

Original article

In print article

<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2022-36-05>

UDC 539.375.5; 539.374.3

PACS numbers: 61.72.-y; 61.72. Lk; 62.20. -x; 62.20.Mk; 62.20.Qp

ВИВЧЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ НА КОМПОЗИТАХ ВОЛЬФРАМУ ЗА ТРЬОХТОЧКОВОЮ МЕТОДИКОЮ

М.В. Лебедева

mery.lebedieva@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2933-0869>

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, 61022 Харків, Україна

Д. Терентєв

<https://orcid.org/0000-0002-1138-9803>

SCK-CEN Belgium nuclear centre, Boeretang 200, 2400 Mol

А. Лінкова

<https://orcid.org/0000-0002-0954-6793>

Інститут радіофізики та електроніки ім. А. Я. Усікова НАН України, 61085 Харків, Україна

С.В. Лебедєв

<https://orcid.org/0000-0002-5649-1908>

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, 61022 Харків, Україна

Надійшла до редакції 25 березня 2022 р. Переглянуто 18 квітня 2022 р.

Прийнята до друку 20 квітня 2022 р.

Метою даного дослідження є оцінка температури крихко-в'язкого переходу та вивчення мікроструктури зломів мініатюризованих композитів вольфраму методом трьохточкового згину. Вольфрам та композити вольфраму – найкращі технічні кандидати для виготовлення дивертору в майбутньому термоядерному реакторі ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Ці матеріали мають найвищу точку плавлення в порівнянні з іншими матеріалами, тому це кандидати матеріалів для зовнішнього шару дивертору повернутого до плазми. Оскільки температура плазми в ITER становить від 150×10^6 °C до 300×10^6 °C, тому важливим є саме вивчення впливу температури на матеріали.

Вплив температури на композити вольфраму досліджувався методом трьохточкового згину в температурному інтервалі 100-600 °C. Були досліджені три типи матеріалів: перший тип – чистий вольфрам ($W > 99,97\%$), виготовлений на замовлення Євросоюзу та Китаю для побудови Міжнародного Експериментального Термоядерного Реактору: IGP та два лабораторних типи: $W - 0,5\%ZnC$, $W - 2\%Y_2O_3$. Діапазони температур крихко-в'язкого переходу залежать від типу матеріалу, орієнтації зерен та прокатки. IGP і $W - 0,5\% ZnC$ були прокатані та випробувані у двох різних орієнтаціях зерен (L і T): WZC_L, WZC_T, IGP_L, IGP_T. Показано, що температурний перехід від крихкого до пластичного руйнування відбувається різко для композитів WZC_L (120-180 °C) і IGP_L (160-180 °C), повільніше для WZC_T (260-380 °C) і (350-500 °C). Встановлено, що межа текучості зменшується лінійно з температурою. Досліджувані матеріали з L-орієнтацією зерен мають більш високу еластичність і вищу межу міцності. В роботі досліджено три типи руйнування: транскристалічний тип (WZC_L, WZC_T, IGP_L, IGP_T) спостерігається, коли тріщина в металі проростає через зерна; інтеркристалічний тип (W-YO) руйнування по міжзеренним границям; або комбінація цих типів – змішане руйнування (WZC_L, WZC_T, IGP_T).

Ключові слова: трьохточкові випробування, крихко-в'язкий перехід, мініатюризація, композити.

Як цитувати: Лебедева М.В., Терентєв Д., Лінкова А., Лебедєв С.В. Вивчення механізмів тріщиноутворення на композитах вольфраму за трьохточковою методикою. Вісник ХНУ імені В.Н. Каразіна. Серія «Фізика», вип. 36, 2022; 41-48. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2022-36-05>

[org/10.26565/2222-5617-2022-36-05](https://doi.org/10.26565/2222-5617-2022-36-05)

In cites: *Lebedieva M.V., Terentyev D., Linkova A., Lebediev S.V.* Study of mechanisms of crack formation on tungsten composites using the three-point method. The Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Physics", Iss. 36, 2022; 41-48. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2022-36-05> (in Ukrainian)

ВСТУП

Мініатюризована технологія механічних випробувань зразків, відноситься до методів характеристики механічної поведінки матеріалів, розміри яких менші, ніж стандартні розміри зразків. Вперше ця методика привернула увагу в атомній промисловості під час вибору матеріалів для ядерних реакторів наприкінці 1970-х років. [7]. Для матеріалів, які контактують з плазмою, треба визначати ряд теплофізичних та механічних властивостей: твердість, межу текучості та міцності, температуру крихко-в'язкого переходу. Щоб отримати умови близькі до тих, які відбуваються в гарячій частині реактору, потрібно проводити дослідження в широкому температурному інтервалі та працювати з опроміненими матеріалами. Адже опромінення в реакторах приводить до розпухання (irradiation swelling) матеріалу. Процес розпухання – основний радіаційний дефект, що знижує пластичність металу. Для зменшення дози опромінення використовуються мініатюризовані зразки. Основні способи механічних досліджень, матеріалів що використовуються в ядерних реакторах: одновісні випробування на розтяг, трьохточковий тест на згин та тест Шарпі.

Випробування на згин проводять для матеріалів з високою твердістю – вищою 53 HRC. Перевага цього методу, при визначенні міцності твердих інструментальних матеріалів, полягає в тому, що стан навантаження матеріалу при дослідженнях близький до навантажень, які виникають під час роботи. При випробуваннях на згин твердих матеріалів досягається більш висока точність вимірювань, чим при випробуваннях на розтяг. По-перше, зникає недолік досліджень одновісного навантаження – перекося (від неточності установки зразка) при прикладенні навантаження, по-друге, за рахунок високої границі міцності краще виконувати більш в'язкі випробування на згин.

При більш високих температурах межа плинності знижується, а руйнування має більш пластичний характер. Та навпаки при більш низьких температурах межа плинності є вищою, а руйнування більш крихким за своєю природою. Це співвідношення з температурою пов'язане з коливаннями атомів. При підвищенні температури атоми в матеріалі вібрують з великою частотою та амплітудою. Температурна дія впливає на енергію утворення вакансій. Завдяки такому збудженому стану кристалічної ґратки разом з прикладеним навантаженням, зв'язки між атомами руйнуються і утворюються нові зв'язки з іншими

атомами матеріалу. Такий дефект кристалічної структури порушує регулярне чергування атомних площин та призводить до пластичної деформації металу. Проте, коли температура знижується зв'язки між атомами руйнуються, без утворення нових. В такому випадку ми маємо крихкий тип руйнування [8]. Для вивчення характеру руйнування потрібно розраховувати температуру крихко-в'язкого переходу – двох типів руйнування.

Властивість переходу матеріалу від крихкого до в'язкого з підвищенням температури називається ефект - крихко-в'язкого переходу. І навпаки зі зниженням температури пластичний матеріал стає більш крихким. Даний ефект спостерігається в металах з об'ємно-центрованою кубічною ґраткою (ОЦК) та в деяких матеріалах з гексагональною щільноупакованою ґраткою (ГЦУ), в багатьох неметалічних кристалах та полімерах. Для більшості ГЦУ-металів відсутня крихкість, вони залишаються пластичними при досить низьких температурах. Вирішальним питанням залишається те, яке значення ми знайдемо для критичної температури крихко-в'язкого переходу (Ductile-Brittle Transition Temperature, DBTT). Для чистого заліза та деяких сталей DBTT нижча кімнатної температури. Якщо взяти, наприклад, кремній (Si), то ми побачимо, що він достатньо крихкий при кімнатних температурах, DBTT для кремнію близько 700 °С.

В деяких статтях, присвячених темі температури крихко-в'язкого переходу, пояснюється, що в ОЦК-кристалі механізм руху дислокацій є більш складний ніж у ГЦУ-кристалах, оскільки останні мають більше систем ковзання або інших систем руху дислокацій. Та проблема полягає в тому, що розповсюдження дислокацій в ОЦК-кристалі потребує більшої термічної активації, чим в ГЦУ-кристалах.

Таким чином, поведінка DBTT являється результатом того, що процес потребує менше енергії для його функціонування. Енергія залежить від двох факторів: прикладеного навантаження та температури. Дислокаційний процес використовує обидва вклади, а ріст тріщин – тільки навантаження. Коли температура знижується, теплова енергія, що приймає участь у русі дислокацій, також зменшується, тому для їх переміщення потрібне більше навантаження. При критичних температурах DBTT навантаження не достатньо велике, щоб відбувався ріст тріщини.

На сьогодні існує багато робіт з досліджень механічних властивостей матеріалів на основі вольфраму. Однак механічні властивості комерційно

доступного матеріалу вивчаються із-за високої крихкості металу, що обмежує їх використання для побудови основного елементу реактору – дивертору. Існує декілька підходів для зниження крихкості: поліпшення чистоти, дрібнозернистість, створення композитів та легування. Встановлено, що додавання деяких елементів, таких як Re, Tc, Ti або Co, може поліпшити пластичність W, зменшуючи таким чином DBTT сплав. Однак деякі з цих елементів стають радіоактивними при опроміненні нейтронами, наприклад, Co або Re, останній, навіть утворює крихкі сигма-фази з первинними продуктами його ядерних реакцій (W - Re-Os) [12].

У роботі [13] отримані результати трьохточкових механічних випробувань мініатюризованих бінарних систем W-Ta з V-подібним надрізом. Геометричні розміри зразків становили 1,7x1,7x25 мм³. Розглянутий вплив мікроструктури та хімічного складу на поведінку руйнування вольфрам-танталу як функції температури. Отже, досліджувався сплав W-5%Ta та композит W-15%Ta, методом трьохточкового випробування в температурному інтервалі від 25 °C до 1200 °C. Трьохточкові випробування виконувалися в звичайних атмосферних умовах на повітрі (25-1000 °C) та в вакуумі (400 -1200 °C). При високих температурах бінарних сполук W-Ta є пластичним, завдяки розвитку механізму руху дислокацій та притуплення росту кінчика тріщини.

Метою досліджень, результати яких описані в статті, було вивчення механізмів руйнування при трьохточковому випробуванні на згин мініатюризованих зразків композитів вольфраму W - 0.5%ZnC, W - 2%Y₂O₃ та експериментально отримати температурні залежності крихко-в'язкого переходу.

МЕТОДИКА ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дані про міцність на згин та температуру крихко-в'язкого переходу знаходили методом трьохточкового згину, на зразках форми прямокутного паралелепіпеду з розмірами сторін відповідно 1 мм × 1 мм × 12 мм.

В роботі досліджувалися мініатюризовані композити на основі вольфраму W: WZC_L, WZC_T, W-YO, IGP_L, IGP_T (таблиця 1).

Зразок кладеться на дві опори з сталюю відстанню 8,5 мм. Зверху на центр робочої частини композита діє рухомий стержень, зі швидкістю 0,723 мм/хв, його край має заокруглену форму (рис.1). Радіус кінця стержня дорівнює r_c=1,25 мм. Такі незмінні величини умов випробування, покращують відтворення результатів механічних тестів. Механічні випробування вольфрамових композитів проводять до певного значення відносної деформації (max – 25%).

Трьохточкові механічні дослідження проводилися на універсальній деформаційній машині INSTRON

1362, в спеціальній камері SFL для роботи в широкому температурному інтервалі від -190 °C до +600 °C, стабілізація температури становила 20 хвилин. Температура вимірювалася за допомогою термопар.

Реальні експериментальні криві розраховувалися за стандартом ASTM D790 [15].

Для розрахунку навантаження на згині в будь-якому положенні штока в середній точці, потрібно користуватися формулою

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2},$$

де P – сила навантаження зразка [кН], L – відстань між двома опорами (довжина робочої частини) [мм], b – ширина зразка [мм], d – товщина зразка [мм].

Величину деформації зразка ε_f , всередині де діє максимальне напруження, можна розрахувати для будь-якого відхилення

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2},$$

де D – переміщення штока [мм], L – відстань між двома опорами (довжина робочої частини) [mm], d – товщина зразка [мм].

Для дослідження мікроструктури поверхні злому використовувався сканувальний електронний мікроскоп типу JEOL JSM6610LV SEM [16]. Зразки прикріплювалися на спеціальні утримувачі, максимальний розмір досліджуваного тіла 200 мм. Висока роздільна здатність 3,0 нм при 30 кВ забезпечує візуалізацію особливостей і деалей структури мікрооб'єктів на атомно-молекулярному рівні. Окрім звичайної візуалізації з роздільною здатністю в декілька сотень разів вищою ніж у звичайного оптичного

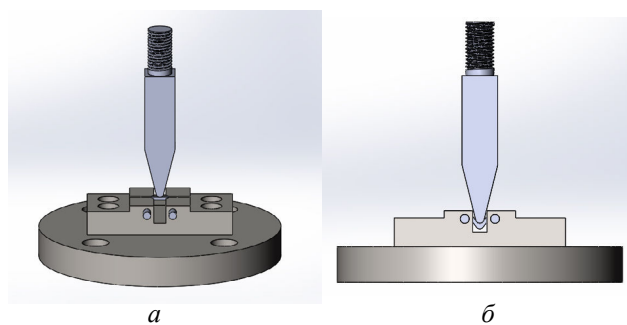


Рис.1. Змодельований вигляд трьохточкового тесту: а – початок та б – кінець випробування.

Fig.1. Scheme for three-point bending test: a – the start and b – the end of testing.

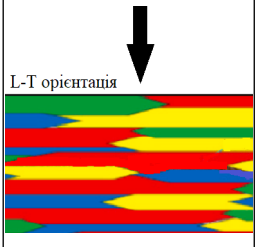
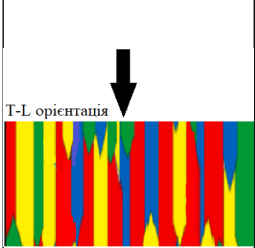
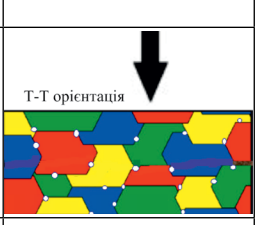
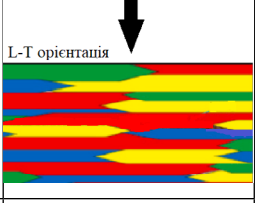
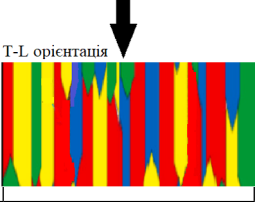
мікроскопа, на сканувальному електронному мікроскопі можна проводити трьохвимірні дослідження зразка.

Таблиця 1

Відомості про хімічний склад зразків та орієнтацію зерен

Table 1

Information on the chemical composition of the samples and grain orientation

Назва	Орієнтація зерен	Матеріал
WZC_L		Вольфрам W – 99,5% Металічний карбід ZnC – 0,05% Тип механічного впливу – прокатка Розмір зерна в напрямленні L – 6,66 мкм.
WZC_T		Вольфрам W – 99,5% Металічний карбід ZnC – 0,05% Тип механічного впливу – прокатка Розмір зерна в напрямленні L – 6,66 мкм.
W-YO		Вольфрам W - 98% Оксид ітрію Y ₂ O ₃ – 0,05% Розмір зерна – 4,17 мкм.
IGP_L		Чистий вольфрам W > 99,97% Тип механічного впливу – ковка Розмір зерна в напрямленні L – 87,44 мкм.
IGP_T		Чистий вольфрам W > 99,97% Тип механічного впливу – ковка Розмір зерна в напрямленні L – 87,44 мкм.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Експериментальні дані були отримані в різних діапазонах температур в залежності від типу зразків, для подальшого визначення температури крихко-в'язкого переходу та модуля пружності.

Оскільки відомий факт, що кристалічні зерна деформуються нерівномірно в різних кристаліграфічних напрямках, в деяких точках зерна виникають сили пружності, що значно перевищують

своє середнє значення, яке й призводить до руйнування металу. Виключно практичний інтерес представляє питання залежності механічних властивостей від текстури, тобто орієнтації зерен кристалічної ґратки. У відсутності структури в матеріалі W-YO, зерна не мають орієнтації (квазіізотропна структура) – його фізичні та механічні властивості не залежать від орієнтації, не дивлячись на те що кожне зерно має анізотропні властивості.

Матеріали отримані після механічної прокатки WZC та IGP мають макроскопічну анізотропію властивостей. Механічні властивості, такі як межа пружності, міцності та температура крихко-в'язкого переходу, вздовж (L-орієнтація) та впоперек (T-орієнтація) кристалічної ґратки значно відрізняються.

З залежностей максимальної деформації від температури зразків отримані криві крихко-в'язкого переходу з середньоквадратичною похибкою (рис.2). Виявлено, що матеріали з L-орієнтацією (рис.2а, в) мають значно нижчу температуру крихко-в'язкого переходу ніж матеріали з T-орієнтацією (рис.2 б, г). Перехід від ламкого стану в пластичний відбувається достатньо різко в композитах WZC_L(120-180 °С) та IGP_L (160-180 °С) відносно WZC_T (260-380 °С) та IGP_T (350-500 °С). Для матеріалу W-YO температура крихко-в'язкого переходу становить широкий діапазон 350-600 С (рис. 2 д).

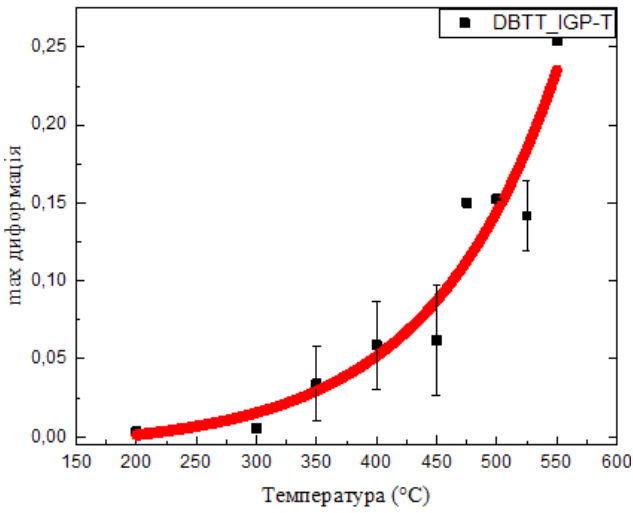
На рис. 3 зображені експериментальні залежності модуля пружності від температури для композитів : WZC_L, WZC_T, W-YO, IGP_L, IGP_T, на якому спостерігається падіння межі пружності з підвищенням температури. Результати досліджень доводять, що матеріали протестовані в L-орієнтації зерен мають вищу межу пружності та кращі міцнісні характеристики.

Розглянемо поверхні зломів зразків після випробування на згин, Із-за різної структури зразків: орієнтації зерен, вкраплень композитних матеріалів, відмінністю дефектів на границях зерен; а також різних умов проведення досліджень в інтервалі температур – вигляд зломів відрізняється.

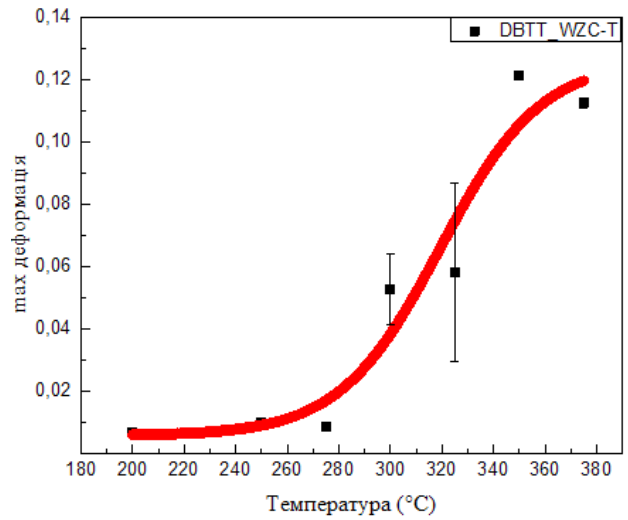
Також із-за різної мікроструктури зразків, в даних дослідженнях вплив дефектів на границях зерен, існує транскристалічна, інтеркристалічна та змішана поверхня злому. Вигляд залежить від того як розповсюджується тріщина: по тілу зерна чи по його поверхності.

Транскристалічне руйнування утворюється при розколі зерен. На зображеннях отриманих для IGP_L спостерігаються полоси ковзання дислокацій, по яких можна зрозуміти напрямок розповсюдження тріщин (рис. 4).

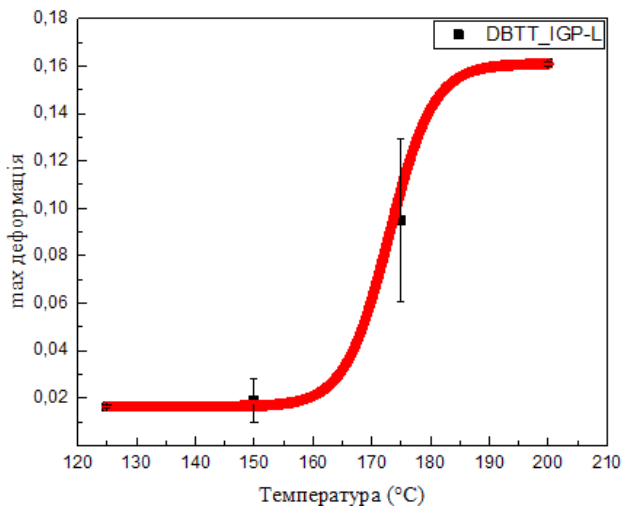
Інтеркристалічне руйнування утворюється при розповсюдженні тріщини по границям зерен. Такий тип



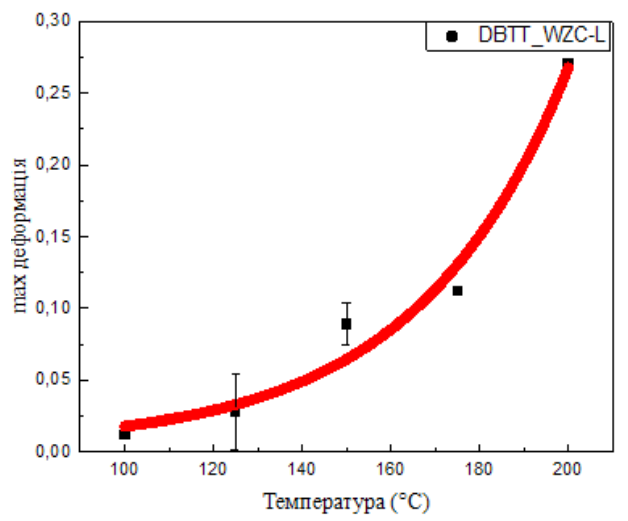
а



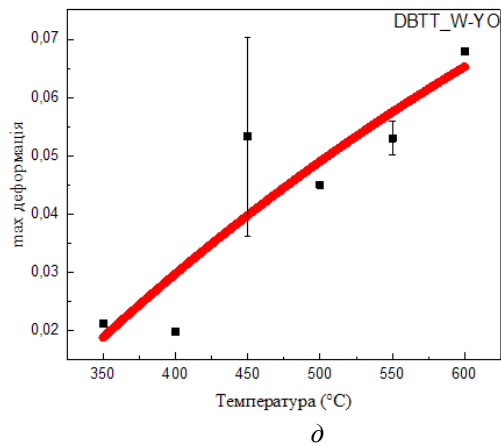
б



в



г



д

Рис.2. Криві температури кричко-в'язкого переходу композитів: WZC_L (а), WZC_T (б), IGP_L (в), IGP_T (г) та W-YO (д).

Fig.2. The DBTT ranges, which were evaluated from the tensile test results, of composites: WZC_L (а), WZC_T (б), IGP_L (в), IGP_T (г) and W-YO (д).

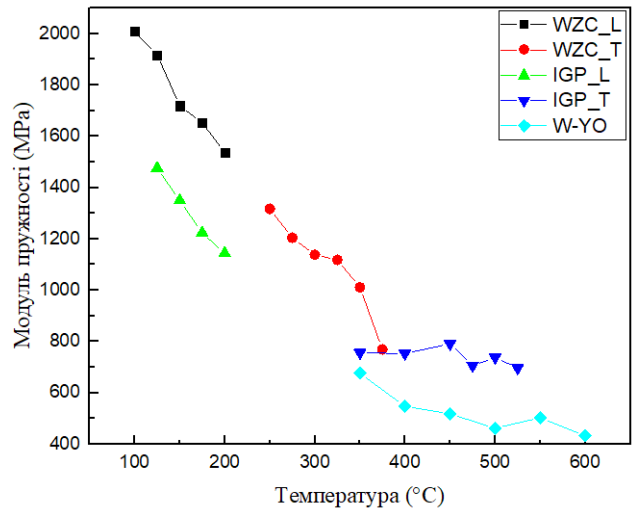


Рис.3. Температурні залежності величини модуля пружності для : WZC_L, WZC_T, IGP_L, IGP_T та W-YO.

Fig.3. The temperature dependence of the yield stress for WZC_L, WZC_T, IGP_L, IGP_T and W-YO .

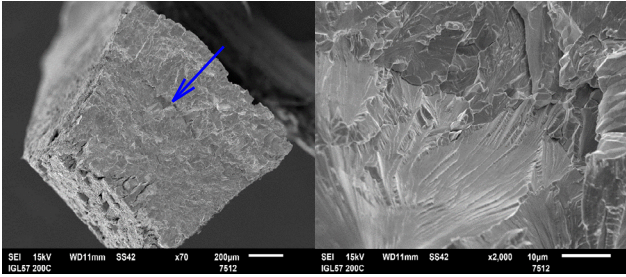


Рис.4. Транскристалічне руйнування зразків IGP_L (стрілкою показано напрямок навантаження).

Fig.4. Transgranular fracture of IGP_L (the arrow shows the load direction).

злому залежить від сегрегації домішків на міжзернових границях, внаслідок зменшення зернограничної енергії. В даній роботі такий вид злому демонструється на поверхні зразків W-2% Y₂O₃. На міжзернових границях оксид ітрію виглядає як сферичні пустоти (рис. 5).

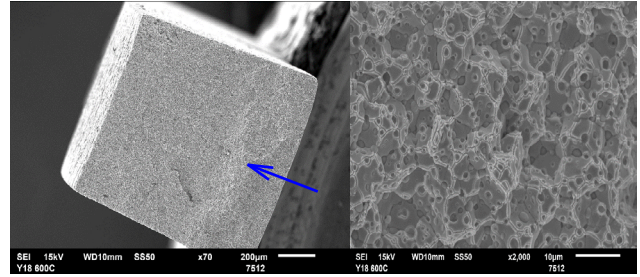
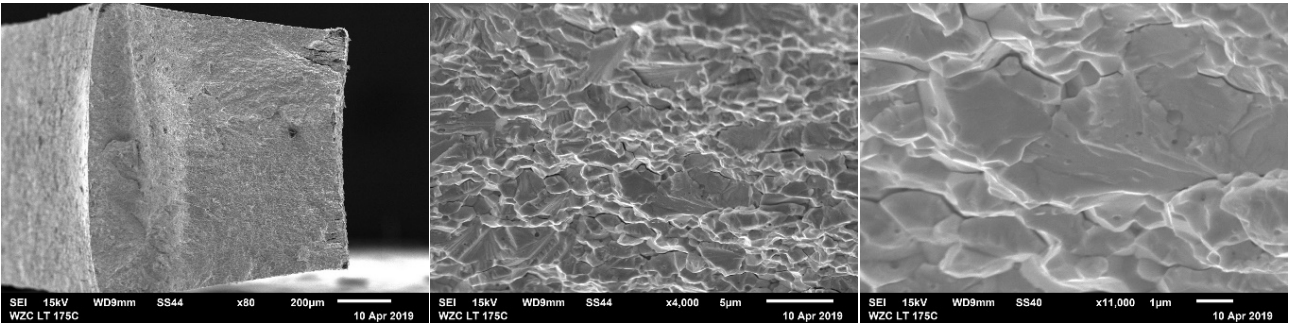


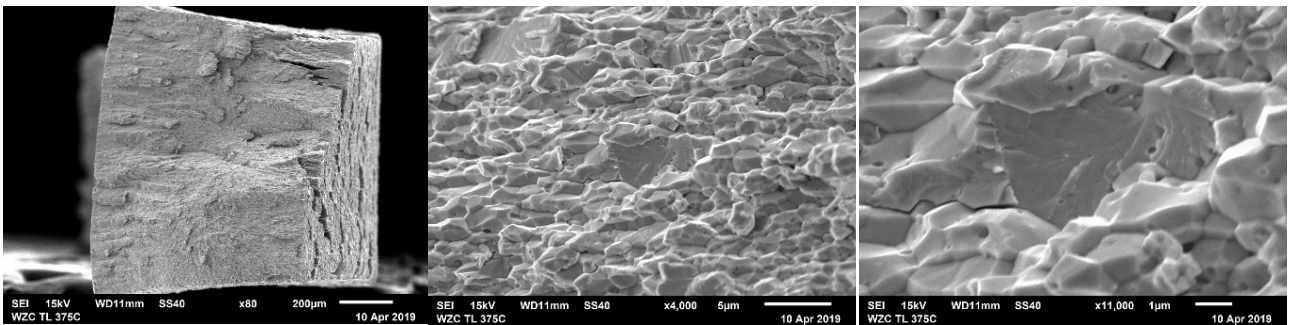
Рис.5. Інтеркристалічне руйнування зразків W-2%Y₂O₃ (стрілкою показано напрямок навантаження).

Fig.5. Intergranular fracture of W-2%Y₂O₃ (the arrow shows the load direction).

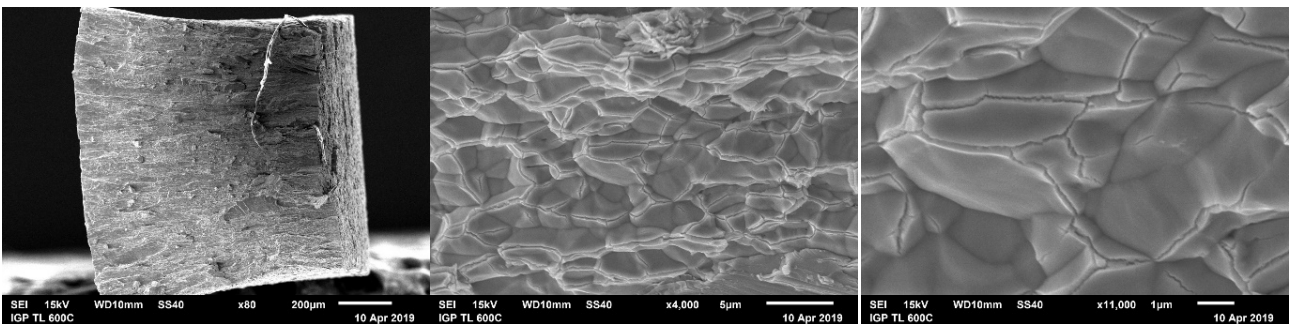
Існує термін змішаного типу руйнування – це поєднання руйнування мікроструктури поверхні злому двох видів: інтеркристалічного та транскристалічного. Змішане руйнування спостерігається в досліджуваних



a



b



c

Рис.6. Змішаний тип руйнування зразків: а – WZC_L при температурі випробувань 175 °С, б – WZC_T при температурі випробувань 375 °С, с – IGP_T при температурі випробувань 600 °С.

Fig. 6. Combination of transgranular and intergranular fracture: a – WZC_L at the test temperature 175 °C, b – WZC_T at the test temperature 375 °C, c – IGP_T at the test temperature 600 °C.

зразках: WZC_L, WZC_T, IGP_T.

WZC_L спостерігаються вторинні мікротріщини, які розповсюджуються перпендикулярно від основних – первинних (рис. 6а). Вірогідно, що мікротріщини з'явилися внаслідок зупинки на границях зерен. Характерний тип злому змішаний: переважно інтеркристалічний з локальними транскристалічними зломами.

WZC_T змішаний тип руйнування (рис. 6б). Можемо бачити, що переважає інтеркристалічний хід тріщини з локальними розколами зерен.

IGP_T руйнування з відслоюванням на границях зерен та боковими розколами (рис. 6в). Змішаний тип, спостерігаються сліди руху мікротріщин.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено, що на температуру крихко-в'язкого переходу впливає орієнтація зерен.
2. Показано, що температурний перехід від ламкого

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. E. Tejado. Mater. Sci. Eng. A 712, 738 (2018) .
2. T. P. Garcia. Microstructural and Mechanical Characterization of Tungsten based Materials for Fusion Reactors (2015).
3. C. Yin. Int. J. Refract. Met. Hard Mater., 153, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.04.003>
4. Y. Hiraoka. Materials Transactions, 46, 7, 1663 (2005).
5. В. А. Косенко, Н. Ф. Кушевська та ін. Матеріалознавство та матеріали у харчовій промисловості, Університет «Україна», К. (2017), 298 с.
6. П.П. Костин. Фізико-механічні випробування металів, сплавів та неметалічних матеріалів, Машинобудування, М. (1990), 256 с.
7. V. Karthik. CRC Press (2017). <https://doi.org/10.1201/9781315372051>
8. S. S. Sutar, G. Sharad Kale Engg, H. Sharad vaste Engg. IJERT. 1, 1, (2014).
9. Мильніков О.В. Опір матеріалів. ТНТУ, Т. (2010), 257с.
10. https://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture39/39_6.html
11. https://www.tf.unikiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/illustr/s9_1_1.html
12. Mutoh Y. J. Mater. Sci. 30, 770, 5 (1995).
13. J. Y. Pastor. EUROFUSION WPMAT - annual report. 10, (2019).
14. Instron FastTrack 8800 Materials Test Control System, Reference Manual – Configuration, M21-10011-EN, 2003.
15. ASTM D790: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.

стану в пластичний відбувається достатньо різко в композитах WZC_L (120-180 °С) та IGP_L (160-180 °С) відносно WZC_T (260-380 °С) та IGP_T (350-500 °С).

3. Доведено, що для всіх композитів відбувається падіння межі пружності з підвищенням температури.
4. Проаналізовано мікроструктуру та досліджено такі типи зломів: транскристалічний тип у матеріалів: WZC_L; інтеркристалічний тип, внаслідок сегрегації домішків на границях зерен: W-2% Y₂O₃ та змішаний тип WZC_L, WZC_T, IGP_T.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. E. Tejado. Mater. Sci. Eng. A 712, 738 (2018) .
2. T. P. Garcia. Microstructural and Mechanical Characterization of Tungsten based Materials for Fusion Reactors (2015).
3. C. Yin. Int. J. Refract. Met. Hard Mater., 153, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.04.003>
4. Y. Hiraoka. Materials Transactions, 46, 7, 1663 (2005).
5. V. A. Kosenko, N. F. Kushchevs'ka ta in. Materials science and materials in the food industry, Universytet «Ukrayina», K. (2017), 298 p. (in Ukrainian).
6. P.P. Kostin. Physical and mechanical tests of metals, alloys and non-metallic materials, Mashynobuduvannya, M. (1990), 256 p. (in Ukrainian).
7. V. Karthik. CRC Press (2017). <https://doi.org/10.1201/9781315372051>
8. S. S. Sutar, G. Sharad Kale Engg, H. Sharad vaste Engg. IJERT. 1, 1, (2014).
9. Myl'nikov O.V. Strength of Materials. TNTU, T. (2010), 257 p. (in Ukrainian).
10. https://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture39/39_6.htm
11. https://www.tf.unikiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/illustr/s9_1_1.html
12. Mutoh Y. J. Mater. Sci. 30, 770, 5 (1995)
13. J. Y. Pastor. EUROFUSION WPMAT - annual report. 10, (2019).
14. Instron FastTrack 8800 Materials Test Control System, Reference Manual – Configuration, M21-10011-EN, 2003.
15. ASTM D790: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.
16. W. Van Renterghem, Basic manual of the JEOL

16. W. Van Renterghem, Basic manual of the JEOL JSM6610LV SEM, work instruction, SCK-CEN, (2012), 759 p.
JSM6610LV SEM, work instruction, SCK-CEN, (2012), 759 p.

STUDY OF MECHANISMS OF CRACK FORMATION ON TUNGSTEN COMPOSITES USING THE THREE-POINT METHOD

M.V. Lebedieva¹, D. Terentyev², A. Linkova³, S.V. Lebediev¹

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine*

²*SCK-CEN Belgium nuclear centre, Boeretang 200, 2400 Mol*

³*Institute of Radiophysics and Electronics. A. Ya. Usikova NAS of Ukraine, 12, Ac. Proskura st., Kharkov, 61085, Ukraine*

Submitted March 25, 2022; Revised April 18, 2022; Accepted April 20, 2022

The aim of this study was evaluated the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) and microstructure of miniaturized tungsten composites by three point bending method. Tungsten and tungsten composites are the best technical materials candidates for the manufacture of a divertor in the future fusion reactor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Because tungsten has the highest melting point off all metals, it is candidate for plasma-facing materials. The ITER plasma temperatures to between 150 and 300 million °C, so it is important to study the effect of temperature on materials.

The effect of temperature on the mechanical properties of tungsten composites was studied by performing a number of three point bending tests at different temperatures (100-600 C). Three different types of materials were assessed: first one – IGP commercial pure tungsten (W > 99,97%), grades produced according to International Thermonuclear Experimental Reactor specifications in Europe and China and two laboratory types W - 0.5%ZnC, W - 2%Y₂O₃. The resulting DBTT ranges depending on the type of material, grain orientation affects and rolled. The IGP and W - 0.5%ZnC were rolled and tested in two different orientations of grains (L and T): WZC_L, WZC_T, IGP_L, IGP_T. It is shown that the temperature transition from brittle to plastic fracture occurs sharply for composites WZC_L (120-180 ° C) and IGP_L (160-180 ° C), slower for WZC_T (260-380 ° C) and (350-500 °C). The yield stress decrease linearly with temperature. The materials tested in the L- orientation of the grains have a higher elasticity and better strength characteristics. There are two types of fracture researched in work. After the crack has initiated in a metal it grows through the grains, which is called transgranular fracture (WZC_L, WZC_T, IGP_L, IGP_T), or along the grain boundaries, known as intergranular fracture (W-YO), or by a combination of transgranular and intergranular fracture (WZC_L, WZC_T, IGP_T).

Keywords: *three-point bending test, ductile to brittle transition, miniaturization, composites.*