УДК 669.275.017

Вініченко В. С. — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail:valeryi_v@ukr.net*, ORCID: 0009-0001-7631-9822

Плескач В. М. — канд. техн. наук, доцент кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: vmpayzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-6182-4332

Єршов А. В. — д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: eav.nuzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-9485-4896

Волков Г. П. — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Деталі машин і ПТМ» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: gpvolkov@ukr.net*, ORCID: 0009-0006-9810-5805

Іванченко Є. Ю. — аспірант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: metodist26.08@meta.ua*, ORCID: 0009-0008-2290-4023

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ НА ЇХ МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Мета роботи. *Полягає у встановленні впливу неперервних волокон і достатньо пластичної матриці з жароміцного сплаву у структурі композиту, призначеного для роботи при підвищених температурах, та надання рекомендацій щодо оптимального виду структури для досягнення оптимальної міцності даного композиту при температурах 20…1300 °С.*

Методи дослідження. *Проведений теоретичний аналіз можливого руйнування виробів при використанні неперервних волокон, а також аналіз зразків композиту на основі є жароміцної матриці, армованої дротом з вольфраморенієвого сплаву. Дослідження проводилося із застосуванням металографічного методу. Міцність композиту визначали проведенням випробувань на розтяг із застосуванням установки ІМАШ-20-75.*

Отримані результати. *Встановлені закономірності впливу структури на міцність волокнистих композитів, на основі яких можливо досконаліше проаналізувати процеси, які відбуваються як при руйнуванні композиту, так і при його формуванні і, при необхідності, скорегувати їх, таким чином, щоб забезпечити максимально можливу міцність матеріалу в цілому.*

Наукова новизна. *Встановлено закономірність впливу загальної структури композиту і шару матриці, що оточує волокна, на міцність композиту жароміцний сплав – вольфраморенієві волокна, яка дозволяє кількісно аналізувати вплив структурних і технологічних факторів процесу формування на міцність вказаного матеріалу.*

Практична цінність. *Робота може бути корисною конструкторам при виборі складу композиту, орієнтуючись на очікуваний механізм руйнування, а також технологам для продуктивнішого використання виробничого обладнання та зменшення витрат матеріалів на виробництво продукції.*

Ключові слова: *композит, матриця, жароміцний сплав, вольфраморенієвий сплав, неперервні волокна, формування композитного матеріалу, структура, міцність, випробування на розтяг.*

Вступ

Створення високотемпературних матеріалів багато в чому визначає можливості підвищення коефіцієнта корисної дії теплових двигунів. На сьогодні економічність цих двигунів в основному залежить від максимальної робочої температури конструкційних матеріалів. У зв'язку з цим створення матеріалів, здатних працювати при підвищенні робочих температурах, є одним з перспективних напрямків матеріалознавства [1, 2]. Свідченням вказаного можуть бути дослідження, що проводяться для створення матеріалів, здатних витримувати температури експлуатації порядку 1800 °С. Для вирішення даної проблеми досліджують можливість застосування сплавів на основі рідкісних металів, зокрема, іридію і родію [3, 4]. На теперішній час, використання подібних сплавів може задовольнити технічні запити конструкторів теплових двигунів, проте ціна такого рішення може бути не завжди виправдана.

Підвищення робочих температур традиційних жароміцних сплавів, часто, вимагає збільшення вмісту в їх складі тугоплавких легувальних елементів, що призводить до погіршення інших важливих характеристик (жаростійкості, пластичності). На сьогодні вже очевидно, що можливості підвищення експлуатаційних характеристик жароміцних нікелевих сплавів шляхом комплексного легування та оптимізації технології термічного оброблення вичерпані у минулому столітті.

© Вініченко В. С., Плескач В. М., Єршов А. В., Волков Г. П., Іванченко Е. Ю., 2024
DOI 10.15588/1607-6885-2024-1-3

Уникнути зазначених недоліків, і у той же час, підвищити робочу температуру матеріалів такого призначення стає можливим при зміцненні їх у найнавантаженіших напрямках неперервними волокнами зі сплавів тугоплавких металів, зокрема, сплавів на основі вольфраму. Так, наприклад, у стінках деталей типу оболонок, навантажених внутрішнім тиском, у поздовжньому перерізі виникають напруження розтягу, які вдвічі перевищують напруження розтягу, що виникають у поперечному кільцевому перерізі оболонки [5, 6]. Такі деталі доцільно виготовляти з анізотропних матеріалів, до яких, зокрема, належать волокнисті композиційні матеріали. На сьогодні від них вимагається здатність витримувати термічні та радіаційні навантаження [7, 8]. При чому вказані вимоги, зокрема, до матеріалів ядерних та термоядерних реакторів безперервно підвищуються [9].

Це обумовлює актуальність даної роботи, яка присвячена дослідженню залежності між структурою і властивостями композиту з матрицею із жароміцного сплаву армовоного волокнами з вольфраморенієвого сплаву.

Аналіз досліджень та публікацій. Теоретичний аналіз руйнування і забезпечення міцності волокнистих композитів

Волокнисті композиційні матеріали досить часто використовуються завдяки своїм високим механічним властивостям. Як правило, при цьому використовуються достатньо пластичні полімерні матриці, а як наповнювачі - міцні, але крихкі волокна (наприклад, скляні, вуглецеві, металеві). При навантаженні розтягу першою пластично деформується матриця, і навантаження поступово сприймається наповнювачем - волокнами. Волокна, розтягуючись, зменшуються у поперечнику і починають розтягувати матрицю у поперечному напрямку. Цим самим пластична матриця здійснює додатковий внесок в опір розтягу [10]. Проте вже при достатньо низькому рівні розтягувальних напружень зв'язок між матрицею і наповнювачем починає руйнуватися, але монолітність композиту внаслідок цього в цілому ще не порушується. На цьому етапі у забезпеченні достатньої міцності композиту ще беруть участь волокна.

Роль матриці в армованому КМ зводиться до ролі «диспетчера», який розподіляє навантаження між волокнами. Поступово навантаження переходить на волокна. Чим більше вміст наповнювача у КМ, тим вище його міцність, але тим слабше виявляються його пластичні властивості.

При руйнуванні волокон або ушкодженні межі розділу між ним і матрицею відбувається перерозподіл напружень таким чином, що ушкодження локалізуються у відносно малому об'ємі пластичної матриці. Завдяки цьому поки що ефективна міцність КМ практично не знижується.

Зі збільшенням навантажень у композиті відбувається накопичення розсіяних мікропошкоджень. У певний момент вони можуть призвести до руйнування деяких волокон, які мають більшу кількість дефектів. У матриці на окремих ділянках поступово накопичується критична щільність мікротріщин, яка може призвести до утворення або певної кількості множинних мікротріщин одночасно, або стійкої макротріщини при збереженні цілісності композиту. Фінальне руйнування відбувається в момент, коли розміри однієї або декількох макротріщин досягнуть певної критичної величини [11–16].

Композит, що складається з пластичної матриці та міцних, але крихких односпрямованих неперервних волокон, має чітко виражену анізотропію властивостей, а його міцність визначається не лише міцністю самих волокон, а також їх діаметром і об'ємним вмістом волокон у композиті. Збільшення діаметра волокон у складі КМ призводить до зниження їх міцності, але різною мірою, залежно від природи волокон. Вважається, що при збільшенні діаметра волокон їх міцність різко падає, а при діаметрі d понад 15 мкм асимптотично наближується до певної мінімальної величини (рис. 1).

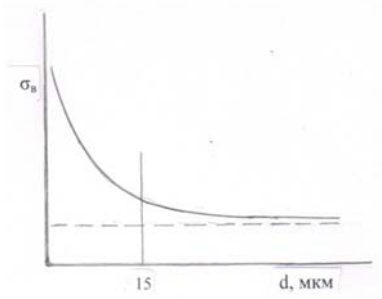

Рисунок 1. Залежність міцності волокон від діаметра

Міцність волокон у композиті залежить від співвідношення їх довжини l та діаметра d. Чим більше співвідношення l/d, мкм, тим міцніший матеріал. При аналізі його впливу на міцність композиту використовується поняття *критичної довжини* волокон $l_{кр}$ [4, 7, 9, 10]:

$$l_{кр} = \sigma_в \, d/2\tau_{зч}, \quad (1)$$

де $\sigma_в$ – границя міцності волокна, МПа; $\tau_{зч}$ – границя міцності зсуву на межі матриця-волокно, МПа.

Поняття критичної довжини волокон стосується й неперервних волокон, оскільки їх кінцеві частини довжиною $l_{кр}/2$ працюють неефективно Особливо цей ефект проявляється тоді, коли волокна починають руйнуватися, і кількість неефективних ділянок збільшується.

Отже, ефективність армування композиційних матеріалів неперервними волокнами проявляється при мінімальному діаметрі (10…15 мкм і менше), якнайбільшій їх довжині, відсутності поверхневих дефектів, а також при обґрунтованій об'ємній концентрації волокон.

© Вініченко В. С., Плескач В. М., Єршов А. В., Волков Г. П., Іванченко Є. Ю., 2024
DOI 10.15588/1607-6885-2024-1-3

Мета роботи

Метою даної роботи було описати теоретично і експериментально закономірності впливу волокон і матриці, що безпосередньо контактує з армувальними волокнами, на міцність композиційного матеріалу системи жароміцний сплав – вольфраморенієві волокна.

Матеріал і методика досліджень

В даній роботі об'єктом дослідження слугували зразки композиту. Для формування композиту використовували сплави промислового виробництва. Як матрицю використовували жароміцний сплав ХН65ВБ у вигляді фольги товщиною 0,4 мм. Його хімічний склад наведено в таблиці 1.

Дроти з вольфрамових сплавів, що випускаються промисловістю, з вмістом ренію, близьким до його граничної розчинності у вольфрамі (27 % мас.), як правило, не схильні до розшаровування і не знижують міцність композиту в напрямках, що не співпадають з напрямком армування. Тому як матеріал волокон було застосовано дріт діаметром 0,3 мм із сплаву ВР27ЗВП, хімічний склад якого наведено в таблиці 2.

Формування композитів здійснювали з використанням контактного зварювання [17].

Випробування на розтяг здійснювали у вакуумі з застосуванням установки ІМАШ-20-75. При цьому в кожному експерименті проводили по 7 паралельних дослідів з метою оцінювання випадкової похибки. У всіх експериментах вона становила для границі міцності $\Delta\sigma_в$=±1,5 МПа і для відносного подовження δ_5=±0,6% при довірчій ймовірності P = 0,95.

Дослідження мікроструктури зразків проводили за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-8.

Травлення шліфів композиційних матеріалів здійснювали поетапно. Для травлення шару матриці застосовували реактив, що містить 10 г $CuSO_4$, 50 мл HCl (конц.) та 50 мл спирту. Структуру вольфрамових волокон виявляли травленням у водному розчині, що містить 10 г KOH, 10 г $K_3[Fe(CN)_6]$ та 80 г H_2O.

Експерименти

З метою порівняння міцності з'єднання матриці з волокнами з міцністю самої матриці проводили випробування зразків даного композиту, які були армовані волокнами розташованими перпендикулярно до їх осі на розтяг. Така схема армування була застосована тому, що вона дозволяє порівнювати міцність матриці і міцність з'єднання волокон з матрицею. При цьому якщо руйнування зразка відбувалося шляхом відшаровування матриці від волокна – вважали, що міцність з'єднання цих компонентів нижча ніж міцність матричного сплаву. А якщо руйнування відбувалось безпосередньо по матриці, то вважали, що міцність з'єднання волокон з матрицею вища ніж міцність матричного сплаву. Це цілком можливо у випадку, якщо в процесі формування відбувається деяке розчинення волокон в матриці і внаслідок чого шар матриці, що контактує з волокнами, зміцнюється за механізмом твердорозчинного зміцнення.

Певну структуру і висоту шару матриці, що безпосередньо контактує з волокнами, в кожному досліді отримували шляхом регулювання амплітуди імпульсу зварювання. Для встановлення максимально можливої амплітуди зварювального імпульсу (при формуванні зразка композиту шостого досліду) спочатку підвищували його амплітуду до з'явлення виплесків на поверхні формуємого композиту, а потім дану амплітуду зменшували до моменту, коли виплески гарантовано не виникали. При формуванні зразків композиту починаючи з п'ятого досліду і до першого поступово зменшували амплітуду зварювального імпульсу. Таким чином отримали зразки композитів для кожного досліду характерний вид мікроструктури яких представлено на рисунку 2.

Результати випробування даних зразків композиту на розтяг наведено в таблиці 3. Для порівняння міцності композиту і матриці в таблиці 4 наведено міцність листів товщиною 0,4 мм сплаву марки ХН65ВБ, який використовували як матрицю.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплаву, що використовувався як матриця композиту

Марка сплава	Масова частка елементів, %								
	C	Si	Cr	Ni	Mn	W	Fe	La	Na
ХН65ВБ	0,05	0,21	24,7	осн.	0,56	3,3	0,34	0,1	0,02

Таблиця 2 – Хімічний склад сплаву, що використовувався як волокна композиту

Марка сплаву	Масова частка елементів, %						
	W	Re	O_2	N_2	C	H_2	Fe,Al,Mg,Ca,Cu,Zn,P,S,As в сумі
ВР27ЗВП	72,71	27,24	0,002	0,001	0,003	0,0001	не більше 0,022

© Вініченко В. С., Плескач В. М., Єршов А. В., Волков Г. П., Іванченко Є. Ю., 2024
DOI 10.15588/1607-6885-2024-1-3

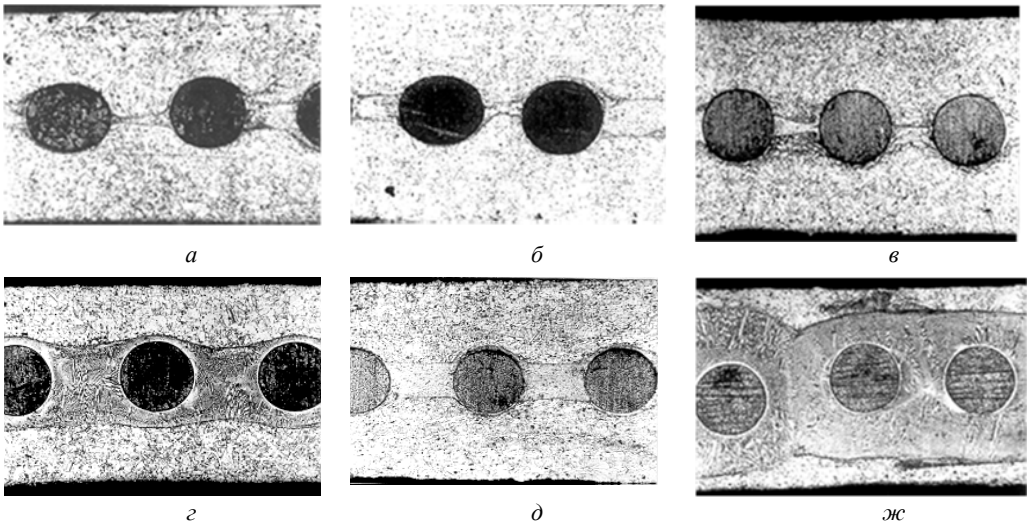

Рисунок 2. Мікроструктура зразків композиту в першому (*а*), другому (*б*), третьому (*в*), четвертому (*г*), п'ятому (*д*), шостому (*ж*) дослідах, ×100

Таблиця 3 – Залежність міцності композиту від виду характерної структури шару матриці, що безпосередньо контактує з армувальними волокнами

№ досліду	Температура випробування 20 °С		Температура випробування 1300 °С	
	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %
1	360	1,0	11,2	1,1
2	388	1,2	15,2	1,1
3	394	1,3	17,4	1,4
4	402	1,6	23,1	2,1
5	450	2,8	35,6	6,5
6	406	2,2	31,5	4,6

Слід також зазначити, що руйнування зразків дослідів з першого по четвертий відбувалося по границі волокон і матриці, зразків п'ятого і шостого дослідів – по шару матриці, який розплавлявся в процесі формування.

Таблиця 4 – Короткочасна міцність матричного сплаву

Марка сплаву	Температура випробування 20 °С		Температура випробування 1300 °С	
	$\sigma_в$, МПа	δ_{10}, %	$\sigma_в$, МПа	δ_{10}, %
ХН65ВБ	456	3,8	37,6	7,5

Обговорення

Аналіз результатів експериментів, представлених в талицях 3 і 4, свідчить про те, що підвищення амплітуди зварювального імпульсу від мінімального значення до значення, що відповідає умовам проведення процесу формування зразка композиту п'ятого досліду, приводить до поступового підвищення короткочасної міцності і подовження даного матеріалу як при звичайних температурах (20° С), так і при підвищених (1300° С). При подальшому підвищенні амплітуди зварювального імпульсу спостерігається деяке зниження значень міцності і подовження.

На наш погляд, це можна пояснити тим, що при поступовому підвищенні амплітуди зварювального імпульсу від мінімального в першому досліді до значення, що відповідає умовам п'ятого досліду, відбувається поступове збільшення висоти шару навколо волокон, що розплавляється в процесі формування, а це сприяє покращенню змивання окислів, які неодмінно присутні на поверхнях компонентів даного матеріалу. Змивання окисної плівки приводить до безпосереднього контакту атомів волокон і матриці, що в свою чергу, викликає деяке розчинення компонетів і відповідно, підвищення міцності їх з'єднання.

Зниження механічних властивостей композиту, що відповідає умовам формування шостого досліду, за нашою гіпотезою, обумовлено тим, що в його матриці міститься значна частка (біля 80 %) складової, яка має литу структуру, а вона характеризується нижчими властивостями порівняно з матеріалом з пластично деформованою структурою.

Слід також відмітити, що зразки композиту, що мають максимальні значення механічних властивостей (п'ятий дослід), дещо поступаються матеріалу матриці, що на наш погляд цілком закономірно, оскільки структура матричного сплаву на відміну від структури композиту зовсім не містить литої структури.

Таким чином, можна вважати встановленим, що оптимальною структурою композиту даної системи є структура, яка складається з волокон, шару матриці, що розплавлялась при формуванні і повністю оточує волокна, та решту матриці, яка має первісну структуру матричного сплаву.

Висновки

1. На підставі аналізу механізму руйнування волокнистих композиційних матеріалів описані умови оптимального компанування композиту з метою забезпечення максимальної міцності.

© Вініченко В. С., Плескач В. М., Єршов А. В., Волков Г. П., Іванченко Є. Ю., 2024
DOI 10.15588/1607-6885-2024-1-3

2. Описано закономірності впливу структури шару матриці, що безпосередньо контактує з армувальними волокнами, на міцність композиційного матеріалу з матрицею зі сплаву марки ХН65ВБ і армувальними волокнами зі сплаву марки ВР273ВП.

3. Встановлено, що для забезпечення максимально можливої міцності даного композиту його структура повинна містити шар матриці, який при формуванні має розплавлятися і повністю оточувати волокна, у той же час решта матриці повинна зберігати первісну структуру матричного сплаву.

Список літератури

1. Hightemperature composites based on the Nb-Si system reinforced with niobium silicides / Kablov E. N., Svetlov I.L., Neiman A.V. et al. // Inorganic Materials: Applied Research. – 2017. – Vol. 8. – No. 4. – P. 609–617.

2. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Kablov E. N., Svetlov I. L., Neiman A. V.// Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

3. Ir-base refractory superalloys for ultra-high temperatures / Yamabe-Mitarai, Ro Y., Maruko T., Harada H. // Met. and Mater. Trans. A. – 1998. – Vol. 29, № 2. – P. 537–549.

4. Handley J.R. Properties of binary rhodium alloys. // Platinum Metals Reu. – 1989. – Vol. 33. – №2. – P. 64–72.

5. Писаренко Г. С. Опір матеріалів: підручник / Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. ; за ред. Г. С. Писаренка. – К. : Вища шк., 2004. – 655 с.

6. Корнілов О. Опір матеріалів / Корнілов О. : підручник. – К. : Логос, 2002. – 562 с.

7. A. Kelly. Concise Encyclopedia of Composite Materials / A. Kelly. – NY, Pergamon Press, 2005, – 286 p.

8. Котречко С. А. Предельная прочность / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // Кристаллы, металлы, конструкции. – К. : Наукова думка, 2008. – 342 с.

9. Воєводін В. М. Еволюція структурно-фазового стану та радіаційна стійкість конструкційних матеріалів / В. М. Воєводін, І. М. Неклюдов. – К. : Наукова думка, 2006. – 376 с.

10. Franklin V. A. Chistopher. Interlaminar fracture toughness estimation of aerospace composites by weighted residual approudch / Franklin V. A. // Проблемы прочности. – 2015, № 6 (438). – С. 14–22.

11. Андреева А. В. Основы физико-химии и технологии композитов: учеб. пособие для вузов / Андреева А. В. – М. : ИПРЖР, 2001. – 192 с.

12. Копань В. С. Композиційні матеріали / Копань В. С. – К. : унів. вид.«Пульсари», 2004. – 198 с.

13. Композиционные материалы: справочник / В. В. Васильев и др.; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М.Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. 512 с.

14. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів / Суберляк О. В., Баштанник П. І. – Львів : вид. НУ «Львівська політехніка», 2006. – 270 с.

15. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці : підручник / Є. О. Джур, Кучма Л. Д., Манько Т. А. та ін. – К. : Вища освіта, 2003. – 399 с.

16. Дзюба В. С. Методика прогнозирования прочности композиционных материалов с учётом повреждаемости / Дзюба В. С., Кубак Д. О. // Проблемы прочности. – 2015. – № 2 (434). – С. 174–180.

17. А.с. 1519023 СССР, МКИЗ В 23к 11/00. Способ изготовления многослойных обечаек из композиционного материал / Коваль А. Д., Лавренко А. С. Натапов Б. С. и др. ; опубл. 28.08.89 ; Бюл. № 40. –3 с.

Одержано 23.02.2024

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF FIBER COMPOSITES ON THEIR PERFORMANCE PROPERTIES

Vinichenko V. — Candidate of technical sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Physical Materials Science, National University "Zaporizhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: valeryi_v@ukr.net*, ORCID: 0009-0001-7631-9822

Pleskach V. — Candidate of technical sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies", National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: vmpayzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-6182-4332

Yershov A. — Dr. Tech. of Sciences, professor, professor of the Department of Physics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhia, Ukraine, *e-mail: eav.nuzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-9485-4896

Volkov G. — Candidate of technical sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Machine parts and lifting-transport mechanisms, National University "Zaporizhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: gpvolkov@ukr.net,* ORCID: 0009-0006-9810-5805

Ivanchenko E. — Postgraduate student of the Department of Physical Materials Science of the National University "Zaporizhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: metodist26.08@meta.ua*, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2290-4023

© Вініченко В. С., Плескач В. М., Єршов А. В., Волков Г. П., Іванченко Є. Ю., 2024
DOI 10.15588/1607-6885-2024-1-3

Purpose. *It consists in establishing the influence of continuous fibers and a sufficiently plastic matrix of heat-resistant alloy in the structure of a composite intended for work at elevated temperatures, and providing recommendations on the optimal type of structure to achieve optimal strength of this composite at temperatures of 20...1300 °C.*

Research methods. *Theoretical analysis of the possible destruction of products when using continuous fibers was carried out, as well as an analysis of composite samples based on a heat-resistant matrix reinforced with a wire made of tungsten-rhenium alloy. The research was conducted using the metallographic method. The strength of the composite was determined by carrying out tensile tests using the IMASH-20-75 device.*

Results. *The regularities of the influence of the structure on the strength of fibrous composites have been established, on their basis it is possible more thoroughly analyze the processes that occur both during the destruction of the composite and during its formation and, if necessary, to adjust them in such a way as to ensure the maximum possible strength of the material as a whole.*

Scientific novelty*. The regularity of the effect of the general structure of the composite and the matrix surrounding the fibers on the strength of the heat-resistant alloy – tungsten-rhenium fiber composite is established, which allows quantitative analysis of the influence of structural and technological factors of the forming process on the strength of the specified material.*

Practical value*. The work can be useful to designers when choosing the composition of the composite, focusing on the expected mechanism of destruction, as well as to technologists for more productive use of production equipment and reducing the consumption of materials for the production of products.*

Key words*: composite, matrix, heat-resistant alloy, tungsten-rhenium alloy, fibers, formation of composite material, structure, strength, tensile test.*

References

1. Kablov E. N., Svetlov I.L ., Neiman A. V., Min P.G., Karachevtsev F. N., Karpov M .I. (2017). Hightemperature composites based on the Nb-Si system reinforced with niobium silicides. Inorganic Materials: Applied Research, 8, 4, 609–617. [in English].

2. Solntsev Yu. P., Belikov S. B., Volchok I. P., Sheyko S. P. (2010). Spetsialni konstruktsiyni msterialy. [Special construction materials] Zaporizhzhya, “VALPIS-POLIGRAF”, 536. [in Ukrainian].

3. Yamabe-Mitarai, Ro Y., Maruko T., Harada H. (1998). Ir-base refractory supperalloys for ultra-high temperatures. Met. and Mater, 29, 2, 537–549. [in English].

4. Handley J. R. (1989). Properties of binary rhodium alloys. Platinum Metals Reu, 33, 2, 64–72. [in English].

5. Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umanskiy E. S. (2004). Opir materialiv [Strength of Materials]. Kyiv, Vyshcha shk, 655. [in Ukrainian].

6. Kornilov O. (2002). Opir maierialiv. [Strength of Materials]. Kyiv, Logos, 562. [in Ukrainian].

7. A. Kelly. (2005). Concise Encyclopedia of Composite Materials. NY, Pergamon Press, 286. [in English].

8. Korotechko S. A., Meshkov Yu. Ya. (2008). Predelnaya prochnost. Kristslly, metally, konstruktsii. [Ultimate strength. Crystals, metals, structures]. Kyiv, Naukova dumka, 342. [in Russian].

9. Voyevodin V. M., Nekludov I. V. (2006). Evolutsiya strukturno-fasovogo stanu ta radiatsiyna stiykist konstruktsiynykh materialiv. [Evolution of the structural phase state and radiation resistance of structural materials]. Kyiv, Naukova dumka, 376. [in Ukrainian].

10. Franklin V. A., Chistopher T. (2015). Interlaminar fracture toughness estimation of aerospace composites by weighted residual approudch. Problemy prochnosti, 6 (438), 14-22. [in English].

11. Boguslayev V. O., Kachan O. Ya., Kalinina N. Ye. and others. (2009). Aviatsiyno-kosmichni materialy ta tekhnologii. [Aviation and space materials and technologies] Zaporizhzhya, vyd. VAT “Motor Sich”, 383. [in Ukrainian].

12. Kopan V. S. (2004). Komposytsiini materialy [Composite materials]. Kyiv, univ. vyd. “Pulsary”, 198. [in Ukrainian].

13. Kompositsionnye materialy: spravochnik / V.V. Vasilyev and others (1990). [Composite materials]. Moskva, Mashinostroyeniye, 519. [in Russian].

14. Suberlak O.V., Bashtannik P.I. (2006). Tekhnologia pererobki polimernykh ta komposytsiinykh materialiv [Technology of processing polymer and composite materials]. Lviv, vyd. NU “Lvivska politekhnika”, 270. [in Ukrainian].

15. Polimerni komposytsiini materialy v raketno-kosmichnii tekhnitsi / Ye.O. Dzhur and others (2003). [Polymer composite materials in rocket and space technology] Kyiv, Vyshcha osvita, 399. [in Ukrainian].

16. Dsyuba V. S., Kubak D. O. (2015). Metodika prognosirovaniya prochnosti kompositsionnykh materialov s uchyotom povrezhdayemosti. [Methodology for predicting the strength of composite materials taking into account damageability]. Problemy prochnosti, (434), 174–180. [in Russian].

17. Koval A.D., Lavrenko A.S., Natapov B. et al. Sposob isgotovleniya mnogosloynykh obechayek is kompositsionnogo materiala. [The method of manufacturing multi-layer shells from composite material]. Certificate of authorship. 1519023 USSR, MKIS V 23k 11/00. Published 28.08.89. Bull. 40, 3. [in Russian].

© Вініченко В. С., Плескач В. М., Єршов А. В., Волков Г. П., Іванченко Є. Ю., 2024
DOI 10.15588/1607-6885-2024-1-3