

УДК 669-1

DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14731

Д. О. РЕМІЗОВ, Ю. І. БОГОМОЛ, П. І. ЛОБОДА

*Національний Технічний Університет України «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»***ВПЛИВ СТРУКТУРНО-ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗОВИХ СКЛАДОВИХ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗАКРИСТАЛІЗОВАНОГО ІЗ РОЗПЛАВУ ЕВТЕКТИЧНОГО СКЛАДУ Тi – TiV**

Досліджено особливості утворення сплаву із розплаву евтектичного складу Ti-TiV, та вплив структурно-геометричних характеристик фазових складових на механічні властивості.

Ключові слова: механічні властивості, сплав Ti-TiV, напруження, деформація, фазові складові, борид, титан.

Вступ та постановка задач досліджень. В роботах по дослідженню механічних властивостей природніх композитів, отриманих шляхом кристалізації розплавів евтектичних квазібінарних сплавів [1-12], доведено, що за постійної об'ємної долі фази, що кристалізується у вигляді стрижневих включень, механічні властивості і перш за все міцність композиту на порядок може змінюватися (від 200 МПа до 1,5-2 ГПа) внаслідок зменшення діаметру та збільшення кількості. Врахування сил тертя, що виникають між волокнами та матрицею під час механічного навантаження дозволило показати, що міцність волокон з мінімальним поперечним перетином меншим за 0,3 мкм складає близько 15-10% від величини модуля пружності, що наближається до теоретичної міцності матеріалу волокон, обумовлених міцністю міжатоного зв'язку. В системі Ti-TiV структура евтектичного сплаву закристалізованого із розплаву також представляє собою матрицю із титану пронизану волокнами із бориду титану [2], розмір яких змінюється в залежності від умов кристалізації при постійній об'ємній долі [3-7]. Відмінність структури евтектичного сплаву Ti-TiV полягає в тому, що металева матриця із титану пластична на відміну від керамічних композитів, у яких і матриця і волокна можуть проявляти тільки мікропластичність за нормальних умов випробувань.

Метою досліджень - є дослідження впливу кількості та розміру включень із бориду титану на міцність та пластичність кристалів евтектичного сплаву системи Ti-TiV оскільки, встановлені закономірності дозволять з'ясувати вплив природи матричної фази та розміру волокон на міцність композиційних спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів.

Методика проведення експерименту. Зразки для випробувань вирізалися із зливку діаметром 100 мм та висотою 150 мм закристалізованого в умовах електронно-променевого переплавлення [2]. Кількість включень в центральній частині та на периферії зливку відрізнялась в 4-10 разів. Відповідно і розмір включень, і перш за все, їх діаметр змінювались в стільки ж разів за умови приблизно однакової їх довжини. Випробування на розтягування проводились на сервогідроліній випробувальній машині MTS 318.25, максимальне зусилля 250 kN на короткочасне розтягнення із швидкістю деформації 2 мм/хв, 0,6 мм/хв та 0,2 мм/хв.

Поверхня зламів вивчалась за допомогою оптичного мікроскопа та скануючого електронного мікроскопа «РЭМ-106».

Встановлено, що з підвищенням швидкості деформування при однакових

структурно-геометричних характеристиках композиту величина міцності зростає (табл.1).

Таблиця 1

Вплив швидкості деформації на механічні характеристики композиту Ti-TiB

	№	Діаметр, мм ²	Площа, мм ²	Швидкість деформації, мм/хв	P , Н	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Кількість волокон, 100мм ² /шт
центр	1.1	2,97	6,92	2	5041	728	658,9	≈ 423
	1.2	2,98	6,97	2	5425	778	752,9	
	2.1	2,98	6,97	0,6	5052	725	700,7	
	2.2	3	7,07	0,6	5148	729	698,5	
	3.1	2,98	6,97	0,2	5026	721	667,5	≈ 71
	3.2	3	7,07	0,2	4773	676	669,3	
3.3	2,98	6,97	0,2	4884	701	657,6		
центр	4.1	3,98	12,43	0,2	8892	715	670,9	≈ 158
	4.2	3,97	12,37	0,2	8910	720	678	
	4.3	3,99	12,50	0,2	9155	733	674,6	
край	6.1	4	12,56	2	9431	751	727,7	≈ 832

Більш високі значення міцності та межі пластичності спостерігаються у сплавів з більшою кількістю включень із бориду титану (зразки 1.1 – 2.2, 6.1). На відміну від керамічних композитів [8] у яких збільшення кількості волокон в два рази призводить до збільшення в 4 рази міцності та на 30% твердості в компози-тах з металевою титановою матрицею збільшення міцності спостерігається на 10-20 % при збільшенні кількості включень в 4-10 разів (табл.1).

Діаграма напруження - деформація практично має однаковий вигляд (рис. 1-5). На діаграмі напруження деформація спостерігається не залежно від швидкості деформування та кількості включень 4 характерних ділянки. На першій (I) (рис. 1) нахил кривої найменший і відповідає пружній деформації титану VT1-0. На другому (II), збільшення нахилу, причому для кожного зразка початок збільшення нахилу відбувається при різному ступені відносної деформації. Це може бути обумовлено пружною та мікропластичною деформаціями в результаті взаємодії матриці та волокон із дибориду титану. На третій (III) ділянці напруження приймають волокна, у яких модуль пружності приблизно в 4 рази більший, тому і

нахил кривої до вісі деформування збільшується приблизно в 4 рази. Як руйнування окремих волокон, так і їх висмикування призводить до утворення пустот, зменшення площі поперечного перетину матричної фази, що і спричиняє зменшення напруження необхідного для деформування матеріалу композиту в цілому.

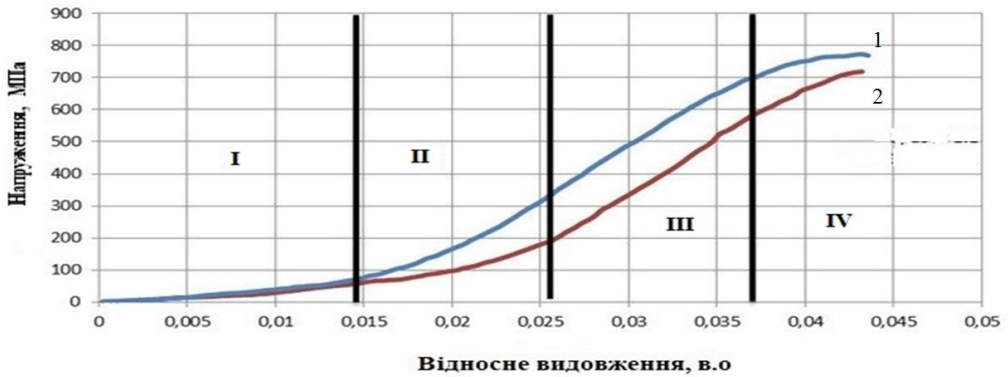


Рис. 1. Діаграма напруження – деформація при шв. деформації 2мм/хв. для сплаву Ті – ТіВ отриманий шляхом ЕПП; 1 – зразок 1.1, 2 – зразок 1.2

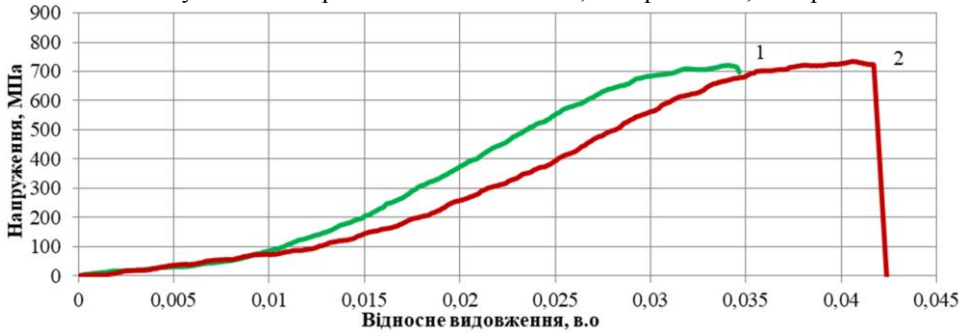


Рис. 2. Діаграма напруження – деформація при шв. деформації 0,6мм/хв для сплаву Ті – ТіВ отриманий шляхом ЕПП; 1 – зразок 2.1, 2 – зразок 2.2

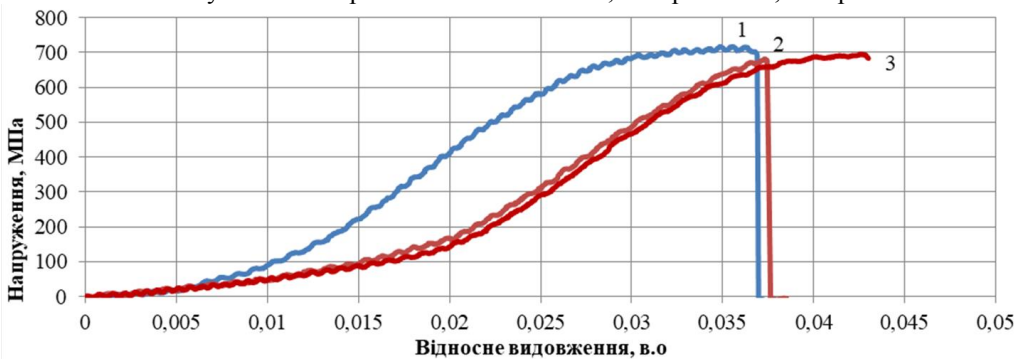


Рис. 3. Діаграма напруження – деформація при шв. деформації 0,2 мм/хв для сплаву Ті – ТіВ отриманий шляхом ЕПП; 1 – зразок 3.1, 2 – зразок 3.2, 3 – зразок 3.3

Зменшення швидкості деформування за однієї і тієї ж кількості волокон призводить до деякого скорочення ділянки пружної деформації матричної фази та збільшення всіх інших ділянок (рис. 2, 3, 4). Змінюється нахил кривої напруження-деформація, що може бути обумовлено інтенсивністю та ступенем реалізації мікропластичної деформації матриці поблизу волокон із бориду титану. Окрім того на всіх характерних ділянках зі зменшенням швидкості деформуван-

ня збільшується хвилястість кривої, що як правило в армованих композиційних матеріалах відбувається в наслідок руйнування або часткового витягування волокон із матричної фази. Окрім того можливе деформаційне зміцнення металеві пластичної матриці в локальних областях, що розташовуються між волокнами із високо - модульного бориду титану. На четвертій ділянці (IV) по мірі зменшення швидкості деформування збільшується, як стадія деформування при постійному максимальному напруженні так і стадія різкого зменшення напруження, що є ознакою катастрофічного руйнування.

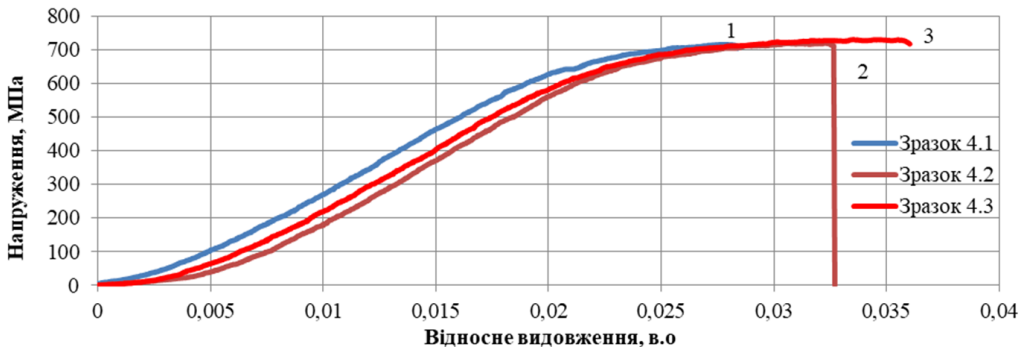


Рис. 4. Діаграма напруження – деформація композиту Ті – ТіВ з максимальною кількістю включень бориду титану за швидкості деформування 0,2мм/хв.; 1 – зразок 4.1, 2 – зразок 4.2, 3 – зразок 4.3

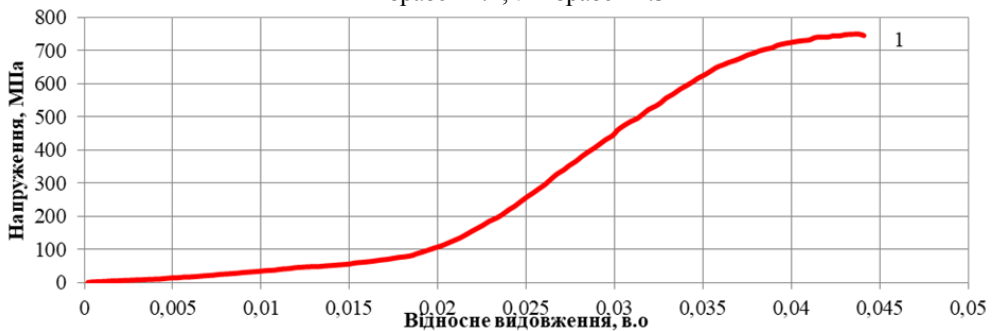


Рис. 5. Діаграма напруження – деформація композиту Ті – ТіВ з максимальною кількістю включень бориду титану за швидкості деформування 2мм/хв.; 1 – зразок 6.1

Збільшення кількості та зменшення розмірів, а від так і відстані між волокнами із бориду титану призводить до збільшення впливу високо модульної фази із бориду титану на пружні характеристики композиту, тобто при менших ступенях деформування волокна сприймають більше навантаження.

Четверта стадія у всіх випробуваних матеріалів не залежно від кількості волокон із бориду титану та умов випробувань має типовий характер пластичного деформування та ямкового локального руйнування. Відсутність явного зменшення напруження пластичного деформування при максимальних напруженнях та збільшення величини деформації за постійної величини напруження по мірі зменшення швидкості деформування, може бути обумовлене витягуванням волокон із матриці, в тому числі на всіх попередніх стадіях навантаження.

При чому величина напруження визначається об'ємною долею волокон, яка постійна для всіх випробуваних матеріалів, і тому величина та розмір волокон суттєво не впливають на максимальне значення міцності, а лише змінюють характер процесу руйнування. Мікроскопічними дослідженнями підтверджено збільшення ділянок пластичної деформації на поверхнях зламів та витягування во-

локон з слідами пластичної деформації матричної фази на поверхні каналів, що утворилися на місці витягнутих волокон (рис. 7, з).

Діаграми мають три характерних ділянки. На першій йде деформування матричної металевої фази. На другій, нахил до осі деформації зростає, що свідчить про пружне деформування включень із бориду титану. На третій ділянці відбувається збільшення величини деформації при незмінній величині напруження, що може бути пов'язаним з пластичною деформацією матричної фази. Оскільки зменшення напруження не відбувається то, можна вважати, що боридні включення не руйнуються, а переміщуються відносно матричної фази пластично, деформуючи ділянки поблизу поверхні розподілу включення - матрична фаза. Руйнування включень (рис.7) призводить до катастрофічного руйнування композиційного матеріалу. Навколо волокна спостерігається зона пластичного деформування матриці. Утворення зони пластичної деформації обумовлено переважно переміщенням волокна не в напрямку дії нормальних напружень, і тому висмикнутих волокон на поверхні руйнування спостерігається мало.

Поверхні руйнування (рис. 6, 7, 8) свідчать про те, що зі збільшенням швидкості деформування зменшується площа поверхні зайнята ділянками, що пластично деформуються. При мінімальних швидкостях деформації відбувається розділення включень із бориду титану на прошарки. Іншими словами, тріщина розповсюджується вздовж включень із бориду титану. Явище розшарування керамічних включень бориду титану в повздовжньому напрямку свідчить про те, що під час кристалізації включення виступають над фронтом кристалізації під час електронно-променевого переплавлення, що призводить до розростання диборидних включень вздовж фронту кристалізації. Збільшення включень відбувається шляхом формування зерен когерентно зв'язаних з первинними включеннями. Але за рахунок наявності домішок на границі між двома зернами міцність границі між двома зернами нижча ніж об'єму кристалу бориду, що призводить до їх розшарування під час механічного руйнування.

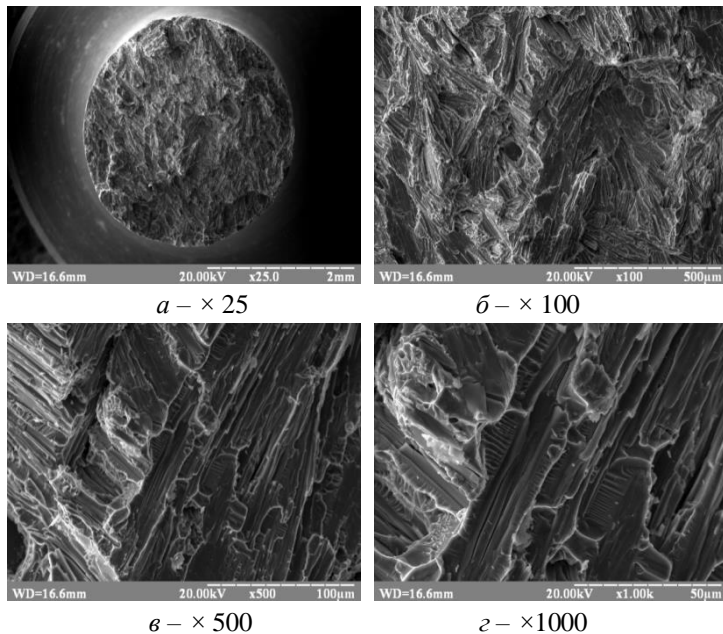


Рис. 6. Мікроструктура поверхні зламу Ti-TiB сформована під час випробувань на розтягування при швидкості деформації 0,2мм/хв

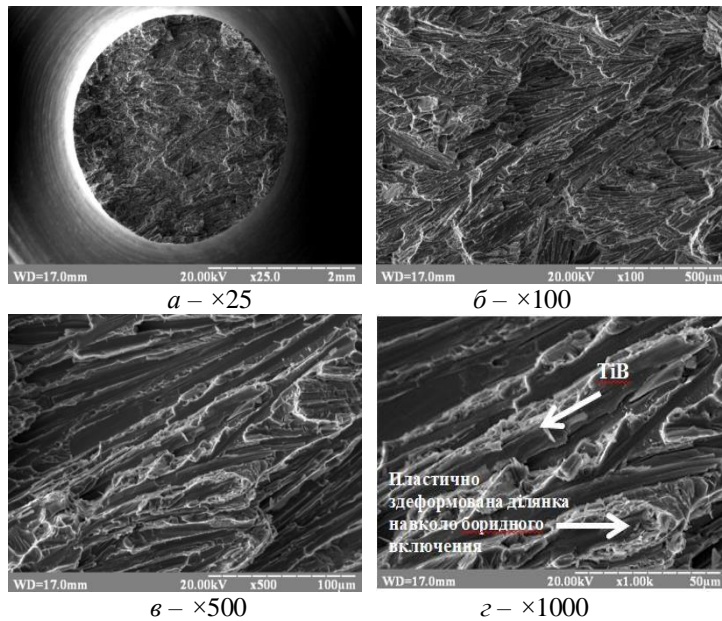


Рис. 7. Мікроструктура поверхні зламу Ti-TiB сформована під час випробувань на розтягування при швидкості деформації 0,6 мм/хв

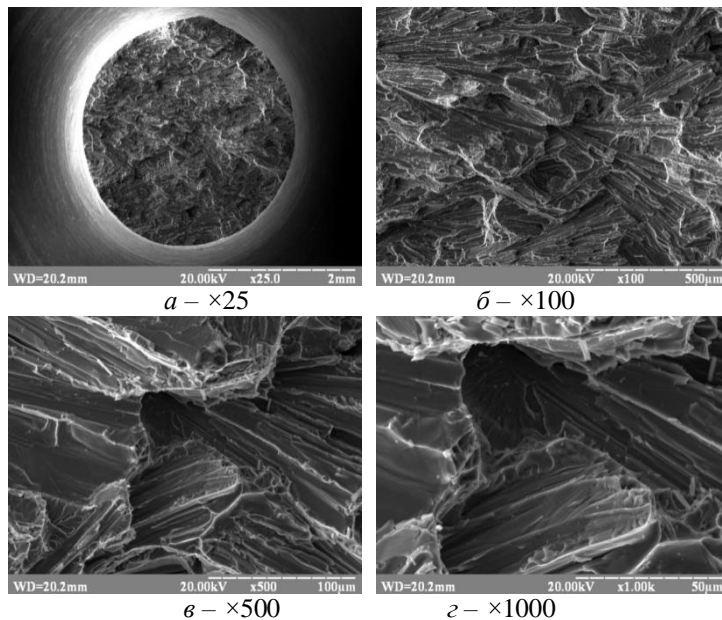


Рис. 8. Мікроструктура поверхні зламу Ti-TiB сформована під час випробувань на розтягування при швидкості деформації 2 мм/хв

Поверхня руйнування утворена при мінімальних швидкостях навантаження має більшу кількість ямок з слідами пластичної деформації їх стінок обумовлені витягуванням волокон із матричної фази (рис. 9).

Найбільш чітко видно на мікроструктурах зламів отриманих при мінімальних швидкостях деформування, що включення дибориду не тільки переміщуються в поздовжньому напрямку, але і згинаються. Поблизу зігнутих в процесі деформування волокон формуються області з ямковим характером руйнування,

що свідчить про можливість пластичної деформації матричної фази під час згинання волокон. Оскільки волокон, що виступають над поверхнею руйнування не спостерігається, то це може біти свідченням того, що під час пластичної деформації на початкових стадіях витягування та згинання іде збільшення міцності зв'язку між матрицею та включенням бориду. Міцність щеплення боридного включення з матрицею більша за міцність самого включення, тому відбувається руйнування включень і вже потім руйнування композиту в цілому.

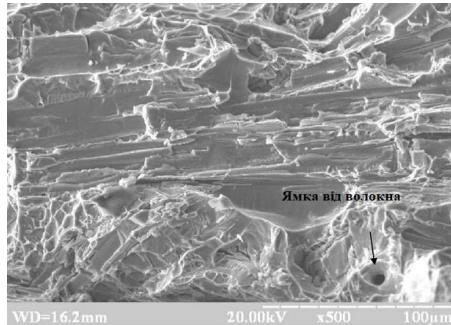


Рис. 9. Мікроструктура поверхні зламу композиту Ti – TiB та морфологія поверхні ямки, що утворилася на місці висмикнутого волокна під час випробувань на розтягування зі швидкістю деформації 0,2 мм/хв.

Висновки:

1. Таким чином в результаті випробувань на розтягування встановлено, що на відміну від керамічних армованих матеріалів, в металокерамічному композиті Ti – TiB, що представляє собою матрицю із технічно чистого титану пронизану керамічними включеннями із бориду титану на величину міцності переважно впливає об'ємна доля включень. Розмір і кількість включень змінюють тільки пружні характеристики композиційного металокерамічного матеріалу.

2. Фрактографічними дослідженнями поверхонь руйнування композитів утворених в результаті випробувань на розтягування зі швидкостями деформування 0.2 – 2 мм/хв. доведено, що міцність щеплення керамічних включень із бориду титану з матрицею із технічно чистого титану вища за міцність самих включень, в тому числі монокристалічних і тому не виступають над поверхнею руйнування матричної фази.

3. Показано, що включення складаються із двох та більше зерен, когерентно зв'язаних в повздовжньому напрямку, що призводить до руйнування включення із бориду титану в повздовжньому напрямку під час розтягування композиту в цілому.

4. Встановлено, що зменшення діаметру включень та збільшення їх кількості при постійній об'ємній долі дозволяє підвищити міцність в межах 100 МПа, але при цьому збільшити пластичність до 3-5 %.

Список літератури

1. Лобода П.І. Фізико-хімічні основи створення нових боридних матеріалів для електронної техніки і розробка керамічних катодних вузлів з підвищеною ефективністю. Дис. д.т.н.: 05.16.06. К., 2004. 512 с.
2. Лобода П.І., Ремізов Д.О., Григоренко С.Г., Березос В.О., Северін А.Ю. Однорідність мікроструктури сплаву Ti-TiB, отриманого в умовах електронно-променевого переплаву. Современная электрометаллургия №3. 2019. - 55-61с.
3. Лобода П.І. Спрямовано закристалізовані бориди. - К.: Праймдрук, 2012. - 395с.
4. Witusiewicz V.T. The Al-B-Nb-Ti system. I. Re-assessment of the constituent binary

systems B-Nb and B-Ti on the basis of new experimental data / V.T. Witusiewicz, A.A. Bondar, U. Hecht, S. Rex, T.Ya. Velikanova // *J. Alloys Comp.* - 2008. - Vol. 448. - P. 185-194.

5. Microstructure and mechanical properties of Ti-TiB based short-fiber composite materials manufactured by casting and subjected to deformation processing/ R. A. Gaisin, V. M. Imayev, R. M. Imayev, and E. R. Gaisina – 2015.

6. Біба Є.Г. - Формування структури та механічних властивостей конструкційних титанових сплавів під час активного спікання порошків гідриду титану: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. наук з держ. упр. / Є.Г. Біба - К. : НАДУ, 2016. - 25 с.

7. Колесников А.Р. - Структура и свойства композита Ti-TiB: Выпускная квалификационная работа/ А.Р. Колесников - Белгород.: НИУ «БелГУ», 2018. - 56с.

8. Loboda P.I., Soloviova T.O., Bogomol Yu.I., Remizov D.O., Bilyi O.I. Effect of the Crystallization Kinetic Parameters on the Structure and Properties of a Eutectic Alloy of the LaB6–TiB2 System. *Journal of Superhard Materials.* 2015, № 37. P. 394–401.

9. InSu Kim, MinYoung Song, JaeHwang Kim. - Effects of TieB and Si additions on microstructure and mechanical properties of AlCuMg based aluminum matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds.* 2020.

10. Yuankui Cao , Yong Liu , Yunping Li , Bin Liu , Rongjun Xu. - Hot deformation behavior of nano-sized TiB reinforced Ti-6Al-4V metal matrix composites, *Mechanics of Materials.* 2019.

11. Tingbo Zhang , Naiqin Zhaoa, Chunsheng Shi, Chunnian Hea, Enzuo Liu., - Regulation of the interface binding and mechanical properties of TiB/Ti via doping-induced chemical and structural effects. - *Computational Materials Science,* 2019.

12. Liang Wang., Effect of melt hydrogenation on microstructure evolution and tensile properties of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composites./ Liang Wang, Luobin Zhang, LiangShun Luo, Binbin Wang, Hui Yan, RuiRun Chen, YanQing Su, JingJie Guo, HengZhi Fu/ - *The Journal of Materials Research and Technology (JMRT)* – 2020.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2020

Ремізов Дмитро Олексійович – аспірант, кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії. НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», просп. Перемоги, 37, м.Київ, Україна, 03056, тел.: +38 067 909 59 47, E-mail: remizz@ua.fm

Богомол Юрій Іванович – доцент, к.т.н., кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії. НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», просп. Перемоги, 37, м.Київ, Україна, 03056, тел.: +38 067 220 94 09, E-mail: ubohomol@iff.kpi.ua

Лобода Петро Іванович - Д-р тех. н., проф., чл.-кор. НАНУ, декан ІФФ, кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії. НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», просп. Перемоги, 37, м.Київ, Україна, 03056, тел.: +38 068 808 00 00, E-mail: decan@iff.kpi.ua

D. O. REMIZOV, YU. I. BOGOMOL, P. I. LOBODA

INFLUENCE OF STRUCTURAL-GEOMETRIC DESCRIPTIONS OF PHASE CONSTITUENTS ON MECHANICAL PROPERTIES CRYSTALLIZED FROM FUSION OF EUTECTICUM COMPOSITION OF TI – TiB

The peculiarities of the formation of the alloy from the melt of the eutectic composition Ti-TiB and the influence of the structural - geometrical characteristics of the phase components on the mechanical properties are investigated. The aim of the study is to investigate the influence of the number and size of titanium boride inclusions on the strength and plasticity of eutectic alloy crystals of the Ti-TiB system because the established patterns will determine the influence of matrix phase nature and fiber size on the strength of composite crystallized eutectic alloys. The test specimens were cut from an ingot with a diameter of 100 mm and a height of 150 mm crystallized under conditions of electron beam remelting. The number of inclusions in the central part and on the periphery of the ingot differed 4-10 times. Accordingly, the size of the inclusions, and above all, their diameter changed as many times under conditions of approximately the same length.

Higher values of strength and yield strength are observed in alloys with more inclusions of titanium boride. In contrast to ceramic composites [8] in which doubling the number of fibers leads to a 4-fold increase in strength and 30% hardness in composites with a titanium metal matrix, an increase in strength is observed by 10-20% with an increase in the number of inclusions in 4-10 times. It is established that with increasing deformation rate with the same structural and geometrical characteristics of the composite, the strength increases.

Charts have three characteristic sections. The first is the deformation of the matrix metal phase. On the second, the inclination to the axis of deformation increases, which indicates the elastic deformation of titanium boride inclusions. In the third section there is an increase in the amount of deformation at constant stress.

The fracture surfaces (Fig. 6,7,8) indicate that with increasing deformation rate decreases the surface area occupied by areas that are plastically deformed. At minimum strain rates, titanium boride inclusions are separated into layers. In other words, the crack propagates along titanium boride inclusions.

Key words: mechanical properties, Ti-TiB alloy, stress, deformation, phase components, boride, titanium.

References

1. Loboda P.I. Fyzyko-khimichni osnovy stvorennia novykh borydnykh materialiv dlia elektronnoi tekhniki i rozrobka keramichnykh katodnykh vuzliv z pidvyshchenoiu efektyvnistiu. Dys. d.t.n.: 05.16.06. K., 2004. 512 s.
2. Loboda P.I., Remizov D.O., Hryhorenko S.H., Berezos V.O., Severin A.Iu. Odnoridnist mikrostruktury splavu Ti-TiB, otrymanoho v umovakh elektronno-promenevoho pereplavu. *Sovremennaia elektrometallurhiya* №3. 2019. - 55-61s.
3. Loboda P.I. Spriamovano zakrystalizovani borydy. - K. : Praimdruk, 2012. - 395s.
4. Witusiewicz V.T. The Al-B-Nb-Ti system. I. Re-assessment of the constituent binary systems B-Nb and B-Ti on the basis of new experimental data / V.T. Witusiewicz, A.A. Bondar, U. Hecht, S. Rex, T.Ya. Velikanova // *J. Alloys Comp.* - 2008. - Vol. 448. - P. 185-194.
5. Microstructure and mechanical properties of Ti-TiB based short-fiber composite materials manufactured by casting and subjected to deformation processing/ R. A. Gaisin, V. M. Imayev, R. M. Imayev, and E. R. Gaisina – 2015.
6. Biba Ye.H. - Formuvannia struktury ta mekhanichnykh vlastyvoستي konstruktsiinykh tytanovykh splaviv pid chas aktyvnoho spikannia poroshkiv hidrydu tytanu: avto-ref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia dokt. nauk z derzh. upr. / Ye.H. Biba - K. : NADU, 2016. - 25 s.
7. Kolesnykov A.R. - Struktura y svoistva kompozyta Ti-TiB: Vyrusknaiia kvalyfykatsyonnaia rabota/ A.R. Kolesnykov - Belhorod.: NYU «BelHU», 2018. - 56s.

8. Loboda P.I., Soloviova T.O., Bogomol Yu.I., Remizov D.O., Bilyi O.I. Effect of the Crystallization Kinetic Parameters on the Structure and Properties of a Eutectic Alloy of the LaB₆-TiB₂ System. *Journal of Superhard Materials*. 2015, № 37. P. 394–401.

9. InSu Kim, MinYoung Song, JaeHwang Kim. - Effects of TieB and Si additions on microstructure and mechanical properties of AlCuMg based aluminum matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds* . 2020.

10. Yuankui Cao , Yong Liu , Yunping Li , Bin Liu , Rongjun Xu. - Hot deformation behavior of nano-sized TiB reinforced Ti-6Al-4V metal matrix composites, *Mechanics of Materials*. 2019.

11. Tingbo Zhang , Naiqin Zhaoa, Chunsheng Shi, Chunnian Hea, Enzuo Liu., - Regulation of the interface binding and mechanical properties of TiB/Ti via doping-induced chemical and structural effects. - *Computational Materials Science*, 2019.

12. Liang Wang., Effect of melt hydrogenation on microstructure evolution and tensile properties of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composites./ Liang Wang, Luobin Zhang, LiangShun Luo, Binbin Wang, Hui Yan, RuiRun Chen, YanQing Su, JingJie Guo, HengZhi Fu/ - *The Journal of Materials Research and Technology (JMRT)* – 2020.