М144599

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования

МОСКОВСКОЕ
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

А.В. ВЕЛИЩАНСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ И ДОБРОТНОСТИ ЭЛИНВАРНЫХ СПЛАВОВ

(Специальность 05320 "Металловедение и термическая обработка металлов")

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва

1971

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент В.И.Макарова.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Рахштадт Александр Григорьевич;

кандидат технических наук Шульга Юрий Николаевич.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан "____" _____ 1971 г.

Защита диссертации состоится "____" _____ 1971 г. на заседании Совета факультета Автоматизации и механизации производства МВТУ им. Баумана Н.Э., г.Москва, 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Баумана.

Просим принять участие в работ
отзыв на автореферат диссертации.

Отзыв на автореферат в двух э
просим направлять по указанному вы

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, д

М144599

1144599
Велищанский А.В. Иссл

ВВЕДЕНИЕ

Элинварные сплавы характеризуются малым температурным коэффициентом модуля упругости (γ). Эта особенность элинварных сплавов, позволяющая значительно уменьшить температурную ошибку точных приборов, приобретает особое значение при их использовании в колебательных системах, например, в электромеханических фильтрах. В подобных системах величина термоупругого коэффициента (γ) и внутреннего трения (ψ) сплавов целиком определяет основные рабочие характеристики приборов - температурный коэффициент частоты колебаний (ТКЧ) и добротность (Q).

Развитие и совершенствование техники требует создания новых весьма точных приборов, способных работать при значительных колебаниях температуры, что в свою очередь предъявляет повышенные требования к сплавам для упругих чувствительных элементов. Этим и объясняется большое внимание, уделяемое исследованию свойств элинварных сплавов.

Большинство металловедческих исследований элинварных сплавов проводилось с целью повышения прочностных характеристик, и очень мало работ посвящено изучению влияния различных факторов на основные характеристики элинварных сплавов - термоупругий коэффициент γ и добротность Q .

До настоящего времени далеко не полностью изучено влияние химического состава и термической обработки на величину термоупругого коэффициента и добротность элинварных сплавов. Недостаточно изучены структурные превращения при термообработке, и не установлено влияние структурного состояния на основные рабочие характеристики сплавов. Совершенно отсутствуют сведения о влиянии колебаний химического состава в пределах марок промышленных сплавов и не определены критерии возможности получения на конкретных плавках заданных значений γ, ТКЧ и Q .

Отсутствие указанных выше данных приводит к тому, что на предприятиях, использующих элинварные сплавы, для каждой партии приходится опытным путем подбирать режим термической обработки для получения заданных значений γ, ТКЧ и Q , причем заранее неизвестно, можно ли такие характеристики получить на плавке данного химического состава.

Для элинварных сплавов характерна нестабильность величины термоупругого коэффициента. Эта нестабильность обычно объясня-

ется резкой зависимостью коэффициента Γ от состава твердого раствора, меняющегося вследствие ликвации и колебаний температурного режима термообработки. Однако, количественная оценка влияния указанных факторов, а также других возможных причин нестабильности, до настоящего времени не проводилась.

На основании вышесказанного представляется оправданным проведение комплексного исследования элинварных сплавов, включающего как изучение структурных превращений, так и изучение влияния химического состава, пластической деформации и режима термической обработки на величину ТКЧ и Q . Целью проведенного исследования являлось установление количественных зависимостей между химическим составом, режимом термической обработки и значением основных рабочих характеристик элинварных сплавов.

Решению поставленных вопросов способствовало творческое содружество МВТУ им.Баумана с другими организациями, в первую очередь с Научно-исследовательским институтом радиотехнической аппаратуры. Такое содружество обеспечило проведение измерений рабочих характеристик элинварных сплавов на современном уровне, а также проверку результатов исследования на конкретных изделиях.

ИССЛЕДУЕМЫЕ СПЛАВЫ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТКЧ И Q

Исследовались пять плавок элинварных сплавов типа 42НХТЮ - 45НХТЮ, химический состав которых представлен в таблице I.

Первая плавка - промышленная плавка завода "Электросталь" сплава Н45ХТ. Исследовались пять горячекатанных прутков этой плавки диаметром 15 мм. и длиной 3000 мм.

Остальные плавки были выплавлены опытным заводом ЦНИИЧМ по заказу МВТУ. Каждая из этих плавок была получена в виде горячекатанных прутков диаметром 18 и 25 мм, а также полос 12х120х150 мм.

В качестве образцов для исследования использовались резонаторы, имеющие форму диска толщиной 2,6 мм и диаметром 13,6 мм. В термически упрочненном состоянии резонаторы шлифовались по цилиндрической поверхности и притирались по тор-

МВТУ им. Н. Э. БИБЛИОТЕКА ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Таблица I.

№ плавки	№ прутка	Содержание элементов в вес.%		
		Ni	Al	Ti
I	I	45,50	0,95	2,68
	II	45,8I	0,96	2,65
	У	46,4I	0,85	2,67
2	2I	46,95	0,92	3,05
	22	46,52	0,87	3,05
	23	47,7I	0,93	3,07
3	3I	4I,25	0,90	3,06
	33	4I,2I	0,98	3,06
4	4I	47,80	I,I2	2,52
	42	46,50	I,I0	2,50
	43	46,64	I,I0	2,49
5	5I	42,60	0,86	2,50
	52	42,60	0,97	2,55
	53	42,60	0,97	2,4I

Содержание Cr во всех плавках 5,4-5,6%

Содержание других элементов: $C \leq 0{,}03\%$; $S \leq 0{,}0I\%$; $P \leq 0{,}02\%$; $Mn = 0{,}5\text{-}0{,}8\%$; $Si = 0{,}5\text{-}0{,}7\%$; Fe - остальное.

цу до определенного значения частоты собственных колебаний.

ТКЧ и Q измерялись на установке, включающей генератор стандартных сигналов ГЧ-IA, частотомер Ч3-4, измеритель частоты дисков ИЧД-4 и камеру для нагрева образцов.

При измерении резонатор помещался на специальный датчик, образуя вместе с его электродом обкладки конденсатора. При совпадении частоты подаваемого электрического сигнала с собственной частотой колебаний резонатора амплитуда колебания последнего резонансно увеличивается, что вызывает резкое увеличение показаний микроамперметра ИЧД-4. Частота резонансного колебания резонатора фиксировалась по частотомеру Ч3-4 с точностью $\pm$ 5 гц при средней частоте резонансных колебаний 300 кгц.

ТКЧ образцов определялись в интервале 20-90°С по формуле

$$ТКЧ = \frac{f_{90^\circ C} - f_{20^\circ C}}{70\ f_{20^\circ C}} \qquad (I)$$

В реферируемой работе показано, что

$$ТКЧ = \frac{\gamma + \alpha}{2} \qquad (2)$$

где: γ и α – температурный коэффициент модуля упругости и температурный коэффициент расширения соответственно.

Добротность Q определялась по ширине резонансного пика при 20°С по формуле:

$$Q = \frac{f_{20^\circ C}}{\Delta f} \qquad (3)$$

где: Δf – ширина полосы частот, на которой квадрат резонансной частоты уменьшается в два раза.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ЭЛИНВАРНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Структурные превращения элинварных сплавов при термической обработке в реферируемой работе изучались микроскопическим и рентгенографическим методом, методом измерения твердости, точки Кюри и электросопротивления с использованием общепринятых методик.

Исследовались образцы после закалки от 900 до 1000°С и после отпуска от 600 до 700°С длительностью от 5 мин до 60час.

На основании проведенных исследований, с учетом имеющихся литературных данных, структурные изменения при термообработке могут быть представлены следующим образом.

При нагреве под закалку горячекатанных сплавов происходит растворение вторичных фаз: γ'- фазы $/(Fe,Ni)_3(Ti, Al)/$ и η - фазы (Ni_3Ti), а также укрупнение зерна γ- твердого раствора. При 900°С вторичные фазы полностью не растворяются, зерно остается мелким. Повышенные температуры до 950–1000°С приводит к интенсивному росту зерна и растворению вторичных фаз.

При отпуске происходит прерывистый и непрерывный распад твердого раствора.

На начальных стадиях распада происходит бурный непрерывный распад с образованием γ'- фазы. Эта стадия распада характеризуется быстрым уменьшением параметра кристаллической решетки и точки Кюри и, наряду с этим, быстрым увеличением электросопротивления и твердости.

Увеличение электросопротивления свидетельствует о когерентной связи выделений и матрицы, а малая энергия активации (20-25 $\frac{ккал}{моль}$) и большая скорость выделения свидетельствуют об отсутствии эффективных барьеров процесса. Механизм зарождения γ'- фазы гомогенный.

Другим процессом, происходящим на начальных стадиях распада, является прерывистый распад, развивающийся от границ зерен. Малая площадь зерен, претерпевших прерывистый распад, дает основание считать, что этот процесс не является определяющим на начальных стадиях распада.

Скорость изменения всех измеряемых характеристик резко уменьшается при увеличении времени отпуска до 1-4 часов. На этой стадии распада основными процессами, определяющими изменение свойств, по-видимому, являются прерывистый распад, а также гетерогенное зарождение и рост γ'- фазы. Эти процессы сопровождаются растворением ранее выпавших когерентных частиц γ'- фазы, что и приводит к падению электросопротивления. При высокотемпературном отпуске /650-700°С/ происходит также образование η - фазы. Этот процесс, особенно заметный для сплавов с повышенным содержанием Ti, оказывает большое влияние на изменение свойств сплавов. Образование η - фазы сопровождается растворением γ'- фазы. При этом в твердый раствор, по-видимому, переходят Ni и Al, ранее связанные в γ'-фазе. Такое предположение позволяет объяснить наблюдаемое увеличение параметра кристаллической решетки и точки Кюри при высокотемпературном отпуске рассматриваемой длительности.

Увеличение длительности низкотемпературного отпуска /600-625°С/ до 10-60 часов не приводит к существенному изменению характера распада. Продолжается прерывистый распад, и при 40-60 часовой выдержке зоны прерывистого распада могут занимать более 50% площади шлифа. Параметр кристаллической решетки, точка Кюри и твердость почти не меняются с увеличением выдержки. Электросопротивление падает. При высокотемпе-

ратурном отпуске доминирующим процессом, по-видимому, является процесс образования стабильной η - фазы за счет метастабильной γ'- фазы. Этот процесс сопровождается некоторым повышением параметра решетки и точки Кюри, но не приводит к падению твердости. Явления перестаривания не было обнаружено.

Повышение температуры отпуска приводит, естественно, к ускорению всех процессов распада, и кроме того, меняется соотношение между ними. Так, с повышением температуры отпуска от 600 до 700°С увеличивается удельный вес прерывистого распада и ускоряется образование η - фазы. Последний процесс при высокотемпературном отпуске / 650-700°С / оказывает заметное влияние на свойства сплавов при 4-х часовом отпуске, принятом в практике термообработки элинварных сплавов.

Значения точки Кюри и параметра кристаллической решетки γ- твердого раствора после 4-х часовой и более длительной выдержки при низкотемпературном отпуске ниже, чем при высокотемпературном. Это свидетельствует о большем обеднении твердого раствора Ni и Al / или Ni , Al и Ti / при отпуске 600 и 625°С, чем при отпуске 650-700°С.

Повышение температуры закалки от 900 до 1000°С, приводящее к увеличению однородности твердого раствора, усиливает гомогенное образование γ'- фазы. Удельный вес прерывистого распада и гетерогенного зарождения γ'- фазы уменьшается. Это проявляется прежде всего в более значительном увеличении электросопротивления при малых и средних (2-4 час) выдержках при отпуске сплава, закаленного от высоких температур.

Проведенное исследование выявило также большое влияние содержания Ti в сплаве на процесс распада твердого раствора при отпуске. Повышение содержания Ti сказывается в ускорении образования стабильной η - фазы: в плавках 2 и 3 переход γ'- фазы в η - фазу сдвигается в сторону меньших температур отпуска и меньшей его длительности.

Проведение холодной пластической деформации перед отпуском приводит к усилению гетерогенного распада и, очевидно, ускоряет образование η - фазы.

Микроскопический анализ выявил неоднородность структуры после всех режимов термообработки. Эта неоднородность

выражается в распределении по шлифу зон прерывистого и непрерывного распада, а также в значительной разнозернистости сплавов. Можно предположить также, что неоднородно и соотношение между количеством γ'- фазы и η-фазы от участка к участку образца. Эта "нестабильность распада" является одной из причин нестабильности рабочих характеристик элинварных сплавов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ТКЧ И ДОБРОТНОСТЬ ЭЛИНВАРНЫХ СПЛАВОВ

Исследовалась кинетика изменения ТКЧ и Q всех пяти плавок при четырех температурах отпуска длительностью до 60 час. Кроме того, после закалки с трех различных температур и 4-х часового отпуска определялись рабочие характеристики резонаторов, изготовленных из разных прутков каждой плавки. В этом случае на каждый режим термической обработки обрабатывалось от 10 до 150 резонаторов, что позволило повысить достоверность результатов исследования и выявить влияние ликвации на рабочие характеристики сплавов.

Некоторые из полученных результатов приведены в табл.2 (Время отпуска 4 часа).

Значения ТКЧ плавок 1,2,4 и 5 резко увеличиваются в первые минуты отпуска /5-30 мин/. Затем скорость увеличения этой характеристики снижается. При больших выдержках /более 4-8 часов/ зависимость "ТКЧ-τ" определяется температурой отпуска: при 600-625°С значения ТКЧ продолжают медленно возрастать, а при 650-700°С - падают.

Повышение температуры закалки от 900 до 1000°С во всех случаях приводит к увеличению ТКЧ. При средних и длительных выдержках повышение температуры отпуска от 600-625°С до 650-700°С приводит к повышению ТКЧ плавок 1,4 и 5, а значения ТКЧ плавки 2 при этом уменьшаются.

В плавке 3 увеличение ТКЧ наблюдается лишь в первые минуты низкотемпературного отпуска, которое затем сменяется резким уменьшением этой характеристики. При средних и длительных выдержках алгебраические значения ТКЧ плавки 3 тем выше, чем выше температура отпуска / см. табл.2 /.

Добротность сплавов в закаленном состоянии тем выше, чем

Таблица 2.

Режим Т.О.		Значения ТКЧ $\times 10^{-6}$ $\left[\frac{1}{^{o}C}\right]$ прутков:				
Тзак	Тотп	II	2I	3I	42	52
	-	-23	-26	+I6	-32	-I
	600	+2	-6	-32	-6	+32
900	625	0	-4	-38	-6	+34
	650	+4	-2	-34	-3	+43
	700	+5	-8	-2	-5	+42
	-	-23	-32	+I6	-32	-4
	600	+4	+4	-64	-4	+30
950	625	+6	+8	-60	-2	+35
	650	+8	-I	-46	+3	+44
	700	+I3	-2	-7	+3	+46
	-	-23	-34	+I2	-34	-5
	600	+I0	+8	-64	+2	+28
I000	625	+I0	+I0	-58	0	+36
	650	+II	+6	-52	+4	+47
	700	+I6	+6	-I6	-5	+48

ниже температура закалки. Например, добротность плавки I после закалки от 900°С составляет в среднем 5500, после закалки от 950°С - 4500 и после закалки от I000°С- 3500.

Отпуск приводит к увеличению добротности, причем это увеличение тем более заметно, чем ниже температура отпуска. При средней длительности отпуска максимальная добротность /I0000-II000/ соответствует закалке от 900°С и отпуску при 600-625°С, а минимальная /4000-5000/ - закалке от I000°С и отпуску при 700°С.

Качественное объяснение полученным результатам можно дать на основании известной кривой аномалии коэффициента β Fe-Ni сплавов, полученной Шевенаром. Согласно этой зависимости, термоупругой коэффициент β сплавов, содержащих менее 30% Ni и более 45% Ni отрицательный, а от 30 до 45% - положительный, причем достигает максимума при 36% Ni.

Все исследованные сплавы в закаленном состоянии по

содержанию Ni находятся на правой ветви кривой аномалии Шевенара. Выделение γ'- фазы и η -фазы при отпуске приводит к об ед нению твердого раствора Ni, что и вызывает изменение ТКЧ сплавов. Сопоставление значений ТКЧ исследованных плавок показывает, что содержание Ni в твердом растворе в отпущенном состоянии в плавках I,2,4 и 5 соответствует правой ветви кривой " γ - $\%Ni$ "; а в плавке 3 - левой ветви этой зависимости.

Приведенные результаты исследования свидетельствуют, как и следовало ожидать, о большом влиянии содержания Ni в твердом растворе на значения ТКЧ. Однако, проведенное исследование показывает также, что значения ТКЧ во многом определяются структурным состоянием сплавов, определяющим их магнитную жесткость: увеличение магнитной жесткости приводит к уменьшению алгебраического значения ТКЧ.

Учет влияния магнитной жесткости позволяет качественно объяснить соотношение значений ТКЧ после различных режимов термообработки. Например, уменьшение магнитной жесткости сплавов с повышением температуры закалки и отпуска позволяет объяснить отмеченное выше влияние температуры закалки и отпуска на ТКЧ плавок I,4 и 5. Уменьшение ТКЧ плавок I,2,4 и 5 при увеличении длительности высокотемпературного отпуска также может быть объяснено увеличением магнитной жесткости, связанным с переходом кубической γ'- фазы в пластинчатую η- фазу и т.д.

Характер изменений добротности при термической обработке исследованных сплавов свидетельствует, по нашему мнению, об определяющем влиянии магнитоупругого внутреннего трения на эту характеристику: максимальная добротность соответствует тому режиму термической обработки, который обеспечивает максимальную жесткость сплава. Следовательно, для получения максимальной добротности элинварных сплавов следует стремиться к получению магнитожесткой структуры.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ТЕРМООБРАБОТКИ ЭЛИНВАРНЫХ СПЛАВОВ.

В реферируемой работе приводится формула, позволяющая определить минимальное содержание Ni в твердом растворе отпущенного сплава.

$$Ni_{\gamma} = Ni_{общ} - 5{,}76(Al - 0{,}5) - 3{,}24(Ti - 2{,}0) - 3{,}7 \times 0{,}5 \quad (4)$$

где: $Ni_{общ}$, Al и Ti – процентное содержание элементов в сплаве, а 5,76, 3,24 и 3,7 – коэффициенты, показывающие соотношение весового количества Ni и Al, а также Ni и Ti, в γ'-фазе и η-фазе. Введенные в формулу коэффициенты, учитывающие растворимость Ti и Al в твердом растворе и процентное содержание Ni, Fe, Ti и Al в γ'-фазе и η-фазе, взяты из опубликованных работ. С помощью формулы (4) для каждого прутка всех плавок были определены расчетные значения Ni_{γ} и построена зависимость "ТКЧ – Ni_{γ}", представленная на рис. I. Эта зависимость построена в предположении, что минимальному содержанию Ni в твердом растворе соответствует экстремальное значение ТКЧ каждого прутка.

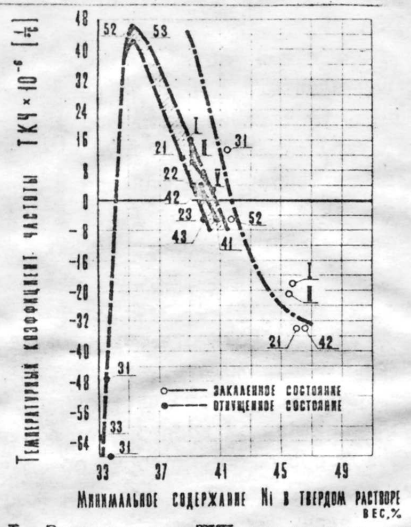


Рис. I. Зависимость ТКЧ элинварных сплавов от содержания Ni в твердом растворе.

Полученная зависимость используется для количественной оценки влияния режима термической обработки на содержание Ni в твердом растворе, а также для оценки влияния структурного состояния на ТКЧ.

Анализ результатов исследования показывает, что коле-

бания содержания Ni в твердом растворе при термической обработке от режима к режиму не превышают 0,5% / для 4-х часового отпуска/. Для сплавов, содержание Ni в твердом растворе которых соответствует левой ветви кривой "ТКЧ - Ni_γ", такие колебания Ni_γ полностью определяют изменения ТКЧ при изменении температуры закалки и отпуска (плавка 3). Для сплавов, лежащих на правой ветви кривой "ТКЧ-Ni_γ" указанные колебания не существенны, а изменения ТКЧ от режима к режиму определяются в первую очередь изменением структурного состояния сплавов (плавки I,2,4 и 5).

Заштрихованная область на рис. I характеризует разброс значений ТКЧ исследованных сплавов при одинаковом Ni_γ. Этот разброс отчасти можно объяснить погрешностью в определении химсостава, однако определяющим, по нашему мнению, является разная магнитная жесткость в момент достижения одинакового содержания Ni в твердом растворе. Например, значения ТКЧ плавки 4 после всех исследованных режимов термообработки ниже, чем значения ТКЧ плавки I/ см.табл.2/. Это объясняется большим содержанием Ni в плавке 4, а, следовательно, большим количеством вторичных фаз и большей магнитной жесткостью сплава при одинаковом Ni_γ. Более низкие значения ТКЧ плавки 2 по сравнению с плавкой I определяются также большим количеством никеля. Кроме того, плавка 2 имеет повышенное содержание Ti, что приводит к большому количеству η- фазы в отпущенном состоянии. Это, как отмечалось , приводит к дополнительному увеличению магнитной жесткости.

Таким образом, для каждого режима термообработки однозначная зависимость "ТКЧ - Ni_γ" должна наблюдаться только для тех сплавов, характер распада которых при отпуске одинаков и одинаково исходное содержание Ni.

Количественная оценка влияния вторичных фаз на ТКЧ сплавов позволила построить зависимость "ТКЧ- Ni_γ" для всех I2 режимов термообработки и различного содержания Ni в сплавах от 44 до 47%. Эти зависимости представляют собой прямые линии. Тангенс угла наклона каждой прямой (коэффициент α) численно равен изменению значений ТКЧ при изменении расчетного значения Ni_γ на I%. Точка пересечения с осью концентраций показывает содержание Ni в твердом растворе, соответствующее нулевому значению ТКЧ.

На основании полученных значений Ni_{γ}, соответствующих нулевому ТКЧ, а также коэффициентов α построена номограмма, приведенная на рис. 2.

Линии номограммы рис. 2 представляют собой геометрическое место точек, координаты которых связывают расчетное значение Ni_{γ}, соответствующее нулевому ТКЧ, и исходное содержание Ni в сплаве. Каждая линия соответствует одному режиму термообработки. Ni_{γ} определяется по формуле (4).

Приведенная номограмма может быть использована для выбора оптимального режима термообработки элинварных сплавов, обеспечивающего заданное значение ТКЧ. Как показала экспериментальная проверка, выбор режима термической обработки с помощью данной номограммы обеспечивает получение заданного значения ТКЧ с точностью $\pm 2 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$.

Номограмма рис. 2 также может быть использована для определения возможности получения заданного ТКЧ на любой промышленной плавке элинварного сплава, если известен ее химсостав. В частности, нулевое ТКЧ может быть получено только в том случае, если точка, соответствующая данным значениям Ni_{γ} и $Ni_{общ}$, находится внутри поля, ограниченного линиями номограммы. Как показывают расчеты, это наблюдается далеко не при любом сочетании легирующих элементов в пределах марок промышленных сплавов.

АНАЛИЗ ПРИЧИН НЕСТАБИЛЬНОСТИ ТКЧ ЭЛИНВАРНЫХ СПЛАВОВ.

В работе произведена оценка следующих факторов, вызывающих нестабильность ТКЧ элинварных сплавов.

1. Ликвация от резонатора к резонатору.
2. Колебание температуры закалки и отпуска при термообработке.
3. Неодинаковое структурное состояние деталей, прошедших один и тот же технологический цикл термообработки ("нестабильность распада").
4. Различные по величине и знаку остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления деталей.

Нестабильность ТКЧ резонаторов, прошедших одинаковый технологичный цикл изготовления, в данной работе оценивалась значением среднеквадратического отклонения σ.

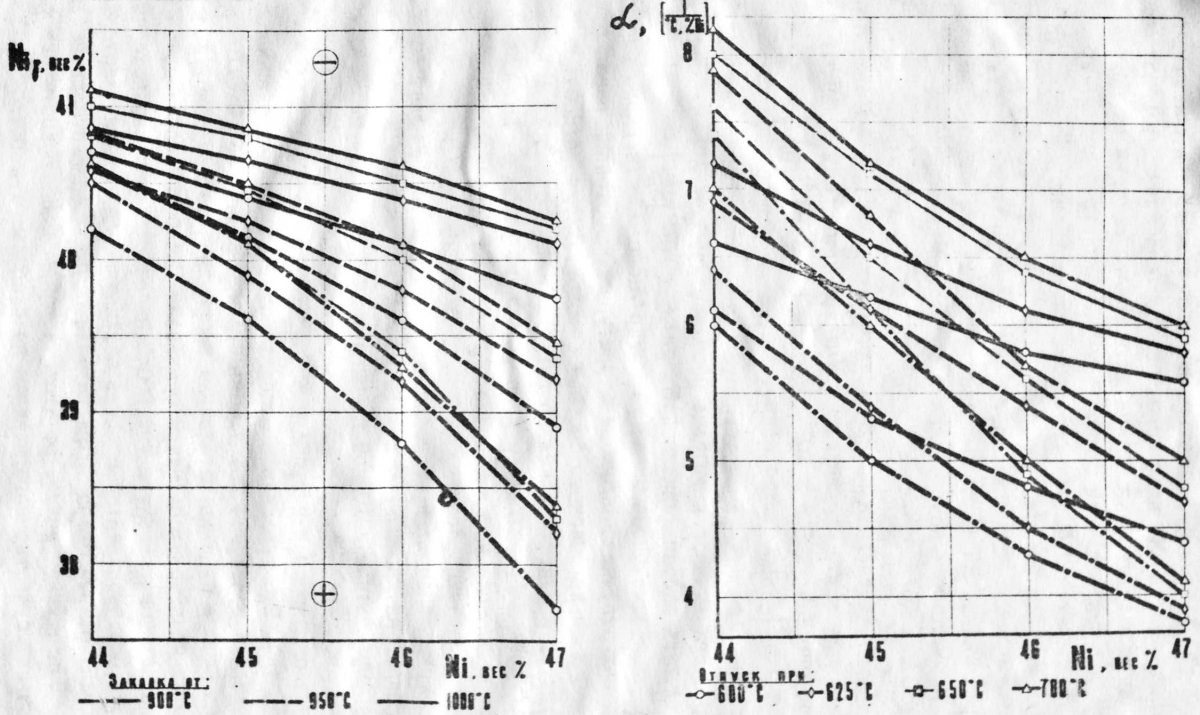


Рис. 2. Номограмма для определения ТКЧ сплавов.

Результаты проведенного анализа сводятся к следующему. Нестабильность ТКЧ элинварных сплавов определяется в первую очередь ликвацией. Колебания химического состава от прутка к прутку одной плавки приводят к значительному изменению средних значений ТКЧ резонаторов, изготовленных из разных прутков одной плавки / см.табл. I и 2/. Ликвация в пределах одного прутка, как правило, не выявляется методами химического анализа, но также вызывает значительную нестабильность ТКЧ резонаторов, которая может быть оценена величиной $\sigma \pm 0{,}9 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$

Количественная оценка влияния легирующих элементов в сплаве показала, что ликвация Ni, Ti и Al на 0,I% приводит к изменению ТКЧ на $0{,}5 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$, $1{,}7 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$ и $2{,}8 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$ соответственно.

Погрешность температурного режима термообработки на $\pm$ I0°С при закалке и отпуске вызывает разброс ТКЧ, который может быть оценен величиной $\sigma \pm 0{,}6 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$.

Как отмечалось выше, характер распада твердого раствора при отпуске зависит от структурного состояния перед отпуском и от химического состава сплавов. Неоднородность структуры и микроликвация приводят к тому, что соотношение между зонами прерывистого и непрерывного распада, а также соотношение между η - фазой и γ'- фазой, меняется как в пределах одного резонатора, так и от резанатора к резонатору, что также приводит к нестабильности ТКЧ, которая может быть оценена величиной $\sigma \pm 0{,}6 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$.

Применение холодной пластической деформации перед отпуском значительно уменьшает "нестабильность распада" элинварных сплавов при отпуске и способствует увеличению стабильности ТКЧ. Это увеличение стабильности, как показала экспериментальная проверка, может быть оценено величиной $\pm 0{,}6 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$

Оценка влияния остаточных напряжений механической обработки производилась путем сравнения ТКЧ резонаторов до и после вакуумного обжига при 600°С в течение 3 часов, который должен был значительно снизить остаточные напряжения обработки. Однако, эта операция не привела к увеличению стабильности ТКЧ. Поэтому, очевидно, остаточные напряжения обработки не оказывают существенного влияния на стабильность ТКЧ

элинварных сплавов.

В Ы В О Д Ы

I. Величина ТКЧ, а следовательно, и термоупругого коэффициента элинварных сплавов зависит от химического состава твердого раствора и структурного состояния сплава, определяющего его магнитную жесткость.

Алгебраическое значение ТКЧ тем меньше, чем больше магнитная жесткость сплава.

2. Изменение тонкой структуры сплава перед отпуском, а также изменение содержания легирующих элементов влияет на характер распада твердого раствора при отпуске, что и определяет изменения ТКЧ. Так, увеличение содержания титана в сплаве и предварительная холодная пластическая деформация способствует преимущественному образованию в процессе отпуска η- фазы, взамен γ'- фазы. Это приводит к уменьшению ТКЧ сплавов вследствие увеличения их магнитной жесткости.

3. Колебания содержания легирующих элементов в пределах марки приводит к значительному изменению ТКЧ сплавов. Так, для сплава 44НХТЮ колебания в содержании только никеля, титана и алюминия в пределах марки вызывает изменение ТКЧ от $-18 \times 10^{-6}\left[\frac{I}{\sigma C}\right]$ до $+24 \times 10^{-6}\left[\frac{I}{\sigma C}\right]$.

Нулевое значение ТКЧ может быть получено не при любом сочетании легирующих элементов в пределах марки сплава.

В качестве первичного критерия возможности получения нулевого значения ТКЧ может быть принято расчетное содержание никеля в твердом растворе (Ni_γ), определяемое по формуле, предложенной в настоящей работе.

4. Оптимальный режим термической обработки конкретной плавки сплава может быть назначен с помощью номограммы, разработанной в настоящей работе.

Режим термообработки, выбранный с помощью этой номограммы, обеспечивает получение заданного значения ТКЧ с точностью не ниже $\pm (2 + 3) \times 10^{-6}\left[\frac{I}{\sigma C}\right]$.

5. На основании проведенных исследований можно предположить, что добротность элинварных сплавов определяется, в первую очередь, магнитоупругим внутренним трением. Это предположение позволяет объяснить изменение добротности при из-

менении режима термической обработки и может быть использовано при создании новых элинварных сплавов с заданной добротностью.

6. Установлено, что нестабильность рабочих характеристик элинварных сплавов вызывается ликвацией, колебаниями температурного режима термообработки и неоднородностью структурного состояния сплавов в отпущенном состоянии. Произведена количественная оценка влияния указанных факторов.

7. Стабильность ТКЧ элинварных сплавов может быть повышена применением холодной пластической деформации перед отпуском. Увеличение стабильности за счет такой обработки можно оценить величиной $\delta \pm 0{,}6 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{o}C}\right]$.

Основные положения настоящего исследования доложены на Второй межвузовской научно-технической конференции в сентябре 1967 года и опубликованы в следующих статьях.

Макарова В.И., Лешковцева И.Г., Велищанский А.В., Влияние режимов термической обработки на характеристики сплавов элинварного типа, Известия вузов. "Машиностроение", 1968 г., № 12.

Велищанский А.В., Макарова В.И., Лешковцева И.Г., Получение заданного значения термоупругого коэффициента элинварных сплавов, Известия вузов. "Машиностроение"., 1971 г.,№ 4.

Велищанский А.В., Макарова В.И., Лешковцева И.Г., Оценка причин нестабильности термоупругого коэффициента элинварных сплавов. Известия вузов. "Машиностроение", 1971 г. , № 5.

Зак. 1280 – т. 150 л – 130072 Тип. МВТУ