

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

## **ОСОБЛИВОСТІ ГАРЯЧЕДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛІНВАРУ 45НХТВЮ**

*Наведено результати досліджень структурного стану гарячедеформованого сплаву 45НХТВЮ. З'ясовано, що механізм формування структури сплаву у вихідному стані характеризується розпадом пересиченого твердого розчину за змішаною кінетикою з утворенням високооднорідної дрібнозернистої структури.*

**Ключові слова:** *елінвар, твердий розчин, гарячедеформований сплав, структура.*

*Приведены результаты исследований структурного состояния горячедеформированного сплава 45НХТВЮ. Выяснено, что механизм формирования структуры сплава в исходном состоянии характеризуется распадом пересыщенного твёрдого раствора по смешанной кинетике с образованием высокооднородной мелкозернистой структуры.*

**Ключевые слова:** *элинвар, твёрдый раствор, горячедеформированный сплав, структура.*

### **1. Вступ**

Характерною рисою сучасного машинобудування є постійне зростання попиту на матеріали зі спеціальними фізичними властивостями, зокрема елінвари. Зазначені сплави характеризуються специфічним комплексом термопружних та механічних властивостей: високою добротністю в поєднанні з близьким до нуля температурним коефіцієнтом частоти (ТКЧ) або температурним коефіцієнтом модуля пружності (ТКМП). Вони широко використовуються в сучасній електроніці та приладобудуванні для виготовлення чуттєво-пружних елементів, які працюють в широкому кліматичному інтервалі температур, зокрема резонаторів електромеханічних фільтрів.

Комплекс термопружних властивостей елінварів формується в процесі термічної обробки, пошук оптимальних технологічних схем якої триває і досі [1]. Поряд з цим, перспективним напрямком вдосконалення технології елінварів є оптимізація хімічного складу, наслідком чого є поява нових дисперсійно-твердіючих елінварів з поліпшеним

комплексом властивостей. Так на основі елінвару 44НХМТ було розроблено новий елінвар 45НХТВЮ з підвищеною добротністю [2].

Оскільки новий сплав розроблявся на основі дисперсійно-твердіючого елінвару залізоникелевої композиції 44НХМТ, то для його виготовлення застосовувалася та ж сама технологічна схема, що і для елінвару 44НХМТ [1]. Тому в якості вихідної заготовки для виготовлення резонаторів електромеханічних фільтрів та інших пружно-чуттєвих елементів використовувався дріт  $\varnothing 4,5$  мм.

Використання в якості вихідного матеріалу гарячедеформованих заготовок у вигляді круглого сортового прокату обумовлює необхідність враховувати той факт, що формування структури та отримання необхідних термопружних властивостей елінвару після термомеханічної обробки будуть в значній мірі визначатися як технологією проведення загартування, так і успадкуванням структурних особливостей гарячедеформованого стану, тобто стану постачання.

## **2. Постановка задачі**

Відомо, що вихідна структура гарячекатаної заготовки дисперсійно-твердіючих елінварів композиції Fe–Ni–Cr малого перерізу (в першу чергу зеренна будова) здатна чинити суттєвий вплив на формування термопружних властивостей сплаву, а, отже, і на властивості виробів з нього (резонаторів електромеханічних фільтрів) при подальшій термомеханічній обробці. Тому детальний аналіз структури гарячекатаної заготовки має важливе і досить самостійне значення в загальному циклі вивчення розробленого дисперсійно-твердіючого елінвару 45НХТВЮ.

## **3. Методики дослідження**

Мікроструктурні дослідження проводилися на оптичних мікроскопах МИМ-7 та «Neophot-21».

Електронно-мікроскопічні дослідження структури проводили на просвічувальному електронному мікроскопі JEV-120 при напруженні прискорення 100 кВ з використанням методу тонких фольг.

Металографічний аналіз використовувався також для кількісного оцінювання структури сплаву – розміру дійсного зерна та об'ємної частки продуктів переривчастого розпаду.

## **4. Результати досліджень**

В рамках дослідження було вивчено мікроструктуру гарячекатаних зразків. На рисунках 1 та 2 наведено мікрофотографії, отримані за допомогою оптичної та електронної мікроскопії. На металографічних фотографіях (рис. 1) виразно видно полідричні зерна аустеніту. При цьому границі містять виділення надлишкової фази, які формують практично замкнену сітку. Середній розмір зерна становить приблизно 15 мкм. Зерна характеризуються виразною однорідністю за розміром – від-

повідно до виконаних кількісних оцінок величина надійного інтервалу для рівня значимості  $\alpha = 0,05$  становить 1,7 мкм. При більшому збільшенні на окремих ділянках можна спостерігати границі пилоподібної зубчастої форми (рис. 2). Про можливість існування таких за формою границь зерен в елінварах відомо з роботи [3]. Водночас відомо з [4], що подібна форма границь зазвичай розглядається як структурна ознака проведення високотемпературної термомеханічної обробки сплаву.

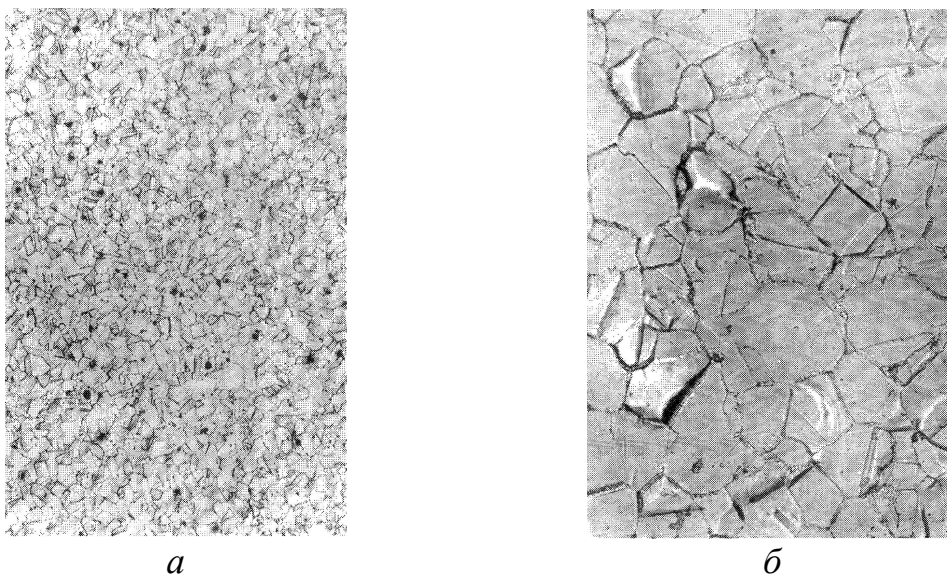


Рисунок 1 – Мікроструктура сплаву 45НХТВЮ в горячедеформованому стані: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 400$

Границі, які містять виділення, можна ідентифікувати як ділянки матричного твердого розчину, які частково зазнали розпаду за переривчастим механізмом та мають характерну перлітоподібну будову (рис. 2). Кількісна оцінка частки розчину, який зазнав такого перетворення, становить біля 8%. Проте електронно-мікроскопічне спостерігання тонких фольг свідчить також про наявність окремих ділянок матричної  $\gamma$ -фази, які мають характерну будову продуктів безперервного розпаду з виділеннями сферичної форми (рис. 2).

Крім того, спостерігаються обсяги аустеніту, відносно вільні від виділень. При цьому вказані ділянки  $\gamma$ -фази зберігають полігонізовану структуру з підвищеною щільністю дислокацій (рис. 2, г, д).

Результати, наведені в роботі [5], та проведені дослідження показали, що основною фазою виділення в сплаві 45НХТВЮ є ізоморфна метастабільна інтерметалідна  $\gamma'$ -фаза типу  $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$  з ГЦК решіткою. Ідентифікувати дану фазу ні рентгеноструктурним аналізом, ні мікрорентгеноструктурним методом в гарячекатаному стані не можливо через відносно малу її об'ємну частку, а також внаслідок високої дисперсності

виділень (діаметр зонда суттєво перевищує розмір часток). Надійно ідентифікувати надлишкову фазу вдалося лише мікродифракційним аналізом тонких фольг [5].

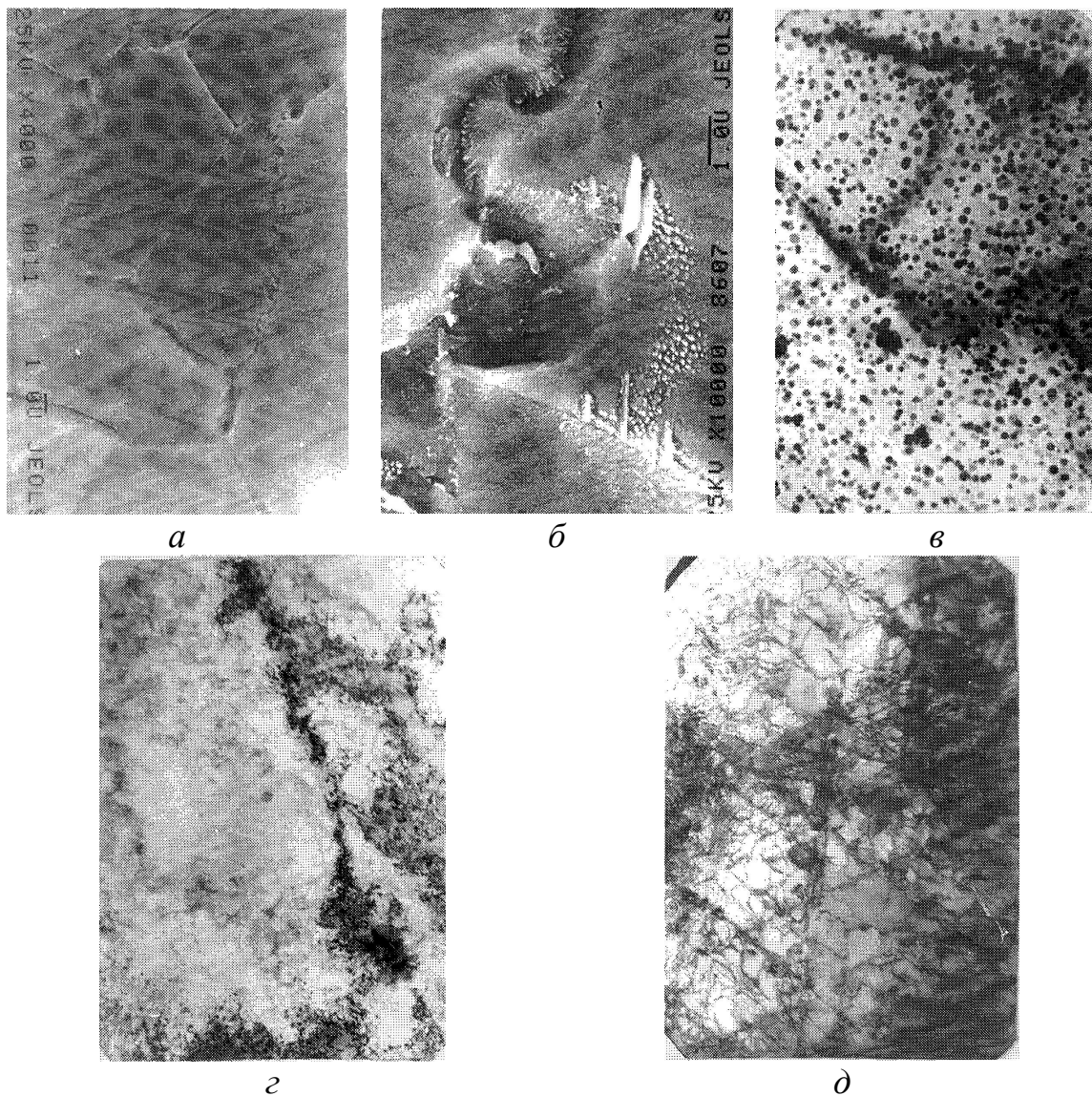


Рисунок 2 - Тонка структура гарячекатаного сплаву 45НХТВЮ:  
а –  $\times 4\,000$ ; б –  $\times 10\,000$ ; в –  $\times 22\,000$ ; г, д –  $45\,000$

В гарячекатаному сплаві зафіксовано можливість присутності ще однієї інтерметалідної фази – стабільної  $\eta$ -фази з ГПУ-решіткою (рис. 3). Растровою електронною мікроскопією та мікрозондовим аналізом  $\eta$ -фаза виявляється достатньо надійно. Присутність цієї фази насамперед обумовлено розвитком процесу кристалізації та в меншому ступені є результатом виділення з твердого розчину в процесі його розпаду. Про це свідчить дендритноподібна форма часток, а також їх значні розміри.

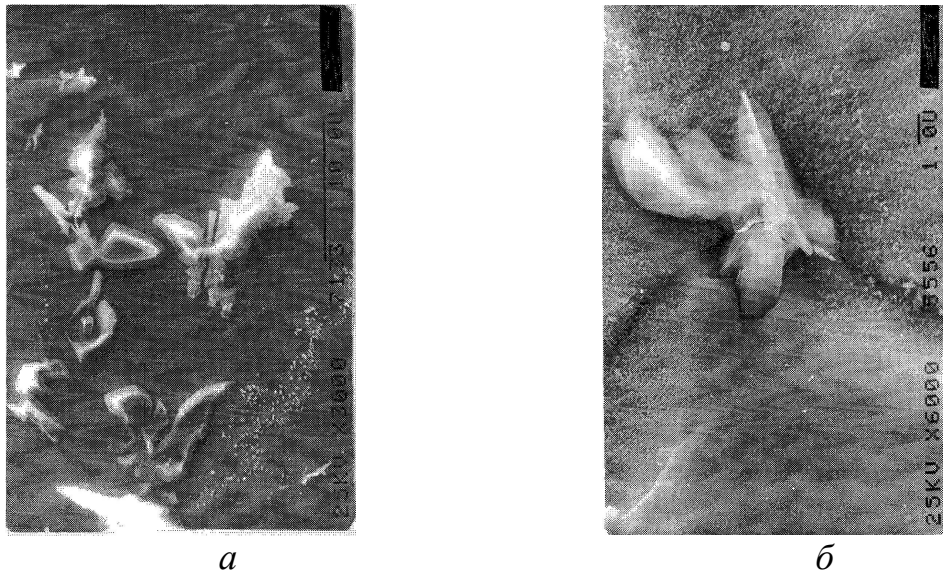


Рисунок 3 – Інтерметаллідна  $\eta$ -фаза в гарячекатаному сплаві 45НХТВЮ (у вихідному стані): а –  $\times 3\ 000$ ; б –  $\times 6\ 000$

Як було відзначено, структура гарячекатаного сплаву 45НХТВЮ може характеризуватися звивистістю границь поряд із звичайними, рівними границями. Така особливість спостерігалась і в інших сплавах даного типу, наприклад 36НХТЮ [6]. Вважається [3], що переривчастий розпад в основному відбувається на звивистих границях зерен. Подібна видима форма границь обумовлена наявністю включень, які стримують ріст комірок вздовж границі. Відзначається також [3], що всередині звивин границь зерен може відбуватися розпад вже в процесі загартування. Враховуючи вищенаведене, наявність таких зламаних границь в досліджуваному елінварі допустимо розглядати як свідчення часткового перетворення матричного  $\gamma$ -твердого розчину за типом переривчастої реакції в умовах охолодження з температур гарячої деформації.

Разом з тим зубчастість границь є також характерною ознакою ВТМО, коли ініційована динамічна рекристалізація приводить до локальної міграції окремих ділянок висококутової границі, тобто до утворення виступів («язиків») [7].

При цьому центри динамічної рекристалізації відрізняються меншою структурною досконалістю порівняно з новими зернами, які утворюються при звичайній статичній рекристалізації. Це пояснюється тим, що вони мають більшу щільність дислокацій за рахунок їх розмноження в процесі триваючого пластичного деформування.

Поряд з цим наявні ділянки матричного твердого розчину, структура яких зберігає ознаки динамічної полігонізації, що відбулася (рис. 2, б,в).

Таким чином, загальна особливість гарячедеформованого стану може бути охарактеризована у вигляді дрібнозернистої структури з виразно вираженою гетерогенністю, яка проявляється не лише в наявності часток виділення, але і в підвищеній дефектності матричного розчину внаслідок динамічної полігонізації та рекристалізації, що відбулися.

Аналізуючи дані зі структур гарячедеформованих зразків елінвару можна зробити висновок, що після гарячого деформування фіксується нерівноважна структура. Це підтверджується наявністю сітки виділень надлишкової фази по границях зерен.

## **5. Висновки**

1. Гарячекатана заготованка сплаву 45НХТВЮ у вихідному стані відрізняється наявністю матричного  $\gamma$ -твердого розчину, який має частки надлишкової  $\gamma'$ -фази типу  $\text{Ni}_3(\text{Ti,Al})$ , яка утворилася за змішаною кінетикою розпаду.

2. Переважною фазою виділення є ізоморфна  $\gamma'$ -фаза, яка характеризується сферичною морфологією в області безперервного розпаду та стрижнеподібну форму в комірках переривчастого розпаду. Поряд з цим вдається зафіксувати окремі крупні виділення, які відносяться до стабільної  $\eta$ -фази. Їх поява обумовлена, скоріш за все, розвитком процесу кристалізації.

3. У вихідному стані гарячекатаний елінвар зберігає порівняно дрібне зерно (не більше 20 мкм) та відрізняється високою однорідністю.

## **Бібліографічний список**

1. Кучма С.Н. Улучшение комплекса свойств элинварного сплава 44НХМТ методом комбинированной деформационно-термической обработки: Дис.: канд. тех. наук: 05.02.01: защищена 18.05.2010: утв. 10.10.2010 / Кучма Светлана Николаевна; ХНАДУ (ХАДИ). – Харьков, 2010.

2. Кучма С.Н. Анализ влияния легирующих элементов на специальные термоупругие свойства элинваров // С.Н. Кучма, С.Ю. Стародубов / Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. - Вып. 33. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – С.180 – 188.

3. Скаков Ю.А. О механизме зарождения ячеек приграничного распада пересыщенных твёрдых растворов с образованием изоморфных фаз / Ю.А. Скаков, К.В. Варли, Г.С. Маловзоров // Известия АН СССР. Сер. Физическая, 1970, т.34, №7. – С.1570–1573.

4. Полухин П.И. Физические основы пластической деформации / П.И. Полухин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.

5. Стрижак В.А. Оптимизация структуры и свойств крупносортового элинвара и поверхностного слоя резонатора – основа техноло-

*гии серийного производства монолитных упруго-чувствительных элементов ВЧ-датчиков: Дис. докт. техн. наук. – Свердловск: 1988.*

*6. Горелик С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С.С. Горелик и др. – М.: Металлургия, 1970. – 256 с.*

*7. Новиков И.И. Теория термообработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.*

***Рекомендовано до друку к.т.н., проф. Ульяницким В.М.***