

Вплив технології одержання на структуру та властивості елінварів

1. Сучасний стан питання

К. О. Гогаєв, П. І. Лобода*, Ю. М. Романенко*, О. К. Радченко, М. О. Пінчук*

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, e-mail: arradch@ipms.kiev.ua

*Національний технічний університет України "КПІ" МОН України, Київ

Наведено огляд сучасного стану технологій одержання елінварних сплавів та їх впливу на структуру останніх. Показано, що основним методом одержання сплавів є плавка в індукційних печах. Неоднорідність структури та нестабільність властивостей елінварів вимагають пошуку інших технологій їх одержання. Застосування методу порошкової металургії при виготовленні таких сплавів дозволяє одержувати більш гомогенну структуру, в тому числі і за рахунок застосування нанодисперсних порошків. Одним з напрямків підвищення властивостей елінварів є зменшення розміру зерна.

Ключові слова: елінвар, метод одержання, структура, електронно-променевої переплав, порошкова металургія, модуль пружності.

Вступ

Розвиток приладобудування і систем автоматики, де традиційно широко використовуються прецизійні сплави, призвів до необхідності створення нових технологій їх одержання. Прецизійні сплави в останні роки почали більш широко і різноманітно застосовуватись для різних первинних чутливих елементів і пристроїв радіоелектроніки. Прецизійні сплави — це металеві сплави з особливими фізичними властивостями або рідкісним поєднанням властивостей, які відрізняються точністю хімічного складу, відсутністю домішок, ретельністю виготовлення та обробки. Більшість з них створено на основі сплавів Fe—Ni (29,8—44,4% (мас.) Ni)*. Це сплави з особливими магнітними, електричними, пружними та іншими властивостями, наприклад магнітом'які (пермалой, пермендюр, пермінвар, ферит—нікель) і магнітотверді (альні, манганин, вікалой) сплави, сплави з заданими електричними (алюмель, копель, хромель), тепловими (ковар, платинит) і пружними властивостями, надпровідники (сплави Nb з Zr та Ti, Mo з Tc і Re та інші). Сплави інварного класу мають аномалії більшості фізичних властивостей [1]. Ці особливості інварних сплавів дозволяють одержувати матеріали з унікальними характеристиками. Інварні сплави використовуються в різних галузях промисловості: у метрології, криогенній, радіоелектронній техніці та геодезії. Передбачалося, що застосування новітніх розробок, в яких закладено такі компоненти, як індуктивні і лазерні датчики переміщення, призведе до значного витис-

*Тут і надалі склади сплавів і вміст компонентів наведено в % (мас.).

нення пружних чутливих систем, заводних пружин і, в першу чергу, пружних чутливих елементів. Однак, як показав досвід, впровадження нових розробок не призвело до відмови від використання пружних металевих матеріалів для створення первинних датчиків тиску, переміщення, прискорення і т. д. Більше того, прецизійні пружні матеріали почали широко застосовувати в медичній техніці, в кольоровому телебаченні. У цих випадках значення коефіцієнта термічного розширення (КТР), близькі до нульового, диктуються умовами експлуатації, вимогами забезпечити високу точність вимірювального інструменту, стабільність еталонів довжини, високу стійкість роботи газових лазерів, експлуатаційну надійність трубопроводів для транспортування зріджених газів і т. п. [2]. Надійні з'єднання різних за властивостями матеріалів можна створити тільки при узгодженні модуля пружності в технологічному та експлуатаційному інтервалах температур. Серед великого числа сплавів із заданим модулем пружності переважна частина отримана на основі сплавів системи Fe—Ni в області концентрацій елінварного* складу (близько 29 та 45% Ni). За останні 15—20 років вивченню залізнікелевих сплавів присвячено багато робіт, висунуто десятки гіпотез для пояснення природи аномального характеру властивостей сплавів елінварного класу. Проте, незважаючи на великі зусилля вчених багатьох країн, у дослідженнях інварного ефекту питання про природу інвару все ще залишається не вирішеним. Відома велика кількість елінварних аустенітних сплавів, що містять 40—50% Ni, у яких з підвищенням температури модуль пружності практично не змінюється [3]. Виходячи з актуальності створення елінварних сплавів, актуальними являються також і технології їх одержання. При цьому дослідження впливу технологічних операцій і режимів при отриманні матеріалу та виготовленні виробів постає першочерговою задачею.

Сплави з температурно-стабільним модулем пружності (елінвари)

Сплави системи Fe—Ni, крім низьких значень КТР при деяких концентраціях нікелю, володіють ще однією чудовою властивістю — малим температурним коефіцієнтом модуля пружності (ТКМП). У всіх твердих тілах, у тому числі і в металах, модуль пружності при нагріванні зменшується внаслідок зменшення енергії міжатомних зв'язків. У деяких сплавах системи Fe—Ni, названих елінварними, спостерігається аномалія у зміні модуля пружності при нагріванні, який або зростає або змінюється несуттєво. Елінварні сплави широко застосовують для виготовлення пружних елементів і пружин точних приладів і механізмів (пружин, камертонів, резонаторів електромеханічних фільтрів та ін.) Сталість модуля пружності забезпечує малу температурну похибку приладу в умовах експлуатації. Природа аномальності зміни модуля пружності при нагріванні така сама, як і природа інвару феромагнітного походження [4]. Зовнішні напруження, що розтягують, діють на феромагнетик подібно магнітному полю, орієнтуючи відповідним чином магнітні вектори доменів і викликаючи магнітострикцію (лінійну та об'ємну), яку в цьому

* Назва "елінвар" (незмінна пружність) та його відкриття (1903 р.) належить швейцарському фізику Шарлю Едуарду Гільйому, якому у 1920 році за відкриття сплавів інвару та елінвару було присуджено Нобелівську премію з фізики.

випадку називають механострикцією. У результаті загальна деформація феромагнетика при впливі на нього зовнішніх напружень s буде складатися з пружномеханічної d_0 і механострикційної d_m складових. Модуль нормальної пружності для феромагнетика визначається за формулою

$$E = s/(d_0 + d_m),$$

тобто значення модуля пружності занижені внаслідок додаткової деформації феромагнітної природи. Якщо до програми навантаження додати дуже велике зовнішнє магнітне поле, яке вичерпає магнітострикційну деформацію, то модуль пружності феромагнетика буде визначатися тільки пружномеханічною деформацією і значення його будуть великими. Таким чином, у всіх феромагнітних матеріалах модуль нормальної пружності дещо занижений через наявність деформації феромагнітної природи:

$$E = E_0 - \Delta E.$$

У елінварних сплавах, на відміну від інших феромагнетиків, внаслідок великої об'ємної механострикції парапроцесу ефект набуває великого значення і викликає аномальну зміну модуля пружності при нагріванні. Можливий наступний характер залежності модуля пружності E феромагнітного матеріалу від температури нагріву: зменшення модуля пружності при нагріванні обумовлене ослабленням сил міжатомної взаємодії; зниження ΔE з підвищенням температури, викликане зменшенням намагніченості феромагнетика, призводить не до зниження, а, навпаки, до зростання модуля нормальної пружності E . Звідси випливає, що модуль пружності феромагнетика може також залишатися незмінним до температури точки Кюрі. Температурний коефіцієнт модуля пружності, названий для стислості коефіцієнтом термпружності g , визначає характер зміни модуля пружності при нагріванні. У феромагнітних матеріалах цей коефіцієнт може мати знак плюс у тих випадках, коли модуль пружності при нагріванні зростає, а також знак мінус, коли модуль пружності, як і у неферомагнітних матеріалів, знижується. У елінварних сплавах коефіцієнт g завжди має позитивне значення або може бути рівним нулю. Для сплавів системи Fe—Ni значення g визначаються концентрацією нікелю.

У сплавах, що містять 29—45% Ni, g має додатне значення, що свідчить про наявність великої аномалії у зміні модуля нормальної пружності при нагріванні. Сплави, що містять 29 і 45% Ni (решта Fe), мають нульові значення коефіцієнта g . Однак незначні відхилення в концентрації нікелю, що неминучі в металургійному процесі, різко змінюють значення g . Тому сплави системи Fe—Ni додатково легують хромом, який робить цю залежність менш різкою і дозволяє отримати у сплавах різних плавок стійке значення g , близьке до нуля [5]. Першим сплавом такого типу був сплав 36НХ (36% Ni і 12% Cr), названий елінваром. На жаль, цей сплав має недоліки. По-перше, у нього низькі значення механічних характеристик, які не можна поліпшити термічною обробкою, оскільки у сплаві стійка однофазна аустенітна структура. По-друге, у нього невисока температура точки Кюрі (~100 °С), що обмежує інтервал його робочих температур. Згодом сплав почали легувати титаном і алюмінієм (36НХТЮ), що дозволило зміцнювати його термічною обробкою, але ще більше знизило температуру точки Кюрі. У результаті сплав втратив свою

ферромагнітність, а отже, і елінварність. Його використовують лише як сплав з високими пружними властивостями для пружин і пружних елементів, від яких не вимагаються намагніченість і висока корозійна стійкість в агресивних середовищах. Подальше поширення елінвари отримали у вигляді сплавів заліза з 5—6% Сг і 42—44% Ні. Коефіцієнт термопружності таких сплавів близький до нуля. Підвищений вміст нікелю забезпечує вищу температуру точки Кюрі, що розширює температурну область їх застосування. Для отримання високих механічних властивостей ці сплави також додатково легують титаном і алюмінієм, що дозволяє зміцнювати їх термічною обробкою. Вміст вуглецю в цих сплавах має бути мінімальним. Елінварні сплави розподіляються на декілька великих груп: деформаційно-твердіючі (мають вміст нікелю до 38% і при охолодженні можуть переходити в область α -заліза), їх зміцнення суттєво залежить від проведеної деформаційної обробки; дисперсійно-твердіючі елінвари (з вмістом нікелю 41—45,5% або з частковою заміною нікелю на кобальт та обов'язковим легуванням елементами, що утворюють інтерметаліди), зміцнення яких відбувається за рахунок виділення з пересиченого розчину дисперсних фаз, що зміцнюють; елінварні камертонні біметали сталь—сплав (У8/75Н34Х8Г3, У8А/40Н35Х8Г), причому сплав додатково легується марганцем у кількості 1,3—3,0%, та немагнітні елінвари (90БТ) [1].

Методи одержання

Найбільш поширеним агрегатом для виплавки прецизійних сплавів є високочастотна індукційна електропіч. У прецизійних сплавах, виплавлених в дугових сталеплавильних печах, рівень властивостей, як правило, не досягає тих значень, які мають сплави, виплавлені в індукційних печах. При виплавці прецизійних сплавів в індукційних печах забезпечуються: точність складу, можливість використання вакууму і різних контрольованих газових середовищ, повнота протікання фізико-хімічних реакцій між металом і шлаком, малі втрати різних легуючих добавок на угар, можливість швидкої зміни температури металу. Плавка в індукційних печах — швидкий процес, оскільки розплавлення, окиснення і відновлення, легування і доведення до готовності сполучаються у часі і в той же час легко керуються. Необхідні фізико-хімічні реакції між металом і шлаком протікають завдяки застосуванню спеціально виготовлених синтетичних шлаків [6]. Але зазвичай до складу відділення для виплавки прецизійних сплавів входить і дугова електросталеплавильна піч, що використовується для виплавки синтетичного чавуну і шлаку, рафінування некондиційних шихтових матеріалів, переплавки знеособлених відходів, виготовлення лігатур. Для виплавки прецизійних сплавів, які потім піддаються рафінуванню переплавом, може використовуватися електропіч з витратними електродами зі сплавів, що переплавляються. Запропонований метод став загально-визнаним після того, як була розроблена технологія плавки з застосуванням синтетичних шлаків. Протікання комплексу фізико-хімічних процесів під час плавки забезпечується їх високою хімічною активністю.

Вплив легуючих елементів на властивості елінварів

Сплави із заданими властивостями пружності, крім низьких значень ТКМП, повинні володіти високим опором малим пластичним дефор-

маціям і релаксаційною стійкістю в умовах статичного і циклічного навантаження. Крім того, елінвари, що використовують для резонаторів електромеханічних фільтрів (РЕМФ), повинні мати відповідні величини термічного коефіцієнта частоти (ТКЧ) та добротності (відношення частоти до інтервалу її зміни в заданому температурному діапазоні). Як вже відмічалось, рівень ТКМП чистого залізонікелевого сплаву навіть при невеликих коливаннях концентрації нікелю стає нестабільним і зазнає значних змін. Легування хромом підвищує стабільність елінвару. Елінвар, що містить 36% Ni і 12% Cr, характеризується такими ж значеннями ТКМП, як і чистий сплав Fe—Ni, але менш залежними від можливих відхилень у концентрації нікелю. Так, елінварний сплав з 36% Ni та 8% Cr має ТКМП $(18—23) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, що в 10 разів менше, ніж у вуглецевих сталей, та в 20 разів менше, ніж у аустенітних [7]. Однак він має нижчі механічні властивості, які не можна покращити термічною обробкою, через стабільність аустенітної структури. Крім того, температура Кюрі цього сплаву становить близько 100 °С, що обмежує температурний інтервал його застосування. Для підвищення температури Кюрі в елінварі збільшують концентрацію нікелю, а для поліпшення механічних властивостей елінвар додатково легують титаном, алюмінієм або берилієм [8]. Крім того, в якості легуючих елементів використовують Mo, W та Re [9]. Введення невеликої кількості молібдену (близько 1%) обумовлено його високою поверхневою активністю, що запобігає зернограничному виділенню карбонітридів і інтерметалідів. Концентрація легуючих елементів підбирається кожен раз окремо, оскільки зі збільшенням кількості елементів, що входять до сплаву, вплив кожного з них змінюється. Як правило, зміну кількості легуючих елементів досліджують у вузькому інтервалі. В роботі [9] вивчено вплив концентрації Cr, Ti та Al на зміну ступеню дисперсійного твердіння під час відпуску. Досліджували стандартні сплави 44НХМТ та 46НХВИТЮ. Кількість хрому для сплаву 44НХМТ змінювали від 4,3 до 5,1%, титану — від 2,6 до 3,2%, а алюмінію — від 0,8 до 1%. Підвищення кількості хрому різко знижує термічний коефіцієнт частоти (ТКЧ) і не завжди забезпечує його позитивну величину. Додатки Re, W та зниження вмісту хрому дозволяють послабити чутливість сплаву до термічної обробки і коливань вмісту нікелю, титану та алюмінію. Для підвищення точки Кюрі елінварних сплавів до 400 °С до їх складу вводять кобальт у кількості 11,5—26,5% [1]. Вміст вуглецю в елінварних сплавах необхідно утримувати на мінімальному рівні (не більше 0,05%) [4].

Існує також немагнітний елінварний сплав 90БТ (~90% Вe, ~10% Ti та Nb) [1].

Згідно з оглядом впливу легуючих елементів на термопружні властивості елінварів, С. М. Кучма та С. Ю. Стародубов [10] роблять висновок, що задачу розробки та виготовлення елінварних сплавів з покращеним комплексом властивостей можна вирішити на основі принципів синтезу сплавів. Для цього необхідно систематизувати наявні експериментальні дані і теоретичні дослідження про вплив останніх, використовуючи металознавчий, металофізичний, кібернетичний методи та метод комп'ютерного проектування сплавів. Ці ж автори при розробці нового елінварного сплаву використовують вже відомий сплав 44НХМТ [11].

Режими гартування

Елінварні сплави відносяться до сплавів аустенітного класу, тобто змінити їх фазовий склад, змінюючи температури, неможливо. За рахунок підвищення температури можна лише розчинити дифузійним шляхом дисперсні фази, що зміцнюють. Таким чином, при гартуванні елінварного сплаву фіксуємо пересичений твердий розчин легуючих елементів в γ -залізі з ГЦК ґратками. Перевищення певної температури гартування може лише призвести до рекристалізації та збільшення розміру зерен, що в подальшому призведе до зниження механічних властивостей. Тому для елінварних сплавів застосовується пом'якшуюча термічна обробка — гартування при температурах 950—1050 °С зі швидким охолодженням, що забезпечує отримання високої пластичності [1, 12, 13]. Так, для сплаву 42НХТЮ проводять гартування від температури 910 ± 10 °С, а для сплаву 43НКТЮ — від температури 950 ± 20 °С [1]. Пружні чутливі елементи виготовляють з матеріалу в пом'якшеному стані штампуванням, витяжкою, прокатуванням та іншими методами. Термічну обробку виробів рекомендується проводити у вакуумі або захисному середовищі.

Методи деформаційної обробки

Деформаційна обробка (прокатування, волочіння та інші) найбільше впливає на властивості деформаційно-твердіючих елінварів [1]. Однак механотермічною обробкою можна покращити також властивості дисперсійно-твердіючих елінварів [12, 13]. Так, вдалося досягти мінімальних значень ТКЧ та високої добротності сплавів 44НХМТ та 44НХВІТЮ [13]. Крім того, у дисперсійно-твердіючих сплавах подрібнення зерна досягається правильним співвідношенням ступеню пластичної деформації та режиму відпалу [14]. Як правило, величина холодної деформації дисперсійно-твердіючих сплавів (42НХТЮ, 44НХТЮ) знаходиться на рівні 20—30%. Для одержання потрібного сортаменту використовують також гаряче пластичне деформування, зокрема гаряче продольно-гвинтове прокатування [14].

Механічні властивості елінварів (масштабний фактор)

У полікристалічному матеріалі модулі пружності та їх температурні коефіцієнти залежать від текстури, яка може змінюватися під впливом деформації, рекристалізації та фазових перетворень. У ряді випадків для елінварних сплавів спостерігалися суттєві залежності модуля Юнга і його температурного коефіцієнта від ступеня холодної деформації та термообробки. Причиною цих залежностей можуть бути не тільки зміни текстури, але й інші фактори, наприклад зміна складу матриці і виділень, внутрішні напруження [5]. Відомо, що для досягнення мінімальних величин ТКЧ більшості сучасних елінварів вирішальне значення має вміст нікелю у твердому розчині. Зміна концентрації хімічних елементів у твердому розчині відбувається в процесі дисперсійного твердіння, тобто виділення з твердого розчину дисперсних частинок інтерметалідних фаз. У цьому сенсі найбільше значення для формування термопружних властивостей має γ' -фаза $\text{Ni}_3(\text{Fe}, \text{Ti}, \text{Al})$ [9]. Виділяючись з твердого розчину у процесі дисперсійного твердіння по безперервному (у всьому об'ємі сплаву) і переривчастому (по межах зерен і дефектах структури) механізмам, γ' -фаза зумовлює зміну вмісту у ньому нікелю, титану та інших компонентів і тим самим впливає на ТКЧ.

Дані про деформацію і руйнування при розтягуванні циліндричних і плоских зразків із співвідношенням ширини до товщини 1 : 100 сплаву 44НХТЮ наведені в роботі [15]. Встановлено зниження всіх механічних характеристик сплаву: границі плинності — від 695 до 495 МПа (при товщині найменшого перетину 0,2 мм) і далі до 265 МПа, границі міцності — від 1150 до 251 МПа (тобто в 5 разів), причому до товщини перетину 0,2 мм іде повільне зниження (до 830 МПа), а потім різке (до 271 МПа при товщині перетину 0,06 мм). Аналіз фрактографій показав, що сплав має квазікрихкий злам, який включає ділянки в'язкої та крихкої складових з наявністю міжзеренного руйнування та мікротріщин. При зменшенні ширини та товщини зразка збільшується частка крихкої складової.

Режими старіння

Операція старіння елінварних сплавів проводиться для досягнення необхідних фізичних та механічних властивостей. З пересиченого твердого розчину фаз у аустеніті, який утворився після гартування при старінні, виділяються фази, що зміцнюють. Головним чином утворюється γ' -фаза складу $(\text{FeNi})_3(\text{TiAl})$ [16]. Розклад пересиченого твердого розчину кінетично може відбуватися за різними способами, а саме шляхом переривчастого та безперервного переходу. В обох випадках вихідний та кінцевий стани сплаву виявляються схожими — з нерівноважного однофазного стану сплав переходить у стійкий гетерофазний. Однак перехід відбувається за різними способами. У процесі переривчастого розпаду матрична α -фаза знаходиться в двох станах: пересиченому (тобто вихідному — α -фаза) та рівноважному (β -фаза). Такий розпад, як правило, починається у границь зерен, поступово просуваючись до їх середини. Продукти реакції утворюють перлітоподібні пластинчасті колонії із суміші кристалів α - та β -фаз, при цьому матричний розчин зберігає вихідне пересичення [14]. Холодна пластична деформація загартованих сплавів інтенсифікує процес подальшого старіння, збільшує міцність. Температура максимального зміцнення сплавів при старінні залежить від ступеня деформації: при деформації 90% найбільша твердість досягається після старіння при температурі 650 °С, при деформації 10% — при 750 °С. Так, при виготовленні РЕМФ зі сплаву 44НХМТ старіння в температурному інтервалі 540—570 °С впродовж однієї години дозволило одержати максимальне значення добротності* (32 000) при мінімальному значенні ТКЧ [17].

Структури елінварних сплавів на різних етапах їх одержання

При аналізі структур елінварних сплавів встановлено два масштабних рівня: перший розрізняється при дослідженні на звичайному оптичному мікроскопі, другий — лише при збільшенні в тисячі та десятки тисяч разів. На оптичному мікроскопі можна побачити зеренну структуру сплаву та макродефекти, які з'являються під час його виготовлення або після термо-механічної обробки [16, 18]. Вид дисперсійної фази, що зміцнює, можна розрізнити лише при дослідженні на електронному мікроскопі, тому що

*Відношення частоти РЕМФ до інтервалу її зміни в допустимому діапазоні температур.

розміри пластинок (при переривчастому механізмі виділення) або рівновісних виділень (при безперервному механізмі) складають декілька десятків нанометрів [16, 18—20].

Розглянемо еволюцію структури елінварів під час термічної обробки на прикладі сплаву 36НХТЮ. У загартованому стані (температура гартування 920 °С) сплав має структуру однофазного γ -твердого розчину з залишковими включеннями другої фази. При температурі максимального зміцнення (відпуск при температурі 675—700 °С) виділяється дисперсна γ' -фаза з кубічними гранецентрованими ґратками, когерентно зв'язаними з ґратками основного твердого розчину. Ця фаза утворюється у невеликій кількості у вигляді пластинок, розташованих під кутом $\sim 90^\circ$ до границі зерна, з якої вони почали утворюватися. Таку структуру добре видно вже при збільшенні у 300 разів. При більшому збільшенні (6000 разів) можна побачити, що між пластинками присутня фаза у вигляді точок. Найбільша кількість частинок γ' -фази розміром $2 \cdot 10^{-5}$ мкм (20 нм) забезпечує максимальну твердість та міцність. При підвищенні температури відпалу до 850 °С відбувається коагуляція γ' -фази. Коагульована фаза добре розрізняється лише при збільшенні у 10 000—20 000 разів [16].

Структурні перетворення сплаву 44НХМТ, що використовується для виготовлення РЕМФ, при термічній обробці розглянуті в роботі С. М. Кучми [18]. При відпалі при 400 °С зерна залишаються деформованими і мають чітко виражену текстуру. На мікроструктурах, збільшених у 120 разів, видно велику кількість двійників і ліній ковзання, а при збільшенні у 20 000 разів — ланцюжки виділень γ' -фази (рис. 1, а).

При підвищенні температури відпалу до 700 °С зерна набувають рівновісної форми (рис. 1, б), при збільшенні у 120 разів чітко видно границі

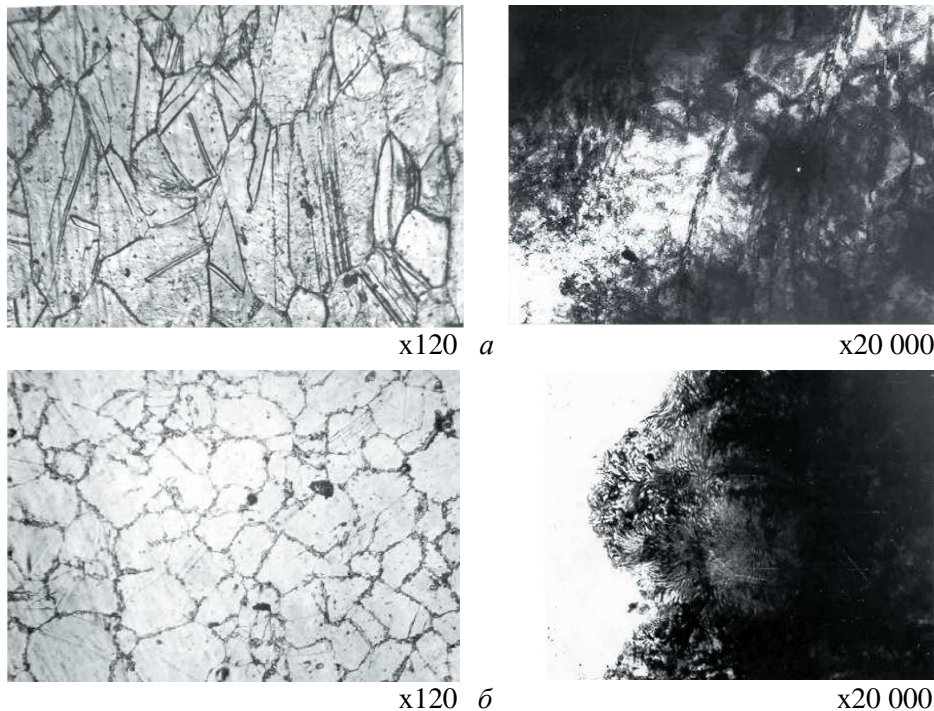


Рис. 1. Мікроструктура сплаву типу 44НХМТ після відпалу при температурах 400 (а) та 700 °С (б) впродовж 2 год.

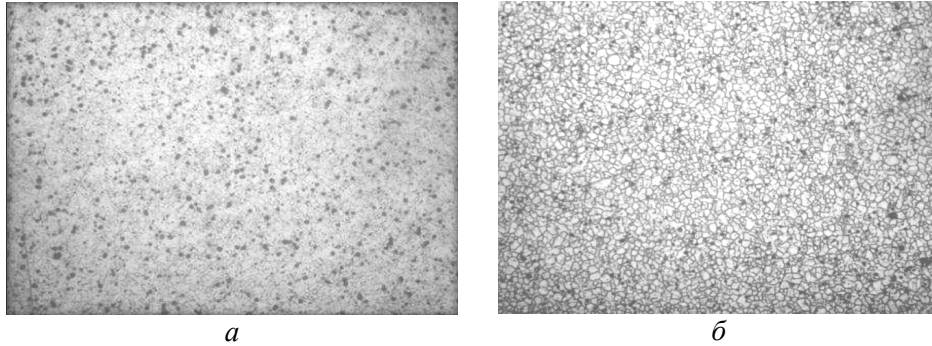


Рис. 2. Структури (x130) зразків зі сплаву 44НХТЮ після термічної обробки: *а* — гартування при 910 ± 10 °С (час витримки 30 хв, охолодження у воді); *б* — термоциклічна обробка за температур 950—350 °С, 4 цикли (середовище при охолодженні — повітря, остаточне охолодження у воді).

зерен, а тонка структура інтерметалідних фаз не спостерігається. При збільшенні у 20 000 разів чітко видно фазу, що зміцнює, та помітне зменшення частки γ' -фази, яка виділилася за переривчастим механізмом. Однак при цих температурах існує і збільшується γ' -фаза, що виділилася за безперервним механізмом (на електронно-мікроскопічному зображенні — у вигляді точок) [18].

Скуднов В. А. та співробітники [21] досліджували вплив термоциклічної обробки на структуру сплаву 44НХТЮ. Мікроструктури сплаву типу 44НХТЮ після різних видів термічної обробки представлені на рис. 2. Видно, що в результаті чотирьох циклів гартування зерно стає дрібнішим (рис. 2, б), ніж при звичайному гартуванні (рис. 2, а). Крім того, термоциклічний режим дозволяє одержати високу твердість і щільність дислокації при малому розмірі зерна (бал зерна дорівнює 9).

Розміри структурних елементів елінварного сплаву 45НХТ вивчали в роботі [19]. Встановлено, що на розмір інтерметалідних фаз більше впливає температура відпуску. Так, при температурі відпуску 650 °С та витримці 100 год середній розмір виділених частинок γ' -фази дорівнював 15 нм, тоді як при температурі 800 °С і такій же витримці він збільшувався до 80 нм. Для сплаву 45НХТ у вихідному стані середній розмір аустенітних зерен становить 15 мкм. При температурі гартування 890—970 °С розмір зерна змінюється несуттєво (від 17 до 22 мкм), тоді як при підвищенні температури до 1070 °С відбувається різке збільшення розміру зерна (до 120 мкм) [22].

Смирнова А. В. [20] встановила, що у структурі сплаву Н36ХТЮ, крім γ' -фази, по границях зерен були розташовані карбіди титану, а також карбіди типу $M_{23}C_6$ на основі хрому, але кількість цієї фази невелика, приблизно 0,15% від загальної маси. Розміщення сплаву при підвищенні температури старіння обумовлене коагуляцією карбідної фази і перетворенням її у стабільну гексагональну фазу, а також коагуляцією останньої і наступними процесами розчинення вторинних фаз, що зміцнюють.

Сплав 44НХТЮ

Елінварні сплави мають відносно невисокий рівень механічних властивостей в недеформованому стані. Підвищення границі пружності сплавів до 1,0—1,1 ГПа досягається лише після холодної пластичної

деформації з високим ступенем (90—98%) і реалізується лише в невеликих перетинах. Застосування високоміцних мартенситних сплавів в якості елінварних сплавів з високою границею пружності неможливе, тому що в них немає елінварного ефекту. Проблема вирішується при використанні мартенситно-аустенітних сплавів, що володіють підвищеними механічними властивостями (у порівнянні з аустенітними сплавами) і високими елінварними характеристиками, близькими до властивостей аустенітних сплавів.

Елінварний дисперсійно-твердіючий мартенситно-аустенітний сплав 44НХТЮ використовують для виготовлення пружних чутливих елементів прецизійних приладів: витратомірів, регуляторів швидкості і датчиків лінійних прискорень, динамометрів електронних ваг, волоскових спіралей годинникових механізмів. Сплав рекомендується застосовувати після низькотемпературної термомеханічної обробки з подальшим гартуванням і старінням. Враховуючи великий вплив попередньої обробки на властивості сплаву, конкретні режими деформації і термічної обробки підбираються для кожної партії сплаву в залежності від заданих механічних властивостей. Високий запас пластичності в гарячому і холодному станах дозволяє виготовляти з цього сплаву вироби складної форми. Сплав зберігає температурну стабільність модуля пружності до температури 200 °С. Можна стверджувати, що пружні сплави стають все більш прецизійними. Наприклад, елінварні сплави 44НХТЮ і 44НХМТ, які використовують у коливальних ультразвукових системах завдяки застосуванню останніх досягнень металургійної технології, успішно конкурують з монокристалами кварцу, кристалами спеціально вирощених сполук, спеціальними сортами скла.

Елінварні сплави, одержані методом порошкової металургії

Порошковий елінвар з'явився в середині 80-х років [23], а в 1989 році був одержаний перший патент на порошковий елінварний сплав [24]. Поява порошкових елінварних сплавів обумовлена тим, що досягти високих експлуатаційних властивостей елінвара можна лише у вузькому концентраційному інтервалі, а магнітомеханічні характеристики є функцією хімічного складу мезооб'ємів.

У порошкових матеріалах з полікомпонентних шихт додатковими факторами є пористість і концентраційна неоднорідність. Порошкові матеріали з низькою пористістю можна отримати високошвидкісним або динамічним гарячим пресуванням. Матеріали з підвищеною густиною одержують при використанні порошку з високою відносною насипною густиною проведенням декількох циклів пресування—спікання. Однак досягнення бажаної пористості не розв'язує задачу створення мезоскопічно гомогенних виробів, оскільки гомогенні порошки елінварів промисловість не виробляє [25]. Технологічний процес одержання порошкового елінвару включає відпал порошку, розмел і просів, змішування порошків в змішувачі місткістю 2 кг із зміщеною віссю впродовж 8 год, пресування при тиску 600 МПа, спікання при температурі 1250—1300 °С у вакуумі.

Близькі значення коефіцієнта варіації та збіг закону розподілу концентрацій порошкового і промислового елінварів марки 44НХТЮ дозволяють створити порошковий елінвар з високим комплексом магнітомеханічних параметрів.

Для покращення властивостей порошкових елінварних сплавів при їх виробництві додавали нанорозмірний порошок Ni [26, 27]. Вдалося

досягти більш гомогенної структури сплаву 44НХТМ, знизити пористість за рахунок введення в сплав гідриду титану і нанодисперсного порошку нікелю з розмірами частинок 50—70 нм в кількості 2%. Одержано елінварний сплав з властивостями, близькими до литого сплаву: щільність — 98%, модуль пружності — до 190 ГПа, границя плинності — 1100 МПа, відносне подовження — до 13%.

Висновки

Недоліком металургійного методу одержання елінварних сплавів є розбіжності за хімічним складом, що змушує виробників для сплавів кожної окремої плавки підбирати свої режими деформаційної обробки та старіння.

Розроблено технології одержання елінварних сплавів плавкою в індукційних печах та методами порошкової металургії з використанням звичайних порошків та нанорозмірних (спеціальних гомогенних порошків елінварних сплавів не існує).

Введення нанопорошків в невеликій кількості суттєво активізує ущільнення, підвищує ступінь гомогенності та фізико-механічні властивості, що дозволяє виключити додаткові операції попереднього спікання та калібрування, які іноді застосовують для покращення властивостей елінварів.

1. *Прецизионные сплавы: (Справ.)* / Под ред. Б. В. Молотилова. — М. : Металлургия, 1983. — 439 с.
2. *Белов К. П.* Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. — М. : Гостеориздат, 1957. — 297 с.
3. *Бозорт Р.* Ферромагнетизм. — М. : ИЛ, 1989. — 531 с.
4. *Бараз В. Р.* Элинварные сплавы: особенности состава, структуры и свойств. Ч. 1 / В. Р. Бараз, В. А. Стрижак // Национальная металлургия. — 2003. — № 3. — С. 95—98.
5. *Гудремон Э.* Специальные стали. — М. : Металлургия, 1966. — Т. 1. — 736 с.
6. *Поволоцкий Д. Я.* Электрометаллургия стали и ферросплавов / [Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рошин, М. А. Рысс и др.]. — М. : Металлургия, 1984. — 568 с.
7. *Гуляев А. П.* Металловедение: (Учебник для вузов). — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.
8. *Зборщик А. М.* Новые материалы в металлургии: (Конспект лекций). — Донецк: ГВУЗ ДонНТУ, 2008. — 253 с.
9. *Аксенова С. И.* Влияние легирующих элементов на термоупругие свойства элинваров / С. И. Аксенова, С. Ю. Стародубов // [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: http://www.rusnauka.com/3_SND_2010/Tecnic/58231.doc.html – Загол. с экрана.
10. *Кучма С. Н.* Анализ влияния легирующих элементов на специальные термоупругие свойства элинваров / С. Н. Кучма, С. Ю. Стародубов // Сб. науч. трудов Донбасского гос. техн. ун-та. — Алчевск: ДонГТУ. — 2011. — Вып. 33. — С. 180—188.
11. *Кучма С. М.* Розробка дисперсійно-твердіючого елінвару та дослідження його термопружних властивостей / С. Н. Кучма, С. Ю. Стародубов // Сучасні технології в промисловому виробництві: Матеріали II Всеукр. міжвуз. науч.-техн. конф. — М.—Суми, 17—20 квітня 2012 р.: у 3-х ч. / Под ред. О. Г. Гусака, В. Г. Євтухова. — Суми : СумДУ, 2012. — Ч. 1. — С. 154—155.
12. *Кучма С. М.* Дослідження впливу термомеханічної обробки на спеціальні термопружні властивості елінвара / С. Н. Кучма, С. Ю. Стародубов // Сб. науч. трудов Донбасского техн. ун-та. — Алчевск : ДонГТУ. — 2012. — Вып. 36.
13. *Скобло Т. С.* Деформационно-термическая обработка дисперсионно-твердеющих сплавов системы Fe—Ni—Cr // [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: http://www.rusnauka.com/3_SND_2010/Tecnic/58234.doc.htm.
14. *Бараз В. Р.* Элинварные сплавы: особенности состава, структуры и свойств. Ч. 2 / В. Р. Бараз, В. А. Стрижак // Национальная металлургия. — 2003. — № 3. — С. 95—98.
15. *Сундуков В. А.* Деформация и разрушение элинварного сплава 44НХТЮ / В. А. Сундуков, С. В. Харитонов, М. К. Чегуров // Сб. материалов 4-й Междунар. конф. "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов", М., 25—28 октября 2011 г. — М. : ИМЕТ РАН, 2011. — 390 с.
16. *Прецизионные сплавы с особыми свойствами теплового расширения и упругости.* — М. : Стандарт, 1972. — 152 с.

17. Кучма С. М. Анализ физико-механических свойств элинварных сплавов // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. — 2005. — Вып. 18, № 6/1. — С. 27—29.
18. Кучма С. М. Исследование структурных превращений в сплаве 44НХМТ при термической обработке // Там же. — 2006. — Вып. 21, № 3/1. — С. 25—27.
19. Гитгарц М. И. Тонкая структура дисперсионно-твердеющего элинварного сплава 45НХТ / М. И. Гитгарц, В. И. Комарова, В. А. Кукаренко // Физика металлов и металловедение. — 1983. — **56**, вып. 5. — С. 997—1004.
20. Смирнова А. В. Электронно-микроскопическое исследование структурных превращений в сплаве 36НХТЮ // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1963. — № 11. — С. 4—9.
21. Скуднов В. А. Термоциклическая закалка сплава 44НХТЮ / В. А. Скуднов, Н. В. Редькина, С. В. Харитонов // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева. — 2012. — **96**, № 3. — С. 228—236.
22. Бараз В. Р. Структура и модуль Юнга стареющего элинварного сплава 45НХТ / В. Р. Бараз, В. А. Стрижак, Д. Н. Цыкин // Физика металлов и металловедение. — 1996. — **81**, вып. 2. — С. 94—103.
23. Исследование возможности применения элинварного сплава, полученного методом порошковой металлургии для резонаторов ЭМФ // Техн. отчет по НИР "Металлургия". — М., 1986. — 90 с.
24. А. с. 1480965 СССР, МКИ В 22 F 3/12, 3/24. Способ получения заготовок из порошковых элинваров системы Fe—Ni—Cr / [В. Н. Анциферов, В. П. Козлова, А. А. Шацов и др.] // Оpubл. 23.05.89, Бюл. № 19.
25. Шацов А. А. Порошковые элинвары // Металловедение и терм. обработка металлов. — 2008. — № 7. — С. 38—43.
26. Анциферов В. Н. Исследование порошкового прецизионного сплава типа 44НХТМ, полученного с использованием нанопорошков / В. Н. Анциферов, С. А. Оглезнева, М. Н. Порталов // Металлы. — 2011. — № 2. — С. 78—82.
27. Оглезнева С. А. Исследование структуры и свойств порошкового элинвара, полученного с использованием нанопорошков / С. А. Оглезнева, М. Н. Порталов // Сб. IV Всерос. конф. по наноматериалам, М., 01—04 марта 2011 г. // — М.: ИМЕТ РАН, 2011. — 574 с.

Влияние технологии получения на структуру и свойства элинваров

1. Современное состояние вопроса

К. А. Гогаев, П. И. Лобода, Ю. Н. Романенко, А. К. Радченко, Н. А. Пинчук

Изложен обзор современного состояния технологий получения элинварных сплавов и рассмотрено их влияние на структуру последних. Показано, что основным методом получения сплавов является плавка в индукционных печах. Неоднородность структуры и нестабильность свойств сплавов требует поиска других технологий их получения. Применение метода порошковой металлургии при изготовлении таких сплавов позволяет получать более гомогенную структуру, в том числе и за счет использования нанодисперсных порошков. Одним из направлений повышения свойств элинваров является уменьшение размера зерна.

Ключевые слова: элинвар, метод получения, структура, электронно-лучевой переплав, порошковая металлургия, модуль упругости.

Impact of technology for the structure and properties elinvariv

1. Modern outlook

K. O. Gogaev, P. I. Loboda, Y. M. Romanenko, O. K. Radchenko, M. O. Pinchuk

Presents a review of current technologies for elinvariyh alloys and their influence on the structure of the latter. It is shown that the main method of obtaining alloys is melting in induction furnaces. The heterogeneity of the structure and instability properties of these alloys require finding other technologies for their preparation. Application of powder metallurgy in the manufacture of these alloys allows to obtain a more homogeneous structure, including through the use Nanodispersed powders. One aspect of improving properties elinvariv is to reduce the grain size.

Keywords: elinvar, the method of obtaining the structure, electron beam melting, powder metallurgy, modulus of elasticity.