

PACS: 61.10.Nz, 61.82.Bg, 62.20-x, 62.20.Fe, 62.40.+i, 62.80.+f

UDC: 539.25, 539.26, 539.424, 539.4.011.2

Низькотемпературні механічні властивості високоентропійного сплаву $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$, пластичність якого індукована двійникуванням

Т.В. Григорова¹, С.Е. Шумілін¹, Ю.О. Шаповалов¹, Ю.О. Семеренко¹,
О.Д. Табачнікова¹, М.А. Тихоновський², О.С. Тортіка², М.І. Цехетбауер³, Е. Шафлер³

1 Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, пр. Науки 47, Харків, 61103, Україна

2 Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут", вул. Академічна 1, Харків, 61108, Україна

3 University of Vienna, Boltzmannngasse 5, Vienna A-1090, Austria

grigorova@ilt.kharkov.ua

ORCID: 0000-0002-3585-9187, 0000-0002-5664-6228, 0000-0001-9274-7352, 0000-0003-2268-0572,

0000-0002-1866-7941, 0000-0001-5889-0366, 0000-0001-8430-8587

DOI:10.26565/2222-5617-2020-32-05

В роботі проведено дослідження низькотемпературної пластичності, пружних та дисипативних характеристик, а також мікроструктурної еволюції високоентропійного сплаву $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ у широкому інтервалі температур 300 – 0,5 К. Отримано температурні залежності межі текучості, деформаційного зміцнення, міцності та пластичності, а також акустичного поглинання та динамічного модуля Юнга. Знайдено, що структура сплаву $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ у вихідному стані є однофазною з ГЦК граткою, а у деформованому стані при низьких температурах, стає двофазною за рахунок деформаційно-індукованого фазового переходу. Крім цього, EBSD-аналіз структури сплаву виявив зміну морфології зерен та появу двійникових дислокацій після пластичної деформації при всіх досліджених температурах. Акустичні дослідження показали, що перехід від початкового стану до деформованого змінює характер температурної залежності динамічного модуля Юнга від майже лінійного до ступеневого, та зменшує його абсолютні значення.

Сплав $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ має відмінну міцність і пластичність при високій швидкості деформаційного зміцнення, що пояснюється значним внеском процесу двійникування. При зниженні температури від 300 до 4,2 К спостерігається сильна температурна залежність умовної границі текучості, яка вказує на термоактивований характер пластичної деформації сплаву у всьому дослідженому інтервалі температур.

В інтервалі температур 0,5-4,2 К спостерігалась аномалія межі текучості, а саме зменшення значення межі текучості при зниженні температури від 4,2 К до 0,5 К. Аномальна залежність межі текучості обумовлена зміною механізму подолання дислокаціями локальних бар'єрів від термоактивованого до інерційного, при цьому частина локальних перешкод долається дислокаціями безактиваційно. Це призводить до зменшення межі текучості з пониженням температури. При температурі 4,2 К і нижче, плавний характер пластичної деформації змінюється від плавного на стрибкоподібний. Стрибки починаються відразу після межі текучості і плавно збільшуються від 40 МПа до ~ 160 МПа.

Отримані результати є вкрай корисними і важливими для практичних застосувань високоентропійних сплавів при низьких температурах.

Ключові слова: високоентропійні сплави, пластичність, міцність, криогенні температури.

The low-temperature mechanical properties of the $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ high-entropy alloy, the ductility of which is induced by twinning

T.V. Hryhorova, S.E. Shumilin, Yu.O. Shapovalov, Yu.O. Semerenko, O.D. Tabachnikova,
M.A. Tikhonovsky, A.S. Tortika, M.I. Zehetbauer, E. Schafler

B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering NAS of Ukraine, 47 Nauki Ave., 61103 Kharkov, Ukraine

National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, 1, Akademicheskaya St., Kharkiv, 61108, Ukraine

University of Vienna, Boltzmannngasse 5, Vienna A-1090, Austria

In this work, we studied the low-temperature plasticity, elastic and dissipative characteristics, as well as the microstructural evolution of the $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ high-entropy alloy in a wide temperature range of 300 - 0.5 K. The temperature dependences of yield strength, strain hardening, strength and ductility, as well as acoustic absorption and dynamic Young's modulus are obtained. It was found that the structure of $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ alloy in the initial state is single-phase with fcc lattice, and in the deformed state at low temperatures it becomes two-phase due to the deformation-induced phase transition. In addition, EBSD analysis of the alloy structure revealed a change in grain morphology and the appearance of twin dislocations after plastic deformation at all investigated

© Григорова Т.В., Шумілін С.Е., Шаповалов Ю.О., Семеренко Ю.О.,
Табачнікова О.Д., Тихоновський М.А., Тортіка О.С., Цехетбауер М.І., Шафлер Е.,
2019

temperatures. Acoustic studies showed that the transition from the initial to the deformed state changes the character of the temperature dependence of the dynamic Young's modulus from almost linear to exponential, and reduces the absolute values.

The Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ alloy has excellent strength and ductility at a high strain hardening rate, which is explained by the significant contribution of the twinning process. With a decrease in temperature from 300 to 4.2 K, a strong temperature dependence of the yield strength is observed, which indicates the thermal activation of the nature of the plastic deformation of the alloys in this temperature range.

In the temperature range of 0.5-4.2 K, an anomaly of the yield strength was observed, namely a decrease in the value of the yield strength with decreasing temperature from 4.2 K to 0.5 K. The anomalous dependence of the yield strength is due to a change in the mechanism of overcoming local barriers from thermoactivated to inertial one, when part of the local obstacles is overcome by dislocations without activation. This leads to a decrease in yield strength with decreasing temperature. At a temperature of 4.2 K and below, the smooth nature of the plastic deformation changes from smooth to serrated. The jumps begin immediately after the yield strength and gradually increase from 40 MPa to ~ 160 MPa.

The results obtained are important for practical applications of high-entropy alloys at low temperatures.

Keywords: high-entropy alloy, plasticity, strength, cryogenic temperatures.

Низкотемпературные механические свойства высокоэнтропийного сплава Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀, пластичность которого индуцирована двойникованием

Т.В. Григорова, С.Э. Шумилин, Ю.А. Шаповалов, Ю.А. Семеренко,
Е.Д. Табачникова, М.А. Тихоновский, А.С. Тортика, М.И. Цехетбауер, Э. Шафлер

*Физико-технический институт низких температур им. Б. Веркина НАН Украины, пр-т Науки 47, 61103 Харьков, Украина
Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", ул. Академическая 1, Харьков, 61108, Украина
University of Vienna, Boltzmanngasse 5, Vienna A-1090, Austria*

В работе проведено исследование низкотемпературной пластичности, упругих и диссипативных характеристик, а также микроструктурной эволюции высокоэнтропийного сплава Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ в широком интервале температур 300 - 0,5 К. Получены температурные зависимости предела текучести, деформационного упрочнения, прочности и пластичности, а также акустического поглощения и динамического модуля Юнга. Обнаружено, что структура сплава Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ в исходном состоянии является однофазной с ГЦК решеткой, а в деформированном состоянии при низких температурах, становится двухфазной за счет деформационно-индуцированного фазового перехода. Кроме этого, EBSD-анализ структуры сплава обнаружил изменение морфологии зерен и появление двойниковых дислокаций после пластической деформации при всех исследованных температурах. Акустические исследования показали, что переход от начального состояния к деформированному меняет характер температурной зависимости динамического модуля Юнга от почти линейного к степенному, и уменьшает его абсолютные значения.

Сплав Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ имеет отличную прочность и пластичность при высокой скорости деформационного упрочнения, что объясняется значительным вкладом процесса двойникования. При понижении температуры от 300 до 4,2 К наблюдается сильная температурная зависимость предела текучести, которая указывает на термоактивированный характер пластической деформации сплава во всем исследованном интервале температур.

В интервале температур 0,5-4,2 К наблюдалась аномалия предела текучести, а именно уменьшение значения предела текучести при снижении температуры от 4,2 К до 0,5 К. Аномальная зависимость предела текучести обусловлена изменением механизма преодоления дислокациями локальных барьеров от термоактивированного к инерционному, при этом часть локальных препятствий преодолевается дислокациями безактивационно. Это приводит к уменьшению предела текучести с понижением температуры. При температуре 4,2 К и ниже, плавный характер пластической деформации меняется от плавного на скачкообразный. Скачки начинаются сразу после предела текучести и плавно увеличиваются от 40 МПа до ~ 160 МПа.

Полученные результаты важны для практических применений высокоэнтропийных сплавов при низких температурах.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, пластичность, прочность, криогенные температуры.

Вступ

Новий клас матеріалів – багатоконцентні високоентропійні сплави (ВЕС), які активно досліджуються в останні десятиліття [1-6], мають цілий ряд переваг у порівнянні із традиційними сплавами. Було з'ясовано, що в екстремальних умовах, а саме в області низьких температур, в ВЕСах, поряд з високою міцністю, спостерігається висока пластичність, яка реалізується завдяки активізації процесу двійникування [7]. Вважається [8], що поліпшення фізичних властивостей ВЕС пов'язано з підвищеними, у порівнянні із традиційними багатоконцентними сплавами, значеннями ентропії змішування. Це припущення спирається на уявлення

класичної термодинаміки [9] про те, що ентропія змішування між розчинними компонентами максимальна, коли ці компоненти перебувають в еквіатомній концентрації. Значення ентропії змішування в еквіатомних багатоконцентних сплавах підвищується з ростом числа компонентів, що входять у таку систему, а кристалічна ґратка ВЕС, що складається з атомів різнорідних елементів з різною електронною будовою та різними розмірами, суттєво спотворена в порівнянні з ідеальною ґраткою однорідних атомів, що забезпечує високу міцність ВЕС. У той же час дослідження останніх років показали, що у низки нерівноважних багатфазних ВЕС, структура яких містить концентрацію атомів,

відмінну від еквіатомної [10, 11, 12], теж спостерігаються поліпшені механічні властивості. При цьому, у таких ВЕС, за рахунок активізації в ході деформації додаткових механізмів пластичності, а саме, завдяки пластичності, індукованої двійникуванням (TWIP), у широкому інтервалі температур спостерігається висока пластичність при збереженні високої міцності. Так, в [11] для нееквіатомного ВЕС $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ за рахунок TWIP механізму при 300 К вдалося домогтися поліпшеного співвідношення "міцність - пластичність". Однак, на теперішній час систематичних досліджень у широкому інтервалі температур, особливо в області криогенних температур, впливу TWIP процесу на механічні властивості, на співвідношення "міцність - пластичність" явно недостатньо. Тому метою роботи є дослідження низькотемпературних (в інтервалі температур 300 - 0,5 К) механічних та акустичних властивостей і встановлення мікроефектів пластичної деформації ВЕС $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$.

2. Матеріали та методи досліджень

Нееквіатомний високоентропійний сплав $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ отримували шляхом дугової плавки у атмосфері аргону. Чистота легуючих елементів була вище 99,9 (ат.)%. Після лиття проводився гомогенізаційний відпал в атмосфері аргону при 1000° С протягом 24 годин, після чого злиток прокатувався до товщини $\approx 0,3$ мм з проміжними відпалами в атмосфері аргону при 1000° протягом 1 години після деформації ≈ 50 %. На електроіскровому верстаті вирізалися зразки для випробувань на розтяг розміром $16 \times 3 \times 0,3$ мм, після чого проводився фінальний відпал зразків в атмосфері аргону при 1000° С протягом 10 хв. Такий структурний стан зразків подальше визначати як вихідний стан. Мікроструктура зразків вивчалася методом рентгеноструктурного аналізу за допомогою дифрактометра ДРОН-УМ1 і Ultima IV в монохроматичному Cu-K α випромінюванні та методом трансмісійної електронної мікроскопії у мікроскопі JEM-2100F з роздільним здатністю 0,1 нм. Підкреслимо, що усі структурні дослідження для деформованих зразків здійснювалися у місцях, розташованих поблизу місця руйнування. Виміри механічних характеристик проводили у процесі активної деформації при одноосьовому розтягуванні з постійною швидкістю $1 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$ у температурному інтервалі 0,5-300 К. Для отримання криогенних температур використовувався рідкий гелій 3 (T=0,5 К), рідкий гелій 4 (T=4,2 К) і рідкий азот (T=77 К). Проміжні температури в інтервалі 77-300 К

отримували охолодженням зразків парами азоту, а 4,2-77 К – парами гелію. Отримані діаграми «навантаження – час» перераховували в координатах «напруження σ - пластична деформація ϵ » з урахуванням зміни поперечного перерізу зразка. Були визначені значення умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$, межі міцності σ_U (максимальної досягнутої напруження) та однорідної пластичної деформації ϵ_U , відповідної до значення σ_U .

Акустичні дослідження проведено методом механічної резонансної спектроскопії. Цей метод базується на вивченні лінійних згинальних коливань консольно закріпленого зразка – тонкої пластини при малих значеннях амплітуди акустичної деформації $\epsilon_0 \sim 10^{-7}$. У зразку збуджувалися змушені коливання пластини під дією циклічної електричної сили з варіюванням її частоти f поблизу першої резонансної частоти пластини f_r , яка реєструється експериментально $f_r = 400$ Гц. Динамічний модуль Юнга E для консольно закріпленого зразка визначається співвідношенням:

$$E = 38,3 \frac{f_r^2 \rho l^4}{h^2} \quad (1)$$

Де h , l та ρ - товщина, довжина та щільність зразка; значення числового коефіцієнту залежить від форми зразка та коефіцієнта Пуассона $\nu \approx 0,3$. Детальний опис методики вимірювання акустичного поглинання $Q^{-1}(T)$ та динамічного модуля Юнга $E(T)$ в цих експериментах наведено в [14-17].

3. Результати досліджень та їх обговорення

3.1. Опис мікроструктури

На рис. 1 подані дифрактограми мікроструктури сплаву $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ як у вихідному стані (а), так і у деформованому стані після руйнування при різних температурах: $T = 295$ К (б), $T = 77$ К (в), $T = 4,2$ К (г).

Видно, що у вихідному стані сплав є однофазним з ГЦК (гранецентрована кубічна) граткою. У той же час у деформованому стані з'являються піки другої фази з ГЦП (гексагональне щільне пакування) граткою, які зростають при зниженні температури деформації. Отже, при низьких температурах структура сплаву $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ стає двофазною за рахунок деформаційно-індукованого фазового переходу.

На рис. 2 наведені електронографічні (EBSD) зображення мікроструктури сплаву $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ у вихідному та деформованому станах.

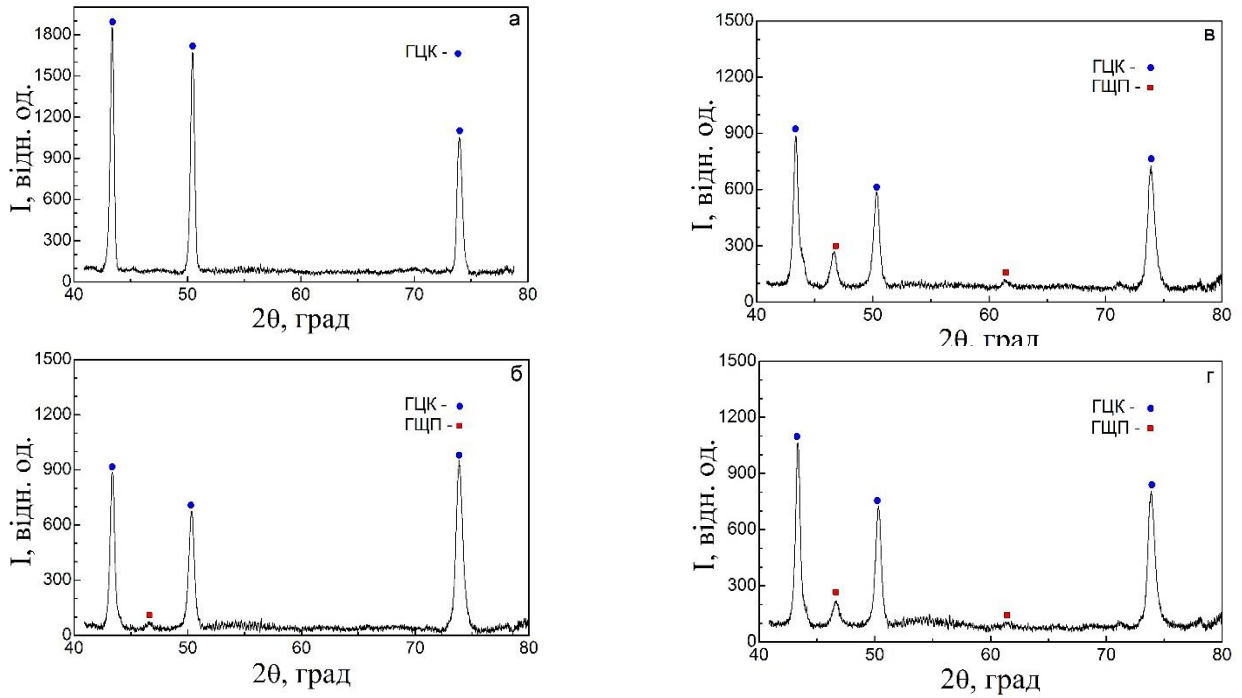


Рис. 1. Розподіл інтенсивності розсіяння рентгенівських променів $I(2\theta)$ в інтервалі кутів $40-80^\circ$ для сплаву $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ у різних структурних станах: (а) - вихідний стан; деформований до руйнування при різних температурах: (б) - $T = 295$ К, (в) - $T = 77$ К, (г) - $T = 4,2$ К.

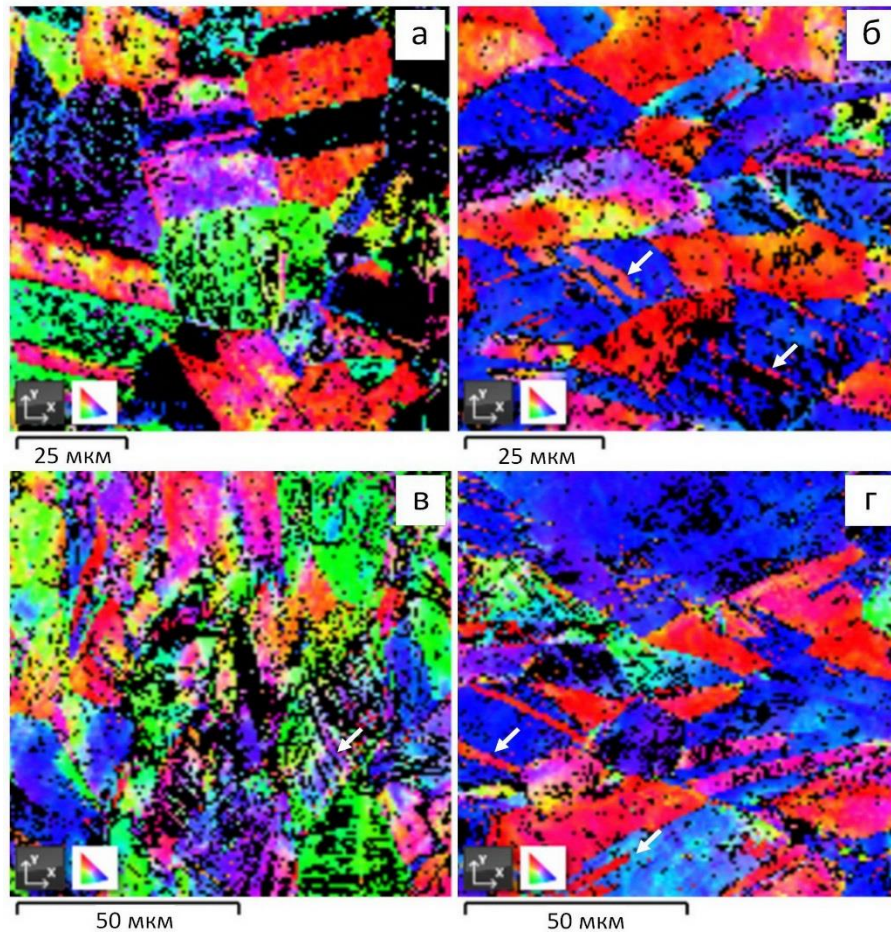


Рис. 2. Електронографічні (EBSD) зображення мікроструктури сплаву $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ у різних структурних станах: (а) - вихідний стан; деформований до руйнування при різних температурах: (б) - $T = 295$ К, (в) - $T = 77$ К, (г) - $T = 4,2$ К. Орієнтаційна карта в кольорах обратних полюсних фігур (ОПФ). Білими стрілками позначені двійники.

Видно, що при всіх досліджених температурах деформація приводить до зміни морфології зерен та появи двійникових дислокацій, які на рис. 2 вказані стрілками.

3.2. Деформаційні криві

На рис. 3 наведені деформаційні криві у координатах “напруга σ – деформація ε ”, отримані при одноосовому розтягуванні з постійною швидкістю $1 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ при температурах 295 К, 150 К, 77 К, 4,2 К та 0,5 К.

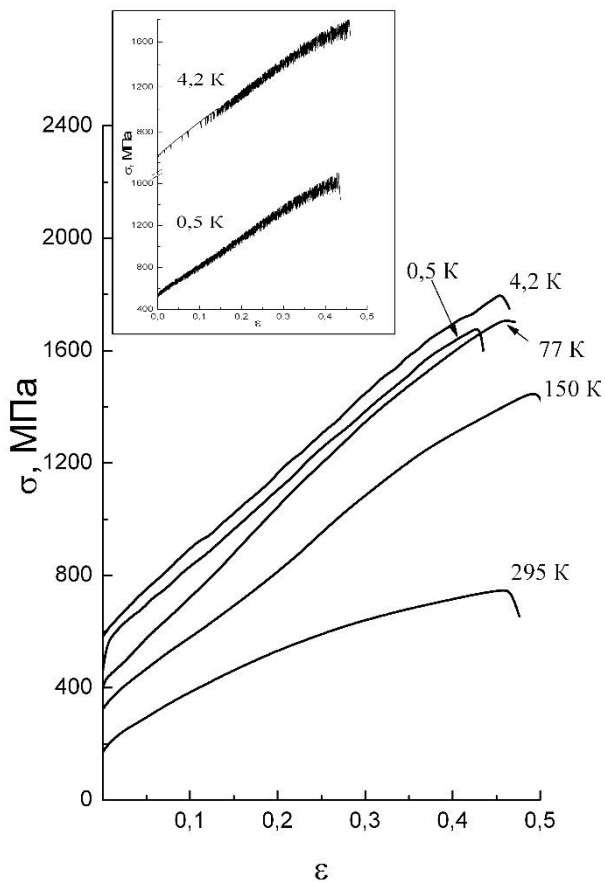


Рис. 3. Деформаційні криві високоентропійного сплаву $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ у координатах “напруга σ – деформація ε ”, отримані одновісним розтягненням при температурах 0,5 К, 4,2 К, 77 К, 150 К та 295 К (при 0,5 К та 4,2 К стрибки напруги на деформаційних кривих не показані). На вставці: деформаційні криві при 0,5 К та 4,2 К зі стрибками напруги.

Видно, що у всьому температурному інтервалі дослідженої сплаву має високий резерв пластичності. Величина однорідної деформації до руйнування ($\sim 0,45$) практично не змінюється при зниженні температури випробування. Також видно (рис. 3, вставка), що при температурі 4,2 К і нижче, плавний характер пластичної деформації змінюється від плавного на стрибкоподібний. Слід зазначити, що

стрибкоподібна деформація при низьких температурах характерна для багатьох ГЦК традиційних металів і сплавів [18], для яких вважається, що природа стрибків визначається спільною дією двох, пов'язаних один з одним: процесів: дислокаційним [19, 20] і тепловим [21-24]. Можна припустити, що і в дослідженому високоентропійному сплаві $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ низькотемпературна стрибкоподібна деформація має таку ж природу. Підкреслимо, що при температурі 0,5 К регулярні стрибки напруги на деформаційній кривій, починаються відразу після межі текучості, тривають уздовж всієї деформаційної кривої, плавно збільшуючись з ростом деформації від ~ 40 МПа до ~ 160 МПа.

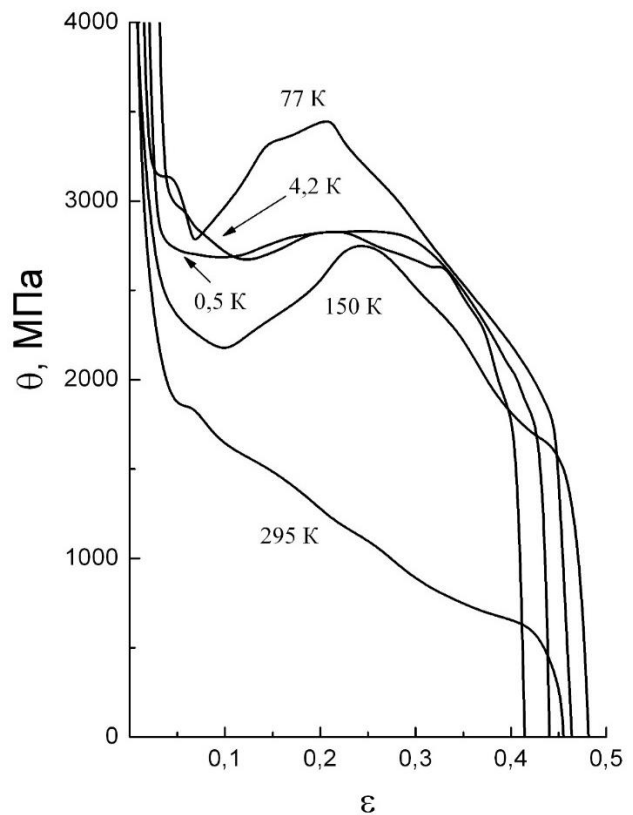


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів деформаційного зміцнення θ від деформації ε високоентропійного сплаву $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ при температурах 0,5 К, 4,2 К, 77 К, 150 К та 295 К.

Як видно з рис. 4 при усіх температурах деформування деформаційні криві мають стадійний характер, що вказує на спільність їхніх деформаційних механізмів. На початковій стадії коефіцієнт деформаційного зміцнення $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ швидко зменшується від значень ~ 5000 МПа до ~ 1750 МПа. Таке різке зменшення θ з ростом напруження на початковому етапі деформації обумовлено, як і в традиційних полікристалічних матеріалах, поступовим залученням зерен в процес пластичної деформації

через різну орієнтацію зерен по відношенню до напрямку зовнішньої сили і нерівномірним розподілом в них концентраторів внутрішніх напружень як джерел зародження дислокацій. При 295 К деформаційні криві мали двостадійний характер, з повільним зменшенням на другій стадії у ході деформації величини θ . При зниженні температури випробувань до 77 К і нижче на деформаційних кривих спостерігається три стадії. На другій стадії при 77 та 4,2 К спостерігається ріст θ , а при 0,5 К значення θ на цій стадії практично не змінюються. Така поведінка обумовлена посиленням внеском процесу двійникування при зниженні температури випробувань. Двійники створюють нові ефективні бар'єри для рухливих дислокацій, зменшують довжину їхнього вільного пробігу, створюють додаткові взаємодії із границями двійників і збільшують нагромадження дислокацій усередині зерен [25]. На третій стадії спостерігається подальше повільне зменшення величини θ у ході деформації.

3.3. Температурні залежності межі текучості та міцності

Як видно з рис. 5 в дослідженому ВЕС $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ при зниженні температури випробувань від 300 К до 4,2 К спостерігається значне (майже в 3 рази – від 191 МПа до 579 МПа) збільшення межі текучості, що вказує на термоактивований характер процесу пластичної деформації.

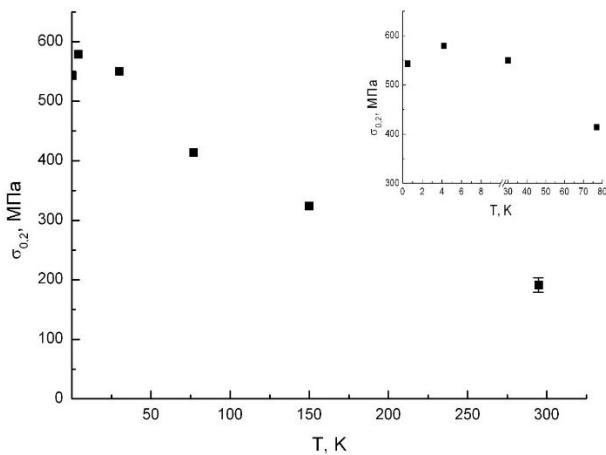


Рис. 5. Температурна залежність умовної межі текучості $\sigma_{0,2}(T)$ високоентропійного сплаву $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$. На вставці – у більш крупному масштабі залежність $\sigma_{0,2}(T)$ в інтервалі температур 77- 0,5 К.

Відзначимо, що отримана температурна залежність виглядає сильнішою, ніж в традиційних металах з ГЦК ґратками. Спостережувана в дослідженому сплаві залежність $\sigma_{0,2}(T)$ близька до залежностей $\sigma_{0,2}(T)$ для металів з ОЦК (об'ємноцентрована кубічна) або ГЦП решітками, для яких контролюючими механізмами для

руху дислокацій є як бар'єри Пайерлса, так і могутніші домішкові скупчення [26]. Подальше зниження температури до 0,5 К змінює температурний хід $\sigma_{0,2}$. Спостерігається зменшення величини $\sigma_{0,2}$ від 579 МПа (при 4,2 К) до 543 МПа (при 0,5 К), що свідчить про те, що у даному температурному інтервалі залежності $\sigma_{0,2}(T)$ не відповідають термоактивованому характеру пластичності. Такий аномальний хід температурної залежності межі текучості в дослідженому ВЕС, як і в ряді традиційних ГЦК сплавах [20, 25, 27-29], ймовірно може бути пов'язаний зі зміною механізму подолання дислокаціями локальних бар'єрів в результаті посилення інерційних ефектів. При переході від термоактивованого до інерційного механізму подолання дислокаціями локальних бар'єрів частина локальних перешкод долається дислокаціями безактиваційно, що, згідно з [20], призводить до зменшення межі текучості з пониженням температури. Інші характеристики деформаційних кривих при різних температурах, такі як межа міцності σ_U та відповідні їй значення пластичності ϵ_U подані в таблиці 1.

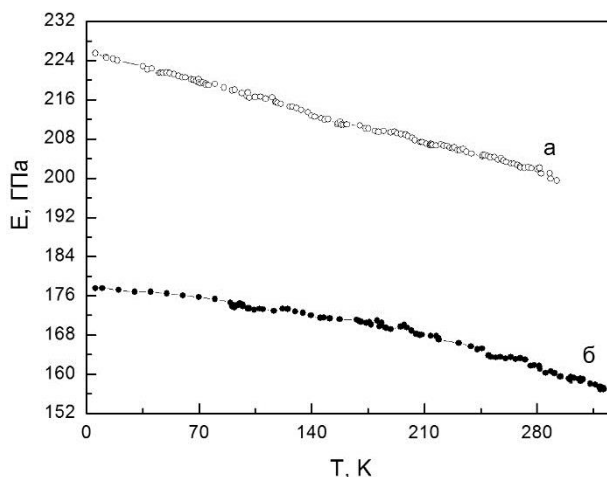
Таблиця 1.
Характеристики криогенної пластичності високоентропійного сплаву $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$

T, К	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_U , МПа	ϵ_U
295	191	746	0,46
150	324	1452	0,5
77	414	1710	0,46
30	550	-	-
4,2	579	1805	0,456
0,5	543	1690	0,43

Видно, що температурні залежності $\sigma_{0,2}(T)$ та $\sigma_U(T)$ мають подібний характер - при зниженні температури випробувань від 300 К до 4,2 К спостерігається збільшення межі міцності в порівнянні з її значенням при кімнатній температурі, а при подальшому зниженні температури до 0,5 К межа міцності зменшується. Максимальне значення межі міцності було зафіксовано при температурі 4,2 К, і дорівнювало 1805 МПа (Табл. 1).

3.4. Пружні та дисипативні характеристики досліджуваного сплаву

В широкому інтервалі температур отримано температурні залежності динамічного модуля пружності сплаву у початковому стані та після деформації 50 % при 30 К (рис. 6).



Виявлено, що в інтервалі температур 4,2 - 280 К

Рис. 6. Температурні залежності динамічного модуля пружності сплаву у початковому стані (а) та після деформації 50 % при 30 К (б).

температурні залежності динамічного модуля Юнга сплаву як у початковому, так і в деформованому стані мають монотонний характер: у початковому стані динамічний модуль зменшується на 11% від 225 ГПа при 4,2 К до 200 ГПа при 280 К, а у деформованому стані на 9 % від 177 ГПа при 4,2 К до 160 ГПа при 280 К. При цьому перехід від початкового стану до деформованого змінює характер температурної залежності динамічного модуля Юнга від майже лінійного до ступеневого, та зменшує абсолютні значення модуля приблизно на 20 % у всьому дослідженому інтервалі температур. Таке значне зменшення модуля в деформованому стані не може бути пояснене тільки впливом пластичної деформації і вірогідно пов'язане зі зміною структури сплаву, знайденими структурними методами (рис. 1), а саме появою другої ГЦП фази, індукованої деформацією при 30 К.

Висновки

1. Проведено комплексні експериментальні дослідження механічних властивостей низькотемпературної пластичної деформації та мікроструктури високоентропійного нееквіатомного сплаву $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ в інтервалі температур 300 - 0,5 К.

2. Знайдена температурна залежність фазового структурного стану: при температурах, нижчих ніж 77 К, однофазна ГЦК структура перетворюється в двофазну (з ГЦК та ГЦП фазами).

3. У всьому дослідженому температурному інтервалі спостерігаються високі деформуючі напруження при збереженні великої пластичності. Абсолютні

значення $\sigma_{0,2}$ вищі, а характер їхніх температурних залежностей набагато сильніше, ніж у традиційних ГЦК сплавах. При зниженні температури від 300 до 4,2 К спостерігається сильна температурна залежність умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$, яка збільшується на 200 %, (від 191 до 579 МПа).

4. В інтервалі температур 0,5-4,2 К виявлене аномальне явище - зменшення межі текучості при зниженні температури. Висловлено припущення, що аномальна залежність межі текучості обумовлена дією механізму інерційного руху дислокацій.

5. Для різних температур випробувань деформаційні криві $\sigma(\epsilon)$ мають стадійний характер, що вказує на спільність деформаційних механізмів у цих умовах.

6. Для температур 150, 77 та 4,2 К на другій стадії деформаційних кривих визначено зростання коефіцієнта деформаційного зміцнення θ , який обумовлений значним внеском процесу двійникування.

7. Знайдено, що при переході від початкового стану до деформованого зменшуються абсолютні значення динамічного модуля Юнга, а також змінюється характер його температурної залежності від майже лінійного до ступеневого.

Таким чином, у високоентропійному нееквіатомному сплаві $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ в інтервалі температур 300 - 0,5 К проведені комплексні експериментальні дослідження механічних та акустичних властивостей низькотемпературної пластичної деформації та мікроструктури. Встановлено, що в інтервалі температур 300 - 0,5 К у сплаві спостерігається високоміцний стан та висока пластичність. Так, для 4,2 К межа міцності сягає значень ~ 1800 МПа при величинах пластичності ~ 40 %, що дозволяє вважати ці матеріали перспективними для криогенних застосувань.

References/Literature

1. W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan, T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau, S.Y. Chang. *Adv. Eng. Mater.*, **6**, 299 (2004).
2. B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent. *Mater Sci Eng*, **A 375-377**, 213 (2004).
3. A. Gali, E.P. George. *Intermetallics*, **39**, 74 (2013).
4. F. Otto, A. Dlouhy, Ch. Somsen, H. Bei, G. Eggeler et al. *Acta Mater.* **61** 5743, (2013).
5. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, M.C. Gao, K.A. Dahmen, P.K. Liaw, Z.P. Lu. *Progr. Mater. Sci.*, **61**, 1 (2014).
6. A.D. Pogrebnoak, I.V. Yakushchenko, A.A. Bagdasaryan, O.V. Bondar, R. Krause-Rehberg, G. Abadías, P. Chartier, K. Oyoshi, Y. Takeda, V.M. Beresnev, O.V. Sobol. *Mater. Chem. Phys.*, **147**, 1079 (2014).
7. M. Naeem, H. He, F. Zhang et al. *Sci. Adv.*, 2020.
8. B. Gludovatz, E.P. George, R.O. Ritchie. *JOM*, **67**, 2262 (2015).

9. D.A. Porter and K.E. Easterling. (Chapman & Hall, London, 1992).
10. Z. Li, D. Raabe. JOM, **69**, 11 (2017).
11. Z. Wu, H. Bei, G.M. Pharr, E.P. George. Acta Mater., **81**, 428 (2014).
12. G. Laplanche, A. Kostka, C. Reinhart, J. Hunfeld, G. Eggeler, E.P. George. Acta Mater., **128**, 292 (2017).
13. E.D. Tabachnikova, M.A. Laktionova, Yu.A. Semerenko, S.E. Shumilin, and A.V. Podolskiy. Low Temp. Phys., **43**, 1108 (2017); DOI: 10.1063/1.5004457.
14. Yu.A. Semerenko. Prybory i tekhnika eksperymenta, **48** (3), 162 (2005). (Ю.А. Семеренко. Приборы и техника эксперимента, **48** (3), 162 (2005)) [in Russian]
15. Yu.A. Semerenko. Instruments and Experimental Techniques, **48**, 608 (2005); DOI: 10.1007/s10786-005-0107-x
16. V.D. Natsik, Yu.A. Semerenko. Low Temp. Phys., **45**, 551 (2019); DOI: 10.1063/1.5097366.
17. Yu.A. Semerenko, V.D. Natsik. Low Temp. Phys., **46**, 78 (2020); DOI: 10.1063/10.0000367
18. V.V. Pustovalov. Low Temp. Phys., **34**, 683 (2008).
19. V.V. Pustovalov. Low Temp. Phys. **26**, 375 (2000).
20. V.V. Pustovalov, V.S. Fomenko. (Naukova dumka, Kiev, 2012).
21. B. Obst and A. Nyilas. Mater. Sci. Engin., **A 137**, 141 (1991).
22. B. Skoczen', J. Bielski, S. Sgobba, and D. Marcinek. Intern. J. Plasticity, **26**, 1659 (2010).
23. V.S. Bobrov, M.A. Lebedkin. Physics Of The Solid State, **35**, 1881 (1993).
24. V.S. Bobrov, M.A. Lebedkin. Physics Of The Solid State, **31**, 120 (1989).
25. M. Komarasamy, N. Kumar, Z. Tang, R.S. Mishra & P.K. Liaw. Mater. Res. Lett., **3** (1), 30 (2015).
26. V.I. Trefilov, *Deformation hardening and destruction of polycrystalline metals*, (Naukova dumka, Kiev, 1987).
27. E.F. Dudarev. (TSU, Tomsk, 1988).
28. R. Honicomb. *Plastic deformation* (Mir, Moscow, 1972).
29. S. Asgari, E. El-Danaf, S.R. Kalidindi, R.D. Doherty. Met. Mater Trans A., **28**, 1781 (1997).