропетровск-Варна : Фортуна-ТУ-Варна, 2008. — С. 350–352.

3. Федеральный институт промышленной собственности. Открытые реестры [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www1.fips.ru/registers-web/>, свободный. — Загл. с экрана. — Описание основано на версии, датир. 18.09.2019.

4. Пат. 79418 Україна, МПК .С22С 19/03 ; С22С 19/05 (2006.01). Еливар на залізонікелевій основі / С. Ю. Стародубов, С. М. Кучма ; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет (ДонДТУ). — № u2012 10821 ; заявл. 17.09.12 ; опубл. 25.04.13, Бюл. № 8. — 4 с. : іл.

5. Шаврин, О. И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин [Текст] / О. И. Шаврин. — М. : Машиностроение, 1983. — 176 с. : ил.

© Кучма С. Н.

© Стародубов С. Ю.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ПуХЛ ЛНУ им. В. Даля Гутько Ю. И., к.т.н., проф. каф. ТОМП ДонГТУ Зелинским А. Н.*

Статья поступила в редакцию 28.10.19.

к.т.н. Кучма С. М., Стародубов С. Ю. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

#### ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ЕЛІВАРНИХ СПЛАВІВ

Розроблено установку для термомеханічної обробки еливарних сплавів, яка забезпечує підвищення ефективності її проведення за рахунок поєднання в одному пристрої процесів пластичного деформування (волочіння) та старіння під навантаженням (динамічного старіння).

**Ключові слова:** еливарний сплав, установка, термомеханічна обробка, динамічне старіння, волочіння.

**PhD in Engineering Kuchma S. N., Starodubov S. Yu. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

**INCREASING OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS  
OF THERMOMECHANICAL TREATMENT OF ELINVAR ALLOYS**

*The treater for thermomechanical treatment of elinvar alloys provide increasing of efficiency of its carrying out due to combination in one device the processes of plastic deformation (drawing) and load ageing (dynamic ageing) is developed.*

**Key words:** *elinvar alloy, treater, thermomechanical treatment, dynamic aging, drawing.*