

Вивчення кінетики просочення базальтових, вуглецевих, оксидних волокон розплавами алюмінію та його сплавами

В. П. Красовський*, Н. О. Красовська

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України
03142, Київ, Україна, вул. Кржижановського, 3

*E-mail: vitalkras@ipms.kiev.ua

Вивчено процес просочення базальтових, вуглецевих та оксидних волокон розплавами алюмінію і його сплавом з кремнієм в інтервалі температур 650–700 °С в вакуумі $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Метод самочинного вільного просочення реалізований з використанням металевих порошкових покриттів Ti, Ni та плівок V–Cu, V–Ni. Отримано композиційні матеріали та вивчено їхні фізико-механічні характеристики.

Ключові слова: *самочинне вільне просочення, композиційні матеріали, алюмінієвий розплав, базальтові, вуглецеві та оксидні волокна, змочування, металеві покриття.*

Вступ

Технологічні методи виготовлення композиційних матеріалів (КМ) умовно можна розділити на твердофазні, порошкові та рідкофазні. Твердофазні методи розроблюють для систем з волокнами бора, сталі, вольфраму тощо або для систем, в яких осаджують матричний сплав на волокна. Порошкові методи розвинуті головним чином для КМ з дисперсними наповнювачами — частинками, ниткоподібними кристалами. Здобули також розповсюдження рідкофазні методи, особливо у випадках просочення армуючих елементів розплавами, коли вони є єдиною прийнятною технологією одержання КМ. Наприклад, якщо для армування використовують пучки або стрічки із волокон вуглецю з великою кількістю елементарних волокон, то тільки рідкофазні методи забезпечують задовільне заповнення міжволоконних проміжків і рівномірний розподіл волокон у матриці [1]. Відомо два основних методи рідкофазної технології одержання волоконних КМ:

- 1) заповнення рідким металом ливарної форми, у котрій заздалегідь певним чином розташовано волокна, якими армують;
- 2) просочення металевим розплавом пучків.

Такі методи дозволяють виготовляти композити вуглець—алюміній [2, 3], бор—алюміній [4], алюміній—сталь [5], КМ із вуглецевих волокон з матрицями на основі міді й олова [6], на основі нікелю і вуглецевих волокон [7].

Композиційні матеріали на основі вуглець—алюміній мають унікальне сполучення механічних і фізичних властивостей — високі питому жорсткість і міцність, високий опір циклічним навантаженням і корозії, низькі питому вагу і коефіцієнт термічного розширення (КТР) [8]. Виготовлення таких КМ є складним, тому що вуглецеві волокна мають малий діаметр (6–10 мкм), високі ламкість, реакційну

спроможність і погано змочуються матричними алюмінієвими розплавами. Останні два чинники мають вирішальне значення. Небезпека хімічної взаємодії й утворення карбідів збільшуються з підвищенням тривалості контактування з розплавом і температури процесу [9].

Досліди з просочення волоконних каркасів розплавами алюмінію із застосуванням покриттів і вакууму, як правило, закінчувалися негативними результатами у зв'язку з відсутністю змочування волокна за температур розплаву, які виключають інтенсивне карбідоутворення. Загальними хибами вакуумного просочення вуглецевих волокон сплавами алюмінію є неповне і нерівномірне просочення матричного матеріалу через міжволоконні проміжки, нерівномірна укладка, можливість дотику волокон між собою. Ці недоліки особливо виявляються в ході просочення багатофіламентних пучків і стрічок із вуглецевих волокон. Це призводить до того, що зі збільшенням об'ємної частки вуглецевого волокна вище 30—35% міцність КМ не тільки не зростає, але починає знижуватися в зв'язку зі збільшенням числа не просочених матрицею груп філаментів [10].

Примусове просочення (просочення під тиском) звичайно здійснюється за відсутності змочування в системі матриця—волокно або для прискорення процесу з обмеженим змочуванням. Цим способом виготовляють композити вуглець—алюміній [11], карбід кремнію—алюміній [12], КМ на основі алюмінієвої і магнієвої матриць, армованих волокнами бору, вуглецю, карбіду кремнію [13]. Відзначено, що збільшення тиску приводить до зменшення кути змочування в системах Al—C, Al—SiC і протікання реакцій, які забезпечують формування достатньо тривалого зв'язку на межі розподілу компонентів (за відсутності тиску змочування в системах Al—C і Al—SiC за тих же температур не спостерігається). Для композитів вуглець—алюміній пошуки оптимальної технології продовжуються і в даний час.

Здавалося, що найбільш простим і доступним методом одержання КМ з вуглецевими волокнами, на котрі попередньо наносили металеві покриття (Ni, Cu, Ag), є метод просочення. Але, як правило, властивості одержаних КМ були значно нижче очікуваних, що пояснюється взаємодією покриття з розплавом, утворенням великої кількості інтерметалідних сполук [14, 15]. В той же час за відсутності бар'єрних покриттів на волокнах (що суттєво здешевлює технологію) або якщо використовували дуже тонкі покриття (500—1000 нм) основним процесом взаємодії є хімічні реакції компонентів з утворенням Al_4C_3 [16, 17].

Проведення процесу методом самочинного вільного просочення без прикладання тиску з використанням металевих покриттів, які можуть бути і як бар'єрний захист у випадку композитів вуглець—алюміній [18], і як спосіб покращення змочування [19, 20], дає можливість отримувати КМ різного призначення з високими експлуатаційними характеристиками.

У зв'язку зі зростанням виробництва і здешевленням вуглецевих, базальтових, оксидних волокон знову підвищується інтерес до них, як до армуючих компонентів. З огляду на динаміку світового зростання застосування сплавів Al у промисловості, використання алюмінію та його сплавів для виготовлення композитів, армованих вуглецевими, базальтовими, оксидними волокнами, має велику перспективу.

Мета роботи була спрямована на вивчення процесів просочення алюмінієвими розплавами волоконних і порошкових наповнювачів для розробки технології отримання КМ.

Методика дослідження та матеріали

Дослідження змочування здійснювали методом лежачої краплі з застосуванням способу капілярної очистки розплаву краплі під час експерименту в вакуумі $2 \cdot 10^{-3}$ Па в інтервалі температур 600—700 °С. Використання крапельниці дозволяє проводити окремий нагрів розплаву та підкладки, робити капілярне та термовакuumне очищення розплаву, а також термовакuumну очистку поверхні плівок [21, 22]. Крім того, це є модельною схемою процесу просочення неметалевих каркасів матричними розплавами для виготовлення композиційних матеріалів методом самочинного вільного просочення.

Для вивчення змочування як рідку фазу використовували чисті метали: алюміній марки А-995, монокристалічний кремній (чистотою $\geq 99,995\%$), а також як тверду фазу — підкладки з гарячеполірованого базальтового матеріалу Підгорнянського родовища. Для плівок були вибрані електролітичні ванадій та нікель, а також мідь марки ВЗ (чистотою 99,995%). Металеві плівки нікелю, міді та ванадію наносили на підкладки методом електронно-променевого випарювання металів в вакуумі, подвійні металеві плівки V—Cu, V—Ni напиляли одночасно без розгерметизації вакуумної камери. Товщину плівок виміряли на профілографі типу “Калібр” по методиці [23].

Для виготовлення композиційних матеріалів методом самочинного вільного просочення без прикладання тиску розплавами алюмінію на поверхню джгутів базальтових, вуглецевих і оксидних волокон напиляли подвійні металеві плівки V—Cu, V—Ni. Товщина плівок для ванадію дорівнює 40 нм, для Cu, Ni — біля 1000 нм. Також наносився шар титанового або нікелевого порошку. Розмір порошків був менше 40 мкм. Товщина шару — 100 ± 20 мкм. Процес просочення проводили в вакуумі $2 \cdot 10^{-3}$ Па по методиці [24], яка полягає в безперервному фіксуванні руху в вертикально розташованому капілярно-пористому зразку стовбуру розплаву під час контакту зразка з металевою рідиною. Зразки для досліджень являли собою графітовий брусок з відкритим каналом 5 x 5 та заввишки 60 мм, в якому розміщувався пучок волокон, утворюючи пористий каркас. Відкритий бік каналу зачиняли пластинкою з полірованого кварцового скла, через яку спостерігали фронт просочення. Відчиненим торцем зразок занурювали в розплав.

Результати дослідження та їх обговорення

Вивчення змочування базальтових матеріалів Al та Al—Si

Результати досліджень змочування подвійних металевих плівок, що напилені на поверхню базальтового матеріалу, розплавами алюмінію надані в табл. 1. З ростом температури експерименту змочування покращується, тобто крайовий кут лінійно зменшується. Товщина плівки для всіх адгезійно-активних металів, що мають високу спорідненість до кисню, є близькою і для ванадію дорівнює 40 нм, для металів, що мають низьку спорідненість до кисню, — Cu, Ni, дорівнює біля 1000 нм.

Т а б л и ц я 1. Змочування плівок V—Cu та V—Ni, що напилені на базальт, алюмінієм та силуміном за різних температур

Розплав, % (ат.)	Покриття	Крайовий кут змочування, град		
		600 °C	650 °C	700 °C
Al—12Si	V—Cu	69	48	28
	V—Ni	61	35	23
Al	V—Cu	61	41	22
	V—Ni	56	32	18

Плівки ванадію мають меншу хімічну спорідненість до кисню, ніж плівки титану, тому вони повинні менше залежати від взаємодії з поверхнею базальту і краще впливати на змочування базальту. Для покращення змочування можливо використання подвійних плівок, де як другий шар вибрано мідь та нікель, що добре змочуються алюмінієм.

Велика ефективність нікелевого покриття для зростання змочування пояснюється не тільки тим, що метал добре змочує метал, а також особливими властивостями системи нікель—алюміній — термодинамічно міцним з'єднанням, котре утворюється в цій системі, — алюмінідом нікелю NiAl та екзотермічною реакцією утворення цього інтерметаліду [25]. Інтенсивність хімічної реакції міжфазної взаємодії рідкого алюмінію з нікелем обумовлює, мабуть, руйнування оксидної плівки на алюмінії та зменшує крайовий кут.

Вивчення кінетики просочення базальтових, вуглецевих, оксидних волокон розплавами алюмінію та його сплавами

Для відпрацювання технологічного режиму процесу самочинного вільного просочення без прикладання тиску розплавом алюмінію та його сплавами джгутів базальтових, вуглецевих та скловолокон та одержання композиційних матеріалів з базальтових, вуглецевих, оксидних волокон визначено швидкість просочення.

Проведено експерименти по просоченню розплавами Al та його сплавами з кремнієм джгутів базальтових волокон. Використовували базальтові волокна діаметром 9 та 400 мкм без покриття; з покриттям з плівок V—Ni, V—Cu та з порошковим покриттям Ti, Ni.

Процес просочення проводили в вертикальному положенні, а також коли базальтові волокна знаходяться в горизонтальному положенні з фіксацією швидкості розтікання.

Результати досліджень процесу просочення розплавами чистого алюмінію та Al—12,0% (ат.) Si джгутів базальтових волокон з покриттями наведені в табл. 2. Вихідні базальтові волокна діаметром 9 та 400 мкм без покриття не просочуються розплавами алюмінію та силуміну. Волокна з нанесеними плівками V—Ni, V—Cu та з порошковим покриттям з титану і нікелю просочуються цими розплавами самочинно без прикладання тиску.

Співставлення результатів по вивченню процесу просочення розплавами алюмінію базальтових волокон з нанесеними плівками металів з результатами по змочуванню рідким алюмінієм підкладок базальту з нанесеними подібними плівками показало, що подвійні плівки V—Ni краще змочуються, однак гірше просочуються, ніж плівки V—Cu. Це

Т а б л и ц я 2. Просочення джгутів базальтових волокон розплавами алюмінію та силуміну

Розплав, % (ат.)	Діаметр базальтового волокна, мкм	Покриття	Температура просочення, °С	Швидкість просочення, мм/с
Al	9	Без покриття	700—750	Просочення немає
		Порошок Ni	700	2,5
		Порошок Ti	700	1,9
	400	Без покриття	700—750	Просочення немає
		V—Ni	700	1,8
		V—Cu	700	2,0
Al—12Si	9	Без покриття	600—750	Просочення немає
	400	Без покриття	600—750	Просочення немає
		V—Ni	650—700	0,9
		V—Cu	650—700	1,1

зумовлено утворенням в системі алюміній—нікель інтерметалідів, які звужують міжволоконний простір.

Для одержання методом самочинного вільного просочення без прикладання тиску КМ алюміній—базальтове волокно перспективно використовувати базальтове волокно з покриттями титану або подвійних плівок. Просочення потрібно вести за температур 650—700 °С та з часом витримки 10—15 хв методом капілярного очищення.

Для досліджень вибрано вуглецеві волокна без покриття та з покриттями V—Ni, V—Cu.

Як просочуючі сплави використовували чистий алюміній та силумін евтектичного складу Al—12% (ат.) Si. Процес просочення проводили в вакуумі, фіксуючи рух в вертикально розташованому капілярно-пористому зразку стовбуру розплаву в ході контакту зразка з металевою рідиною. Результати дослідження процесу просочення алюмінієвим розплавом джгутів вуглецевих волокон з покриттями наведені в табл. 3. Змочування виконано раніше [18].

Вихідне вуглецеве волокно без покриття не просочується алюмінієвим розплавом до температури 1100 °С. В процесі самочинного просочення заповнення міжволоконних проміжків проходить тільки завдяки капілярному тиску. Необхідною умовою у цьому випадку є змочування рідкою фазою поверхні просочуемого матеріалу.

Одним з шляхів покращення змочування є нанесення на вуглецеві волокна плівок, що мають високу адгезію як до волокон, так і до матриці. Як слідує з табл. 2, формування на поверхні волокна покриттів приводить до зниження температури протікання процесу просочення. Таке зниження температури особливо помітне для подвійних плівок V—Ni та V—Cu.

Т а б л и ц я 3. Просочення алюмінієвим та силуміновим розплавами джгутів вуглецевих волокон

Сплав, % (ат.)	Вуглецеве волокно з покриттям	Температура просочення, °С	Швидкість просочення, мм/с
Al	Без покриття	1100	Просочення немає
	V—Ni	700—750	2,0
	V—Cu	700—750	2,2
Al—12Si	Без покриття	1100	Просочення немає
	V—Ni	700—750	1,1
	V—Cu	700—750	1,6

Швидкість просочення досить велика та залежить від товщини ванадій-нікелевого та ванадій-мідного покриттів (підвищується з її зростанням). Якщо товщина плівок менше 200 нм, то самочинного просочення немає. Використання порівняно товстих (500 нм) нікелевих плівок також небажано, тому що веде до насичення матричного сплаву нікелем з утворенням під час екзотермічної реакції алюмінідів нікелю та охрупчення як матриці, так і волокон.

Виготовлення композиційних матеріалів з алюмінієвих сплавів, армованих базальтовими волокнами, методом самочинного вільного просочення без прикладання тиску

Технологія самочинного просочення передбачає створення міцного міжфазного контакту завдяки нанесенню нікелевого, ванадій-нікелевого або титан-нікелевого покриття на базальтове волокно діаметром 400 мкм з наступним просоченням в розплав чистого алюмінію або Al—Si.

Проведені дослідження самочинного вільного просочення без прикладання тиску в вакуумі алюмінієм та його сплавами базальтових волокон дозволили остаточно встановити температурно-часовий режим цього технологічного процесу покриття — V—Ni, Ni або Ti—Ni; товщина покриття Ni — 500 нм, Ti—Ni та V—Ni (сумарна товщина) — 500 нм; розплав — Al або Al—12% (ат.) Si; температура — 650—700 °С; час витримки — 1020 хв; капілярне очищення металевого розплаву.

Дослідження поверхні руйнування (рис. 1) не виявило тріщин на міжфазній межі, що свідчить про високу якість сформованого контакту. Проте на фрактографії добре видно тріщини в базальтових волокнах, довжина яких сягає діаметра волокна. Певна річ, що ці тріщини є критичними дефектами, які призводять до руйнування матеріалу. Оскільки добре відомо, що міцність матеріалу зменшується зі збільшенням розміру дефекту, було проведено дослідження впливу розміру волокна на міцність композиційного матеріалу (табл. 4).

Встановлено залежність границі міцності композита від об'ємної долі армуючої фази*. З вмістом армуючої фази у композиті 30, 40 та 50% (об.) його міцність на згин складає 190, 175 та 172 МПа відповідно. Було вибрано: базальтове волокно діаметром 400 мкм, розплав алюмінію, покриття V—Ni, режим просочення — 700 °С, 15 хв витримки. Виготовляли пластини розмірами 40 x 8 x 5 мм.

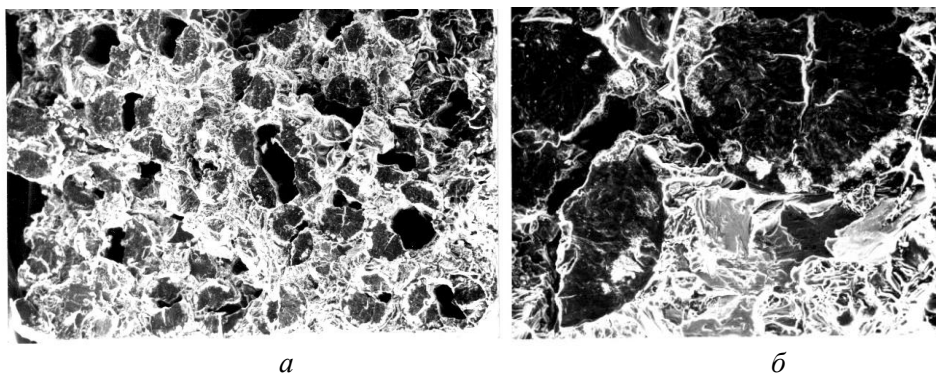


Рис. 1. Структура композита алюміній—базальтоне волокно, виготовленого методом самочинного просочення: *a* — збільшення $\times 170$; *b* — збільшення $\times 470$.

Т а б л и ц я 4. Механічні властивості композитів металевий розплав—базальтоне волокно в залежності від діаметра волокна армуючої фази (міцність на згин)*

Розплав, % (ат.)	Плівка	Режим просочення (T, τ)	Границя міцності, МПа					
			100 мкм	200 мкм	300 мкм	400 мкм	500 мкм	600 мкм
Al	Ni	700 °C, 10 хв	181	221	190	151	120	104
Al	V—Ni	700 °C, 10 хв	190	232	200	175	138	117
Al—12 Si	Ti—Ni	650 °C, 15 хв	—	254	234	195	—	—
Al—12 Si	V—Ni	650 °C, 15 хв	192	269	241	202	129	112

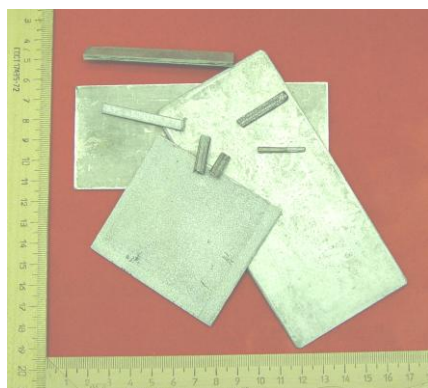


Рис. 2. Зразки композиційних матеріалів алюміній—базальтоне волокно, виготовлені методом самочинного вільного просочення без прикладання тиску.

капілярного очищення. Були виготовлені дослідні зразки різних видів пластин та стрижнів різних розмірів (рис. 2).

Відпрацювавши технологічний процес самочинного вільного просочення без прикладання тиску та визначивши технологічний режим та параметри процесу, а також виготовивши технологічне оснащення, отримали дослідні зразки композиційних матеріалів алюміній—базальтоне волокно. Як армуючу фазу використовували базальтоне волокно діаметрів 200, 300, 400 мкм, на яке були нанесені покриття з Ni, V—Ni, Ti—Ni електронно-променевим випарюванням металів у вакуумі. Очищення розплаву алюмінію від оксидної плівки здійснювали за допомогою

* Досліди по вивченню міцності виконані д-ром фіз.-мат. наук Ю. М. Подрезовим.

Виготовлення композиційних матеріалів з оксидної, базальтової тканини, повсті та алюмінію методом самочинного вільного просочення без прикладання тиску

Для всіх досліджень по просоченню базальтових волокон алюмінієвими розплавами та виготовлення дослідних зразків були вибрані дискретні волокна (діаметри волокон більше 100 мкм). Однак великий практичний інтерес має отримання КМ з безперервних волокон діаметром 9 мкм. Одержання композитів з таких тонких волокон ускладнено з технологічної точки зору. По-перше, на безперервні тонкі волокна дуже важко наносити металеву плівку так, щоб вона покривала волокно рівномірним шаром без проміжків; по-друге, дуже важко збирати тонкі безперервні волокна в необхідній для просочення каркас, що армується. Для полегшення процесу можна використовувати не окремі безперервні волокна, а готові полуфабрикати: сплетені нитки, тканини різної конфігурації, повсть та інші.

Виготовлення КМ здійснювали за допомогою процесу самочинного вільного просочення без прикладання тиску з базальтових та оксидних тканинних матеріалів типу Маріме. На поверхні тканини наносили покриття у вигляді рідкої пасти з порошку титану (зернистістю менш 40 мкм). Просочення проводили в вакуумі $2 \cdot 10^{-3}$ Па за температури 700 °С та з часом витримки 5 хв розплавом алюмінію, який видавлювався на тканину з капіляру графітової крапельниці.

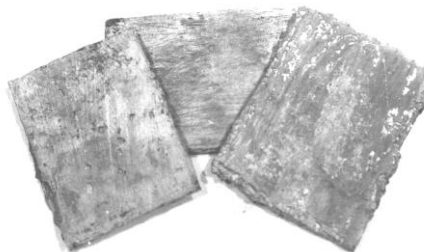
Були виготовлені дослідні зразки КМ у вигляді пластин з тканинних базальтових та оксидних матеріалів та повстю з алюмінієм (рис. 3).

Висновки і перспективи

З використанням технології самочинного просочення отримано безпористі композиційні матеріали алюмінієва матриця—базальтове волокно. Визначено міцність на згин таких матеріалів. Отримані дослідні зразки композиційного матеріалу та визначена границя руйнування цих зразків дозволяють припустити можливість використання дискретних базальтових волокон для одержання композиційного матеріалу з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Міцність на згин КМ для волокон діаметром 200 мкм дорівнює 270 МПа.

Для виготовлення композиційних матеріалів на основі алюмінію, армованого базальтовими волокнами, рекомендується використовувати метод самочинного вільного просочення без прикладання тиску для просочення грубих базальтових волокон з нанесеними покриттями Ni, V—Ni або Ti—Ni розплавами алюмінію або алюміній—кремній за температур 650—700 °С.

Рис. 3. Зразки композиційних матеріалів з алюмінію, армованого оксидними та базальтовими тканинами та базальтовою повстю.



Автори статті висловлюють подяку д-ру фіз.-мат. наук Подрезову Ю. М. за виконання досліджень по вивченню фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів.

Цитована література

1. Арефьев Б.А., Мануйлов В.Ф., Тихонов А.С. К вопросу о получении композиционных материалов с металлической матрицей методом обработки металла давлением. *Технология легких сплавов*. 1977. № 11. С. 68—71.
2. Иванова В.С., Копьев И.М., Елкин Ф.М. *Алюминиевые и магниевые сплавы, армированные волокнами*. Москва: Наука, 1974. 200 с.
3. Cooper G. Forming processes for metal matrix composites. *Composites*. 1970. Vol. 1, is. 3. P. 153—159.
4. Чернышева Т.А., Кобелева Л.И., Тылкина М.И. Металлизация высокомодульных волокон методом непрерывного литья. *Физика и химия обработки материалов*. 1977. № 6. С. 124—128.
5. Шоршоров М.Х., Кудряшев В.Г., Устинов Л.М. Сопротивление распространению трещин в композиции алюминиевый сплав—стальная проволока. *Проблемы прочности*. 1978. № 4. С. 9—12.
6. Гулевский В.А., Соловьев И.А. *Металлические сплавы для получения пропиткой углеграфитовых каркасных композитов*. Тр. Междунар. конф. “Слоистые композиционные материалы-98”. Волгоград, 1998. С. 215—217.
7. Baker A.A. Carbon fiber reinforced metals — a review of the current technology. *Mater. Sci. Eng.* 1975. Vol. 17, iss. 2. P. 177—208.
8. Тот И.Д., Брентнел У.Д., Менке Дж.Д. Композиционные материалы с алюминиевой матрицей. *Волокнистые композиционные материалы*. Москва: Металлургия, 1978. С. 11—77.
9. Шоршоров М.Х., Колпашников А.И., Костиков В.И. Процессы получения полуфабрикатов композиционных материалов. *Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей*. Москва: Машиностроение, 1981. С. 148—190.
10. Gremion R., Moreau M. Joquet G., Mollet P. Metaux renforces par des fibres de carbon. *Buletin d'Inform. Sci. Commisariat a l'Energie Atomique. Dupond, Paris*, 1971, Januar. P. 111—118.
11. Заболоцкий А.А., Салибеков С.Е. Разработка и исследование композиционных материалов системы алюминий—углеволокно. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1978. № 10. С. 49—52.
12. Заболоцкий А.А., Салибеков С.Е., Канцевич И.А. Влияние технологических факторов на свойства композиционного материала силумин—волокна карбида кремния. *Порошковая металлургия*. 1978. № 1. С. 66—70.
13. *Композиционные материалы: (Справ.)*. Киев: Наук. думка, 1985. 592 с.
14. Найдич Ю.В. *Контактные явления в металлических расплавах*. Киев: Наук. думка, 1972. 196 с.
15. Салибеков С.Е., Заболоцкий А.А., Турченков В.А. Исследование влияния никелевых покрытий на волокне на структуру и свойства композиционного материала алюминий—углеродное волокно. *Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы*. Москва: Наука, 1976. С. 33—37.
16. Портной К.И., Салибеков С.Е., Светлов И.Л. *Структура и свойства композиционных материалов*. Москва: Машиностроение, 1979. 255 с.
17. Портной К.И., Тимофеева Н.И., Заболоцкий А.А. Влияние содержания карбидной фазы на свойства углеалюминия. *Порошковая металлургия*. 1981. № 2. С. 45—49.
18. Красовский В.П., Иванова Т.С., Шебо П., Чабелка Д. Смачиваемость покрытия карбида кремния, нанесенного на графит расплавами алюминия и

его сплавами с кремнием. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 1992. Вып. 28. С. 60—63.

19. Krasovskyy V.P., Kostyuk B.D., Gab I.I., Krasovskaya N.A., Stetsyuk T.V. Effect of metallic nanocoatings deposited on silicon oxide on wetting by filler melts. I. Wetting of Ti, Nb, Cr, V, and Mo nanocoatings deposited on SiO₂ with filler melts. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. Springer. 2020. Vol. 59, No. 1–2. P. 29—34.
20. Krasovskyy V.P., Kostyuk B.D., Gab I.I., Krasovskaya N.A., Stetsyuk T.V. Effect of metallic nanocoatings deposited on silicon oxide on wetting by filler melts. II. Effect from the annealing of nanocoatings deposited on SiO₂ their structure and interaction with the oxide. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. Springer. 2020. Vol. 59, No. 3–4 (532). P. 134—140.
21. Naidich Yu.V., Chuvashov Yu.N., Ishchuk N.F., Krasovskii V.P. Wetting of some nonmetallic materials by aluminum. *Sov. Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1983. Vol. 22, No. 6. P. 481—483.
22. Landry K., Kalogeropoulou K., Eustathopoulos N., Naidich Y.V. Characteristic contact angles in the aluminium/vitreous carbon system. *Scripta Materialia*. 1996. Vol. 34, No. 6. P. 841—846.
23. Найдич Ю.В., Костюк Б.Д., Колесниченко Г.А., Шайкевич С.С. Смачиваемость в системе металлический расплав—тонкая металлическая пленка—неметаллическая подложка. *Физическая химия конденсированных фаз, сверхтвердых материалов и их границ раздела*. Киев: Наук. думка, 1975. С. 15—27.
24. Найдич Ю.В., Волк Г.П., Островская Л.Ю., Григоренко Н.Ф., Черниговцев Е.П. Исследование методом кино съемки кинетики пропитки металлическими расплавами пористых сред из алмаза и графита. *Порошковая металлургия*. 1988. № 6. С. 79—82.
25. Naidich Yu.V., Krasovskii V.P. Use of interfacial exothermic effect in the wetting process, production of composites, and soldering of ceramic materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. Springer. 2015. Vol. 54, No. 5–6. P. 331—339.

References

1. Arefev, B. A., Manuilov, V. F., Tykhonov, A. S. (1977). On the issue of obtaining composite materials with a metal matrix by metal pressure treatment. *Tekhnolohiya lehkyykh splavov*, No. 11, pp. 68—71 [in Russian].
2. Yvanova, V. S., Kopev, Y. M., Elkyn, F. M. (1974). *Fiber Reinforced Aluminum and Magnesium Alloys*, Moscow: Nauka, 200 p. [in Russian].
3. Cooper, G. (1970). Forming processes for metal matrix composites. *Composites*, Vol. 1, is. 3, pp. 153—159.
4. Chernysheva, T. A., Kobleva, L. Y., Tylkina, M. Y. (1977). Metallization of high modulus fibers by continuous casting. *Fyzyka y khymiya obrabotky materialov*, No. 6, pp. 124—128 [in Russian].
5. Shorshorov, M. Kh., Kudriashev, V. H., Ustynov, L. M. (1978). Resistance to crack propagation in aluminum alloy-steel wire composition. *Problemy prochnosti*, No. 4, pp. 9—12 [in Russian].
6. Hulevskiy, V. A., Solovev, Y. A. (1998). Metal alloys for impregnation of carbon-graphite frame composites. *Tr. Mezhd. konf. Sloistye kompozitsionnye materialy-98*. Volhohrad, pp. 215—217 [in Russian].
7. Baker, A. A. (1975). Carbon fiber reinforced metals — a review of the current technology. *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 17, is. 2, pp. 177—208.
8. Tot, Y. D., Brentnel, U. D., Menke, Dzh. D. (1978). Fiber composites with aluminium matrix. *Volokonnye kompozitsionnye materialy*, Moscow: Metallurhiya, pp. 11—77 [in Russian].

9. Shorshorov, M. Kh., Kolpashnikov, A. Y., Kostikov, V. Y. (1981). Processes for obtaining semi-finished composite materials. *Voloknistye kompozitsionnye materialy s metallicheskoi matritsei*. Moscow: Mashynostroeniye, pp. 148—190 [in Russian].
10. Gremion, R., Moreau, M., Joquet, G., Mollet, P. (1971). *Metaux renforces par des fibres de carbon*. Buletin d'Inform. Sci. Commisariat a l'Energie Atomique. Dupond, Paris, Januar. pp. 111—118.
11. Zabolotskiy, A. A., Salibekov, S. E. (1978). Development and research of composite materials of the aluminum-carbon fiber system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, No. 10, pp. 49—52 [in Russian].
12. Zabolotskiy, A. A., Salibekov, S. E., Kantsevich, Y. A. (1978). Influence of technological factors on the properties of composite material silumin-fiber silicon carbide. *Poroshkovaya metallurhiya*, No. 1, pp. 66—70 [in Russian].
13. *Composites. Handbook*. Kiev: Nauk. dumka, 1985. 592 p. [in Russian].
14. Naidich, Yu. V. (1972). *Contact phenomena in metallic melts*. Kiev: Nauk. dumka, 196 p. [in Russian].
15. Salibekov, S. E., Zabolotskii, A. A., Turchenkov, V. A. (1976). Investigation of the effect of nickel coatings on fiber on the structure and properties of the aluminum-carbon fiber composite material. *Voloknistye y dispersno uprochnennye kompozitsionnye materialy*. Moscow: Nauka, pp. 33—37 [in Russian].
16. Portnoi, K. Y., Salybekov, S. E., Svetlov, Y. L. (1979). *Structure and properties of composites materials*. Moscow: Mashynostroeniye, 255 p. [in Russian].
17. Portnoi, K. Y., Tymofeeva, N. Y., Zabolotskii, A. A. (1981). Influence of the content of the carbide phase on the properties of aluminum carbon. *Poroshkovaya metallurhiya*, No. 2, pp. 45—49 [in Russian].
18. Krasovskii, V. P., Ivanova, T. S., Shebo, P., Chabelka, D. (1992). Wettability of a silicon carbide coating deposited on graphite with aluminum melts and its alloys with silicon. *Adheziya rasplavov i paika materialov*, Vyp. 28, pp. 60—63 [in Russian].
19. Krasovskyy, V. P., Kostyuk, B. D., Gab, I. I., Krasovskaya, N. A., Stetsyuk T. V. (2020). Effect of metallic nanocoatings deposited on silicon oxide on wetting by filler melts. I. Wetting of Ti, Nb, Cr, V, and Mo nanocoatings deposited on SiO₂ with filler melts. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 59, is. 1—2, pp. 29—34; doi:<https://doi.org/10.1007/s11106-020-00135-8>.
20. Krasovskyy, V. P., Kostyuk, B. D., Gab, I. I., Krasovskaya, N. A., Stetsyuk, T. V. (2020). Effect of metallic nanocoatings deposited on silicon oxide on wetting by filler melts. II. Effect from the annealing of nanocoatings deposited on SiO₂ their structure and interaction with the oxide. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 59, No. 3—4 (532), pp. 134—140; doi:<https://doi.org/10.1007/s11106-020-00146-5>.
21. Naidich, Yu. V., Chuvashov, Yu. N., Ishchuk, N. F., Krasovskii, V. P. (1983). Wetting of some nonmetallic materials by aluminum. *Sov. Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 22, No. 6, pp. 481—483.
22. Landry, K., Kalogeropoulou, K., Eustathopoulos, N., Naidich, Y. V., Krasovskyy, V. P. (1996). Characteristic contact angles in the aluminium/vitreous carbon system. *Scripta Materialia*, Vol. 34, No. 6, pp. 841—846.
23. Naidich, Yu. V., Kostiuk, B. D., Kolesnychenko, H. A., Shaikevych, S. S. (1975). Wettability in the system metal melt — thin metal film — non-metallic substrate. *Fizicheskaya khsmiya kondensirovannykh faz, sverkhkhtverdykh materialov i ikh hranits razdela*. Kiev: Nauk. dumka, pp. 15—27 [in Russian].
24. Naidich, Yu. V., Volk, H. P., Ostrovskaya, L. Iu., Hryhorenko, N. F. (1988). Investigation by filming of the kinetics of impregnation of porous media from diamond and graphite with metal melts. *Poroshkovaya metallurhiya*, No. 6, pp. 79—82 [in Russian].

25. Naidich, Yu. V., Krasovskii, V. P. (2015). Use of interfacial exothermic effect in the wetting process, production of composites, and soldering of ceramic materials. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 54, No. 5–6, pp. 331–339.

Study of the impregnation kinetics of basalt, carbon, oxide fibers with aluminum melts and its alloys

V. P. Krasovskyy*, N. A. Krasovskaya

I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: vitalkras@ipms.kiev.ua

Wetting studies were performed by the sessile drop method using the capillary purification method of melt during the experiment in a vacuum of $2 \cdot 10^{-3}$ Pa in the temperature range of 600–700 °C. The use of a dropper allows separate heating of the melt and the substrate, capillary and thermo vacuum cleaning of the melt, as well as thermo vacuum cleaning of the coatings surface. This is a model scheme of the impregnation process of non-metallic frames with matrix melts in the manufacture of composite materials by spontaneous free impregnation. Vanadium, copper and nickel metals were chosen for the coatings, which were sprayed on the materials by electron beam evaporation of metals in vacuum, and titanium, nickel powders for the coatings were used. The nature of the wetting angle dependence on the film thickness is a linear decrease in the angle with increasing film thickness. Studies have shown the possibility of using double films vanadium–copper, vanadium–nickel for the manufacture of composite materials from basalt fibers. The process of impregnation of basalt, carbon and oxide fibers with aluminum melts and its alloy with silicon in the temperature range 650–700 °C has been studied. The metal titanium, nickel powder coatings and films vanadium–copper, vanadium–nickel for the method of spontaneous free impregnation were used. Specimens of the composite material were obtained and the limit of destruction of these samples was determined. The bend strength of composites (basalt fiber 200 μm) is 270 MPa.

Keywords: *spontaneous free impregnation, composites, aluminium melts, basalt, carbon, oxide fibers, wetting, metal coatings and coverings.*