

*Зинченко А. М., *Кучма С. Н., Стародубов С. Ю.
Донбасский государственный технический университет
E-mail: kuchmalana@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ДОСТАРИВАНИЯ ПРУТКОВ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВА 44НХМТ

Работа посвящена разработке программы, позволяющей определять оптимальный режим достаривания прутков из элинварного дисперсионно-твердеющего сплава 44НХМТ с различным содержанием основных легирующих элементов: никеля, хрома, титана на заготовительном этапе производства изделий.

Ключевые слова: элинварный сплав, добротность, температурный коэффициент частоты, достаривание, заготовительное производство, прутки малого сечения, оптимальный режим, блок-схема, переменные алгоритма.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Для изготовления ряда специфических изделий, применяемых в системах связи, радиоэлектронная промышленность нуждается в малогабаритных прутках элинварного сплава 44НХМТ, обладающих высокой (более 25000 ед.) добротностью Q при значениях температурного коэффициента частоты (ТКЧ) в пределах $\pm 3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ в широком климатическом интервале температур от -60 до $+85 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследования сплава 44НХМТ показали возможность получения малогабаритных прутков с малыми значениями ТКЧ и высокой добротностью [1]. Однако необходимые значения ТКЧ, лежащие в пределах $\pm 3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, обеспечиваются в узком интервале температур окончательного старения. При этом экспериментальные исследования, выполненные на различных образцах, показали, что выбор оптимального режима термического упрочнения должен определяться индивидуально, опытным путем с учетом химического состава партии заготовок. Это сопряжено со значительными производственными издержками.

Целью работы является автоматизация выбора оптимального режима достаривания для прутков из сплава 44НХМТ с различным содержанием основных легиру-

ющих элементов, обеспечивающего оптимальный комплекс требуемых свойств (добротности более 30000 единиц и ТКЧ в пределах $\pm 3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

Объект исследования — процесс автоматизации выбора оптимального режима достаривания прутков малого сечения из элинварного дисперсионно-твердеющего сплава 44НХМТ на заготовительном этапе производства изделий.

Предмет исследования — зависимость режимов достаривания прутков малого сечения из элинварного дисперсионно-твердеющего сплава 44НХМТ от колебаний основных легирующих элементов никеля Ni, хрома Cr, титана Ti.

Задачи исследования:

– выбор и обоснование математической модели зависимости добротности Q и температурного коэффициента частоты ТКЧ элинварного дисперсионно-твердеющего сплава 44НХМТ от концентраций основных легирующих элементов: Ni, Cr, Ti и температур достаривания;

– разработка алгоритма выбора оптимального температурного режима достаривания от колебаний концентраций основных легирующих элементов Ni, Cr, Ti;

– реализация разработанного алгоритма в одной из систем программирования.

Методика исследования. Для определения элинварных свойств дисперсионно-

твердеющего сплава 44НХМТ в работе использован метод подсчета числа свободных колебаний (метод измерения декремента затухания).

Испытываемые образцы (заготовки резонаторов ЭМФ), в зависимости от величины резонансного сигнала, намагничивали током от 1 до 2 А.

Нагрев образцов осуществляли в климатической камере с точностью поддержания температуры ± 1 °С.

Для повышения точности определение резонансной частоты f проводили по III гармонике.

ТКЧ определяли по температурному уходу резонансной частоты в интервале температур $+5...+55$ °С, $+25...-60$ °С и $+25...+85$ °С по формуле

$$TKЧ = \frac{df}{dT} = \frac{f_2 - f_1}{f_1(t_2 - t_1)},$$

где f_1 — резонансная частота при комнатной температуре, Гц;

f_2 — резонансная частота при температуре нагрева (охлаждения), Гц;

t_1 — комнатная температура, °С;

t_2 — температура нагрева (охлаждения), °С.

Для определения добротности был выбран метод подсчета числа периодов свободных колебаний (или метод измерения декремента затухания). Выбранный метод реализует формулу

$$Q = \frac{\pi \cdot N}{\ln \frac{A_1}{A_2}},$$

где N — произвольное целое число периодов,

A_1, A_2 — амплитуды напряжения затухающего колебательного процесса.

При соотношении амплитуд, равном $\frac{A_1}{A_2} = L^{0,1\pi}$, показания счетчика будут соответствовать значению $0,1Q$ (L — длина образца). В этом случае погрешность измере-

ния зависит от погрешности счета и неточности установки порогов компараторов.

Испытания осуществляли на специально разработанном измерительном комплексе, реализующем выбранный метод определения добротности и включающем прибор ПКП-17, работающий совместно с частотомером ЧЗ-34А. Структурная схема измерительного комплекса для определения эливарных свойств представлена на рисунке 1.

Прибор ПКП-17 предназначен для контроля добротности цилиндрических резонаторов, работающих на крутильных колебаниях, и пластинчатых резонаторов, работающих на продольных колебаниях. В основе работы прибора лежит принцип возбуждения магнитострикционных резонаторов гармоническим сигналом и получения свободно затухающих колебаний. Измерение добротности осуществляется частотомером.

Прибор ПКП-17, структурная схема которого представлена на рисунке 2, работает следующим образом. Для получения максимальной величины добротности перед измерением резонатор необходимо обязательно намагнитить током величиной в 1 А в течение 30 секунд. После намагничивания резонатор вставляется в датчик таким образом, чтобы площадь соприкосновения резонатора с его установочной поверхностью была максимальной. Переключаемый генератор обеспечивает девиацию частоты в требуемом диапазоне. Сигналы с переключаемого генератора управляются импульсами тактового генератора и подаются на датчик измерительного прибора с исследуемым резонатором.

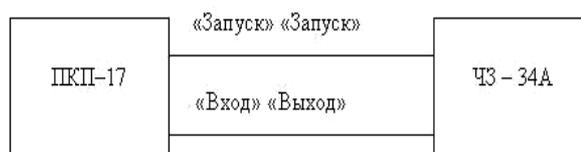
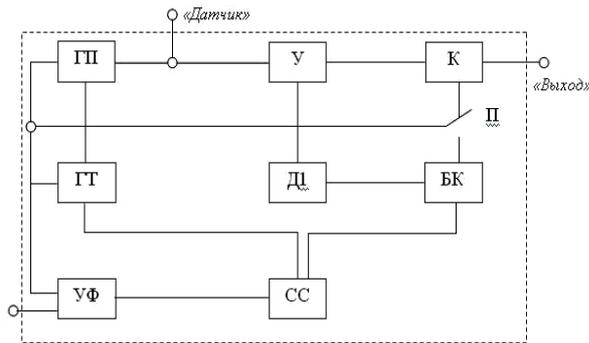


Рисунок 1 — Структурная схема измерительного комплекса для определения эливарных свойств



ГП — генератор перестраиваемый; ГТ — генератор тактовый; К — ключ; У — усилитель; БК — блок компараторов; Д — детектор; УФ — устройство формирующее; П — переключатель; СС — схема совпадения

Рисунок 2 — Структурная схема ПКП-17

О проведении контроля свидетельствует свечение светодиода на лицевой панели прибора. На табло частотомера должно появиться значение контролируемого параметра.

На снимаемый с датчика сигнал «ответа» срабатывает компаратор верхнего уровня. Выход компаратора через схему совпадения запускает формирующее устройство, которое вырабатывает импульсы «запуск» и строб-импульс. Строб-импульс блокирует тактовый и перестраиваемый генераторы на время, достаточное для проведения измерения и визуальной оценки результата. После чего схема возвращается в исходное состояние и процесс измерения повторяется. Переключатель

режима измерения служит для выбора режима измерения. В режиме измерения добротности на ключ подается сигнал с блока компараторов, длительность которого пропорциональна величине добротности резонатора. Сходимость контроля добротности составляет $\pm 7\%$.

Изложение материала. Динамическое старение элинварного сплава 44НХМТ на заготовительном этапе при температуре $700\text{ }^\circ\text{C}$ обеспечивает максимальную добротность прутков, однако требуемое значение ТКЧ при этом обеспечивается в очень узком диапазоне температур [2, 3]. Для расширения диапазона температур, в котором будет обеспечиваться ТКЧ в пределах $\pm 3 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ при высокой добротности более 25000 единиц, заготовки прутков малого сечения из данного сплава подвергаются окончательному старению (достариванию) в интервале температур $500\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$.

Так как экспериментально установлено, что на комплекс физических и элинварных свойств влияют колебания концентрации основных элементов сплава: никеля, хрома и титана (в пределах марочного состава), то температура достаривания для каждой партии заготовок подбирается индивидуально.

В работе [4] установлено, что зависимость между элинварными свойствами и концентрацией основных легирующих элементов сплава описывается полиномами вида

$$Q = a_0(T) + a_1(T) \setminus x_{Ni} - \bar{x}_{Ni} \setminus + a_2(T) \setminus x_{Cr} - \bar{x}_{Cr} \setminus + a_3(T) \setminus x_{Ti} - \bar{x}_{Ti} \setminus ,$$

$$TKЧ_{(-60...+20\text{ }^\circ\text{C})} = b_0(T) + b_1(T) \setminus x_{Ni} - \bar{x}_{Ni} \setminus + b_2(T) \setminus x_{Cr} - \bar{x}_{Cr} \setminus + b_3(T) \setminus x_{Ti} - \bar{x}_{Ti} \setminus ,$$

$$TKЧ_{(+20...+85\text{ }^\circ\text{C})} = c_0(T) + c_1(T) \setminus x_{Ni} - \bar{x}_{Ni} \setminus + c_2(T) \setminus x_{Cr} - \bar{x}_{Cr} \setminus + c_3(T) \setminus x_{Ti} - \bar{x}_{Ti} \setminus ,$$

где $a_0(T)\text{--}c_3(T)$ — коэффициенты регрессии;

x_{Ni} , x_{Cr} , x_{Ti} — фактические концентрации никеля, хрома и титана в сплаве,

\bar{x}_{Ni} , \bar{x}_{Cr} , \bar{x}_{Ti} — средние концентрации никеля, хрома и титана согласно марочному составу.

Однако в производственных условиях, как правило, решается обратная задача: для партии заготовок с известными концентрациями основных легирующих элементов необходимо подобрать режим термической обработки, который обеспечит требуемый комплекс свойств.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Для решения поставленной задачи на основании экспериментальных вышеприведенных моделей разработан алгоритм, блок-схема которого приведена на рисунке 3.

В таблице 1 дано описание переменных алгоритма.

В блоке 2 алгоритма осуществляется формирование массива коэффициентов полиномиальных моделей и установление начальных значений переменных.

В блоках 3–5 осуществляется ввод фактических значений концентраций никеля, хрома и титана рассматриваемой плавки.

Каждый ввод контролируется процедурой обработчика ошибок, что предотвращает ввод значений, выходящих за пределы максимальной и минимальной концентрации элементов (блоки 6–7).

В блоке 9 вычисляются отклонения фактических концентраций элементов от их средних значений по формулам:

$$Cr.D = ABS(Cr.F - Cr.Mid);$$

$$Ni.D = ABS(Ni.F - Ni.Mid);$$

$$Ti.D = ABS(Ti.F - Ti.Mid).$$

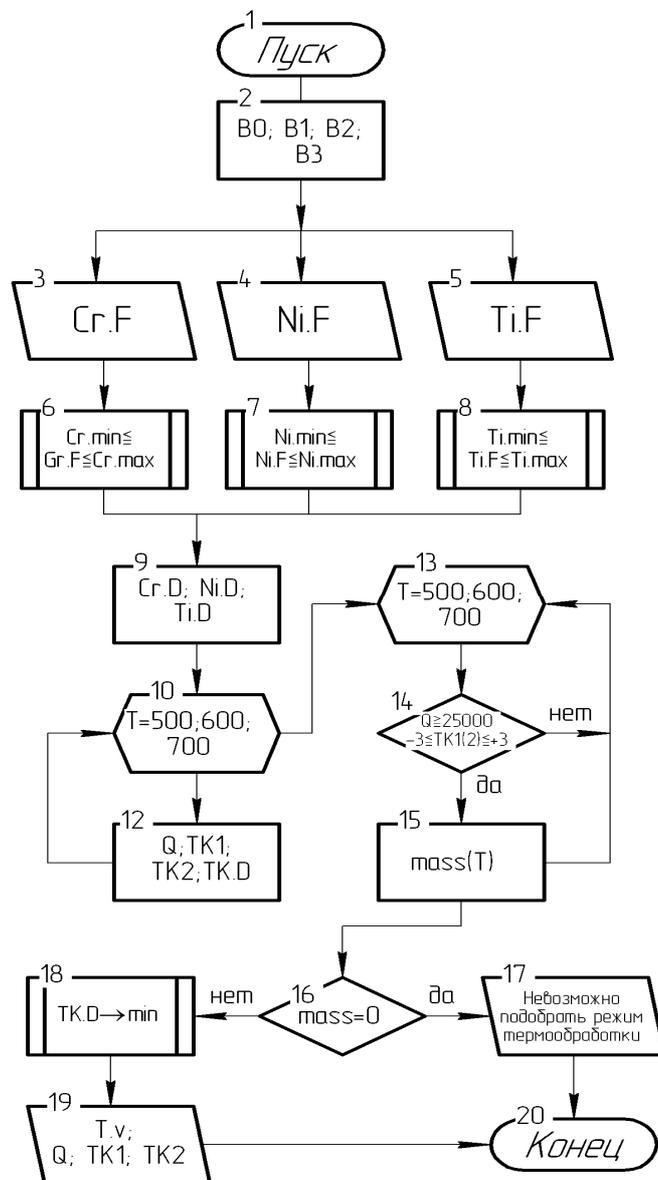


Рисунок 3 — Блок-схема алгоритма выбора режима термообработки

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Затем последовательно в цикле (блоки 10 и 11) для фиксированных значений температуры старения вычисляются значения добротности, ТКЧ и интервала изменения ТКЧ по формулам:

$$Q[T] = B0[Q] + B1[Q] \cdot Ni.D + B2[Q] \cdot Cr.D + B3[Q] \cdot Ti.D;$$

$$TK1[T] = B0[TK1] + B1[TK1] \cdot Ni.D + B2[TK1] \cdot Cr.D + B3[TK1] \cdot Ti.D;$$

$$TK2[T] = B0[TK2] + B1[TK2] \cdot Ni.D + B2[TK2] \cdot Cr.D + B3[TK2] \cdot Ti.D;$$

$$TK.D = ABS(TK1 - TK2).$$

В блоках 13–15 формируется массив значений температур старения, обеспечивающий заданный уровень свойств. С этой целью для полученных значений Q[T], TK1[T], TK2[T] проверяется выполнение условия

$$Q[T] \leq 25000 \text{ AND } ABS(TK1[T]) \leq 3 \text{ AND } ABS(TK2[T]) \leq 3.$$

Таблица 1

Описание переменных алгоритма и программы

Идентификатор	Обозначаемый параметр	Начальное значение	Размерность	Тип данных
Cr.F	Фактические концентрации хрома, никеля и титана в изучаемом сплаве	43,75	%	real
Ni.F		4,65		
Ti.F		2,70		
Cr.Mid	Средние значения концентраций хрома, никеля и титана	43,75	%	real
Ni.Mid		4,65		
Ti.Mid		2,70		
Cr.Min	Минимальные значения концентраций хрома, никеля и титана	43,0	%	real
Ni.Min		3,9		
Ti.Min		2,3		
Cr.Max	Максимальные значения концентраций хрома, никеля и титана	44,5	%	real
Ni.Max		5,4		
Ti.Max		3,1		
Cr.D	Отклонения фактических концентраций хрома, никеля и титана от средних	0	%	real
Ni.D		0		
Ti.D		0		
B0	Массивы значений коэффициентов полиномиальных моделей	–	–	array [1..3]
B1				
B2				
B3				
T	Температура старения сплава	500; 600; 700	°C	Integer
Q	Расчетное значение добротности	–	–	real
TK1	Температурный коэффициент частоты в интервале температур –60...+20 °C	–	–	real
TK2	Температурный коэффициент частоты в интервале температур +20 ... +85 °C	–	–	real
TK.D	Разность значений ТКЧ в интервале температур –60...+20 и +20...+85 °C	–	–	real
massT	Массив значений температуры старения, при которых физические свойства сплава находятся в заданных пределах	0	–	array [1..3]
T.v	Рекомендуемое значение температуры старения			

Если для текущего значения температуры условие выполняется, то это значение температуры записывается в служебную переменную-массив *mass*.

В блоке 16 обрабатывается полученный массив. Если его размерность 0 (нет элементов), то формируется сообщение для пользователя «Невозможно подобрать режим термообработки» (блок 17).

Если в массиве есть значения температур (в общем случае более 1), то запускается процедура блока 18. Эта процедура выбирает из всех температур старения, обеспечивающих заданный комплекс свойств, ту, для которой интервал изменения ТКЧ минимальный. Затем формируется сообщение для пользователя, содержащее найденную температуру старения, а также расчетные значения ТКЧ и добротности сплава при этой температуре, после чего алгоритм завершает свою работу.

На основании вышеприведенных математических моделей и алгоритма разработана прикладная программа для выбора оптимального режима старения. Программа написана на языке программирования Object Pascal и реализована в среде программирования Delphi.

Программа имеет графический интерфейс и работает в оконном режиме на персональных компьютерах под управлением операционной системы семейства Windows. Программа не требует инсталляции.

Пусковым файлом программы является исполняемый файл *Termo.exe*, расположенный на одном из дисков компьютера. После запуска указанного файла на выполнение на дисплей выводится окно ввода исходных данных программы (рис. 4).

Исходными данными для программы являются фактические концентрации в сплаве 44НХМТ никеля, хрома и титана. Пользователь вводит указанные концентрации в соответствующие поля ввода. После ввода указанных величин для получения результатов расчета пользователь должен нажать кнопку <Расчитать!>, и на

экране дисплея будет выведено окно результатов расчета (рис. 5).

Результатами работы программы являются:

- рекомендуемая температура старения;
- расчетные значения добротности Q , ТКЧ_{-60...+20}, ТКЧ_{+20...+85}, достигаемые при рекомендуемом режиме термообработки.

Нажатие кнопки <Вернуться> закрывает окно результатов и возвращает пользователя в главное окно программы, где он может либо повторить расчет, либо завершить работу программы нажатием кнопки <Выход>.

Для оценки адекватности результатов работы программы были определены концентрации легирующих элементов для четырех образцов с помощью масспектрометра OES 8000S. Полученные значения концентраций легирующих элементов приведены в таблице 2.

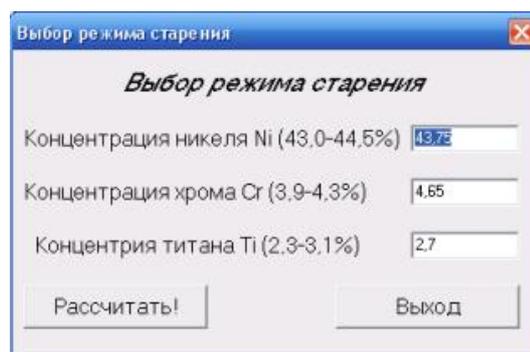


Рисунок 4 — Окно ввода исходных данных программы

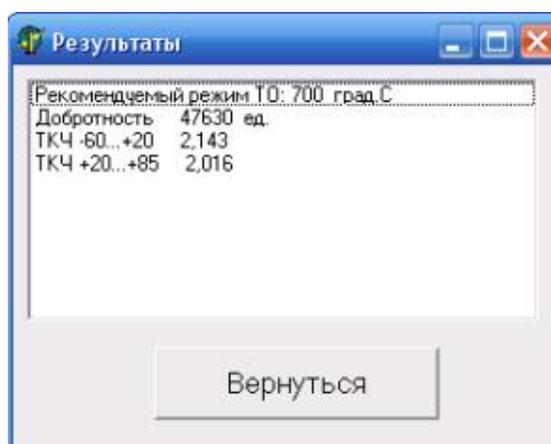


Рисунок 5 — Окно вывода результатов расчета

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 2
Концентрация легирующих элементов
в экспериментальных плавках

Номер образца	Концентрация легирующих элементов, %		
	Ni	Cr	Ti
1	43,5	4,58	3,10
2	44,0	4,70	2,74
3	44,1	3,90	2,50
4	43,8	4,15	3,0

Динамическое старение проводили в печи лабораторной муфельной LF-9/13 при температуре 700 °С с приложением растягивающих напряжений 40 МПа и выдержкой при заданной температуре в течение 25 минут. Степень деформации полученных прутков Ø3,4 мм составила 63–67 %.

Температуру окончательного искусственного старения (достаривания) для каждого образца определяли индивидуально по разработанной программе, с учетом содержания в образце основных легирующих элементов: никеля, хрома, титана.

Температура окончательного старения (достаривания), обеспечивающая требуе-

мый комплекс элинварных свойств (близкие к нулевым значения ТКЧ при высокой добротности), составила:

- для 1-го образца — 600 °С,
- для 2-го образца — 550 °С,
- для 3-го образца — 700 °С,
- для 4-го образца — 600 °С.

Таким образом, используя разработанную программу, определили температуру достаривания и получили ожидаемые значения добротности и ТКЧ.

Фактические значения добротности и ТКЧ были определены на образцах после достаривания при температуре, установленной расчетом по программе, на измерительном комплексе определения элинварных свойств по методу измерения деформации затухания.

В таблице 3 приведены данные по расчетным и измеренным значениям добротности и ТКЧ для вышеприведенных образцов.

Таким образом, разработанная программа дает возможность расчетным путем определять режим достаривания для заготовок из сплава 44НХМТ с различным содержанием основных легирующих элементов.

Таблица 3

Физические и элинварные свойства экспериментальных образцов

Номер образца	Температура достаривания, °С	Добротность		ТКЧ _{-60...+20 °С}		ТКЧ _{+20...+85 °С}	
		расчетная	измеренная	расчетная	измеренная	расчетная	измеренная
1	600	53089	50500	1,98	2,08	1,63	1,55
2	600	48086	45700	2,04	2,14	1,89	1,80
3	700	42758	40600	3,23	3,06	3,22	3,10
4	600	51547	49000	2,40	2,50	2,27	2,16

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработанная программа и проведенные исследования на прутках из элинварного сплава 44НХМТ позволили:

1) определить оптимальный режим окончательного старения (достаривания) для прутков с различным содержанием основных легирующих элементов Ni, Cr, Ni;

2) обеспечить оптимальный комплекс требуемых свойств (добротности более

30000 единиц и ТКЧ в пределах $\pm 3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) для прутков малого сечения из элинварного сплава 44НХМТ;

3) достичь высокой стабильности качества термомеханической обработки прутка, что в производственных условиях ведет к сокращению брака по элинварным свойствам;

4) сократить сроки технологической подготовки производства.

Список источников

1. Кучма С. Н. Улучшение комплекса свойств эливарного сплава 44НХМТ методом комбинированной деформационно-термической обработки : дисс. ... канд. техн. наук. Харьков, 2010. 186 с.

2. Спосіб отримання малогабаритних прутків з дроту еліварного сплаву : пат. 30882 Україна / С. М. Кучма ; №и200714161, заявл. 17.12.2007 ; опубл. 11.03.2008, Бюл. № 5. 4 с.

3. Кучма С. Н., Стародубов С. Ю. Получение малогабаритных прутков из сплава 44НХМТ методом динамического старения // Стратегия качества в промышленности и образовании : сборник трудов IV международной конференции: в 2 т. Днепропетровск — Варна : Фортуна-ТУ-Варна, 2008. Т. 1. С. 350–352.

4. Оптимизация химического состава сплава 44НХМТ применительно к пруткам, полученным методом динамического старения / С. Н. Кучма, А. П. Любченко, Д. Б. Глушкова, С. Ю. Стародубов // Восточно-европейский журнал новых технологий. 2008. № 35-1. С. 53–65.

© Кучма С. Н., Зинченко А. М., Стародубов С. Ю.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. железнодорожного транспорта
ЛГУ им. В. Даля Киреевым А. Н.,
к.т.н., проф. каф. металлургических технологий ДонГТУ Куберским С. В.**

Статья поступила в редакцию 14.03.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зинченко Андрей Михайлович, канд. экон. наук, доцент, зав. каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Кучма Светлана Николаевна, канд. техн. наук, доцент каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,
e-mail: kuchmalana@mail.ru

Стародубов Сергей Юрьевич, старший преподаватель каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Zinchenko A. M., *Kuchma S. N., Starodubov S. Yu. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: kuchmalana@mail.ru)

AUTOMATED SELECTION OF THE OPTIMUM FINAL AGEING MODE FOR LIGHT SECTION BARS MADE OF 44 HXMT ALLOY

The work is devoted to the development of programme allowing to determine the optimum mode of final ageing bars from elinvar dispersion-hardening 44 HXMT alloy with different content of the main alloying elements: nickel, chromium, titanium at the preparatory stage of products manufacturing.

Key words: elinvar alloy, quality, temperature coefficient of frequency, final ageing, blank production, light section bars, optimum mode, block-scheme, algorithm variables.

References

1. Kuchma S. N. *Improvement of complex properties of elinvar alloy 44 HXMT by the method of combined deformation and heat treatment : thesis ... PhD in Engineering [diss. ... kand. tekhn. nauk.].* Har'kov, 2010. 186 p. (rus)
2. *Method for producing small-sized bars from elinvar alloy wire : pat. 30882 Ukraine / S. M. Kuchma ; No. u200714161 ; submitted 17.12.2007; published 11.03.2008, Bulletin No. 5. 4 p.*
3. Kuchma S. N., Starodubov S. Yu. *Obtaining of small-sized bars from 44 HXMT alloy by dynamic ageing method [Poluchenie malogabaritnyh prutkov iz splava 44NHMT metodom dinamicheskogo stareniya]. Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii : sbornik trudov IV mezhdunarodnoj konferencii : v 2-h tomah. Dnepropetrovsk — Varna : Fortuna-TU-Varna, 2008. Vol. 1. Pp. 350–352. (rus)*
4. Kuchma S. N., Lyubchenko A. P., Glushkova D. B., Starodubov S. Yu. *Optimisation of the chemical composition of 44HXMT alloy as applied to bars obtained by dynamic ageing method [Optimizaciya himicheskogo sostava splava 44 HXMT primenitel'no k prutkam, poluchennym metodom dinamicheskogo stareniya]. Eastern European Scientific Journal. 2008. No. 35-1. Pp. 53–65. (rus)*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zinchenko Andrey Mikhailovich, PhD in Economic Sciences, Assistant Professor, Acting Head of the Department of Technology and Machine-building Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Kuchma Svetlana Nikolayevna, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Technology and Machine-building Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: kuchmalana@mail.ru

Starodubov Sergey Yuriyevich, Senior lecturer of the Department of Technology and Machine-building Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia