

<https://doi.org/10.15407//plit2024.04.044>

УДК 669:621.039; 669:621.039.6

М.М. Ямшинський, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри;

e-mail: yamshinskiy@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

Є.Г. Биба, канд. техн. наук, доцент, доцент;

e-mail: byba.evgen@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

А.В. Мініцький, д-р техн. наук, проф., проф.; e-mail: aminitsky@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

І.В. Лук'яненко, канд. техн. наук, доцент; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

С.П. Бісик*, д-р техн. наук, проф., начальник наук.-випроб. відділу; e-mail:

sergey-new@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-5009-2113>

Б.В. Кивгило, асистент; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

В.В. Коваленко, здобувач вищої освіти;

e-mail: vitaly.kovalenko1983@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-9120-6533>

В.В. Гринюк*, начальник кафедри; e-mail: vova_kira_alla@ukr.net

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна),

* Національний університет оборони України (Київ, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ІНФІЛЬТРАЦІЇ ПОРИСТИХ КАРКАСІВ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Досліджено параметри процесу інфільтрації пористих каркасів на основі металевої стружки розплавом алюмінію, що забезпечують отримання композиційних матеріалів для елементів конструкцій протимінного захисту. Розглянуто можливість ефективної утилізації відходів металооброблення машинобудівних підприємств шляхом формування пористих каркасів із заданим об'ємом пор із подальшою інфільтрацією металевим розплавом. При цьому визначено, що основною проблемою при формуванні структури композитів є взаємодія алюмінію із залізним каркасом, що призводить до утворення інтерметалідних фаз, таких як $FeAl_3$, які окрихчують композит та знижують механічні властивості матеріалу. Встановлено, що основним технологічним параметром, який визначає механічні властивості композита,

є температурні режими процесу інфільтрації. У роботі проаналізовано вплив температури заливання алюмінію та попереднього нагрівання металевго каркаса на формування структури композиційного матеріалу. Встановлено, що температура заливання на рівні 800 °C та попереднє нагрівання сталевго каркаса до 300 °C забезпечують оптимальні умови для отримання композита з високими механічними характеристиками, що зумовлено відсутністю порожнин у структурі матеріалу. Металографічний аналіз показав рівномірний розподіл армуючої фази в об'ємі композита та відсутність значної кількості дефектів у вигляді пор, що підтверджує ефективність процесу інфільтрації при просочуванні за температури 800 °C. Підвищення температури заливання вище 800 °C призводить до насичення розплаву газами, що негативно впливає на якість композита через утворення закритої пористості. Водночас для забезпечення ефективності процесу інфільтрації рекомендовано швидке проведення процесу з використанням вакуумування металевго оснастки. Для практичного застосування таких матеріалів важливим є врахування їх поведінки під час вибухового навантаження. Результати комп'ютерного моделювання показують, що використання таких композитів у конструкціях протимінного захисту може суттєво знизити пошкодження корпусу під час вибуху, забезпечуючи при цьому достатню міцність і пластичність матеріалу. Таким чином, дослідження технологічних параметрів процесу інфільтрації алюмінієвих розплавів у пористий каркас є важливим кроком на шляху до створення високоефективних композиційних матеріалів із високими механічними властивостями та економічною ефективністю.

Ключові слова: металева стружка, алюміній, композиційний матеріал, міцність на згин, ударна в'язкість, міцність, температура заливання, температура каркаса, рециклінг відходів механічного оброблення.

Вступ

Стрімкий розвиток технологій за останні роки зумовлює необхідність використовувати в різних сферах промисловості матеріали з високими механічними властивостями. Виробництво та експлуатація сучасних матеріалів охоплює велику кількість технологічних мікропроцесів. Такі матеріали можуть мати різні експлуатаційні характеристики та використовуватись у різних галузях науки і техніки. Проте екстремальні умови роботи, ударні навантаження не дозволяють повною мірою задовольнити вимоги до конструкційних елементів протимінного захисту. Створення таких конструкційних матеріалів призводить до доволі високих економічних витрат, зниження рентабельності та підвищеної матеріалоемності процесу.

Сучасні технологічні інновації дозволяють розглядати вторинні промислові відходи як додаткове джерело сировини й матеріалів. Аналіз машинобудівного виробництва показує, що його супроводжує накопичення значної кількості відходів [1–4]. Переважним видом відходів є металева стружка, що утворюється під час механічного оброблення сталевих виробів у великих обсягах. На підприємствах середньої величини її кількість може становити близько 18–20 тис. т на рік [5].

Вирішення завдань ресурсозбереження, яке передбачає включення відходів у технологічний цикл підприємства, дає змогу збільшити рентабельність виробництва, знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище, що актуально в умовах виснаження запасів природних ресурсів, особливо металів і сплавів, які широко використовуються у виробництві.

Питання утилізації металевго стружки [5], що утворюється під час механічного оброблення, становить для машинобудівних підприємств серйозну проблему. Завдяки комплексу різних методів та підходів можна отримати матеріали з високими механічними показниками [3, 5].

Основна особливість матеріалу, який виготовляють методом інфільтрації каркасів, є отримання композитів із високими експлуатаційними властивостями, не прияманими вихідним матеріалам. Завданням для виготовлення шаруватих композитів є отримання меншої питомої ваги при незначних змінах механічних властивостей. Такі вимоги найчастіше висуваються в літакобудівній та космічній галузях, де питома вага є найважливішим критерієм [6, 7], і машинобудування [8, 9] не стоїть осторонь у цьому плані.

Серед багатьох способів отримання композиційних матеріалів технічно най-

простішим є заливання розплавленого металу у форму з пористим каркасом із подальшою інфільтрацією розплаву. Для покращення інфільтрації розплаву крізь каркас можна прокласти тиск шляхом подачі на поверхню розплаву газу з тиском 0,2–0,3 МПа [9, 10]. Основними недоліками цієї схеми є нерівномірний розподіл пористості внаслідок того, що рідкий метал проникає тільки у великі пори.

Як і в більшості методів інфільтрації, вирішальними факторами виступають параметри капілярних явищ, температури нагрівання розплаву, температури нагрівання каркаса, форма виробу та характеристики каркаса. Однією з головних характеристик рідкого сплаву є його поверхневий натяг, величина якого залежить від температури нагрівання та його чистоти [10]. Розглянута технологія дозволяє отримати литі пористі каркаси з різними значеннями пористості, а саме 60–80 % об'ємної пористості.

В отриманні шаруватого композита за запропонованою схемою [9] виявлено недоліки: наявність оксидної плівки на поверхні алюмінієвого розплаву та активна дифузійна взаємодія на межі розділу алюмінію / залізо. Крім того, під час взаємодії алюмінію та заліза утворюються інтерметалідні фази FeAl_3 , що мають температуру плавлення 1160 °C та призводять до закривання пор і зупинки процесу інфільтрації. Самовільне просочення не відбувається навіть під час занурення залізного каркаса в алюмінієвий розплав та під час використання флюсів.

Під час робіт авторам [9] не вдалося зменшити взаємодію між алюмінієм та залізом, а отримані властивості матеріалу обмежують його практичне застосування. З огляду на сказане, взаємодія алюмінію з металевою стружкою під час процесу інфільтрації є актуальним питанням.

Мета роботи — дослідження та встановлення технологічних параметрів процесу інфільтрації поруватого каркаса з відходів металооброблення розплавом алюмінію для формування матричної структури композиційного матеріалу.

Роботу виконано відповідно до договору №ДЗ/149-2023 «Розроблення технології виготовлення високоефективних елементів протимінного захисту з відходів металообробки» у рамках виконання державного замовлення. Номер державної реєстрації — 0123U104371. Дослідження проводили на виробничих потужностях АТ «ЕЛМІЗ».

Постановка завдань дослідження

Однією з основних вимог до процесу інфільтрації є температура заливання розплаву і температура попереднього підігрівання металевого каркаса, саме тому було необхідно: визначити температурні параметри процесу інфільтрації; дослідити механічні властивості отриманих композитів; провести комп'ютерне моделювання процесу вибухового навантаження на отримані композити.

Результати дослідження

За результатами роботи [9] авторам не вдалося отримати матеріал із високими механічними властивостями через те, що під час проходження процесу інфільтрації відбувалася взаємодія між розплавом алюмінію та залізним каркасом, що призводило до утворення інтерметалідів FeAl_3 та запливання пор раніше, ніж розплав встигав туди потрапити. Для вирішення цієї проблеми процес інфільтрації необхідно проводити дуже швидко з використанням вакуумування металевої пресформи.

Для проведення дослідження як вихідний матеріал вибрано чистий алюміній марки А5. Зменшення капілярного тиску та покращення процесів змочування забезпечували за рахунок занурення металевого каркаса в 0,1 нормальний розчин соляної кислоти в спирті, що сприяло активації поверхні сталевих стружок за рахунок переведення оксидів або гідроксидів заліза в хлориди, які розпадаються та відкривають поверхню сталі під час інфільтрації. Також із метою підвищення змочуваності металевої стружки застосовували ще один спосіб, який полягав у нанесенні флюсу для паяння алюмінію, марки ФНА.

Було досліджено такі технологічні параметри: температура металевої пресформи — 300 °C; температура заливання алюмінію марки А5 від 750 °C до 850 °C; температура металевого каркаса від 20 °C до 500 °C. Інфільтрацію алюмінієвого роз-

плаву здійснювали при розрідженні від 0,04 МПа до 0,06 МПа. Механічні властивості отриманого композита наведено в табл. 1, на рис. 1 та рис. 2.

Таблиця 1

Механічні властивості отриманого композита

Інд. позн.	Температура каркаса, °С	Температура заливання, °С	Механічні властивості		
			Міцність на стик, МПа	Відносна деформація, %	Ударна в'язкість, КС, кДж/м²
	Металевий каркас, оброблений в 0,1 нормальному розчині соляної кислоти в спирті				
1.1	20	750	102	21,3	220
1.2		800	213	25,5	210
1.3		850	175	16,5	280
1.4	150	750	115	22,4	230
1.5		800	220	26,8	240
1.6		850	190	18,2	280
1.7	300	750	150	24,2	245
1.8		800	286	28,9	260
1.9		850	117	19,7	290
1.10	500	750	144	23,5	270
1.11		800	275	28,1	275
1.12		850	112	19,1	300
	Металевий каркас із нанесеним флюсом для пайки алюмінію марки ФНА				
2.1	20	750	86	10,5	100
2.2		800	120	18,6	90
2.3		850	95	15,9	180
2.4	150	750	97	11,6	120
2.5		800	135	20,5	110
2.6		850	108	17,6	200
2.7	300	750	100	12,2	120
2.8		800	139	21,6	130
2.9		850	111	18,5	210
2.10	500	750	91	10,9	110
2.11		800	126	19,2	170
2.12		850	101	16,5	190

Встановлено, що температура заливання на рівні 800 °С сприяє збільшенню міцності для всіх досліджуваних зразків (рис. 1). Температура підігрівання до 300 °С додатково сприяє утворенню міцного композита. Оброблення металевого каркаса 0,1 нормальним розчином соляної кислоти в спирті сприяє утворенню на поверхні стружки хлоридів заліза, що, у свою чергу, покращує дифузійне зчеплення компонентів композита.

У роботі було використано флюс для пайки алюмінію, який наносився на металевий каркас для покращення процесу адгезії складових композита. Як показали результати досліджень, міцність композита перебуває на рівні 120–140 МПа (рис. 2),

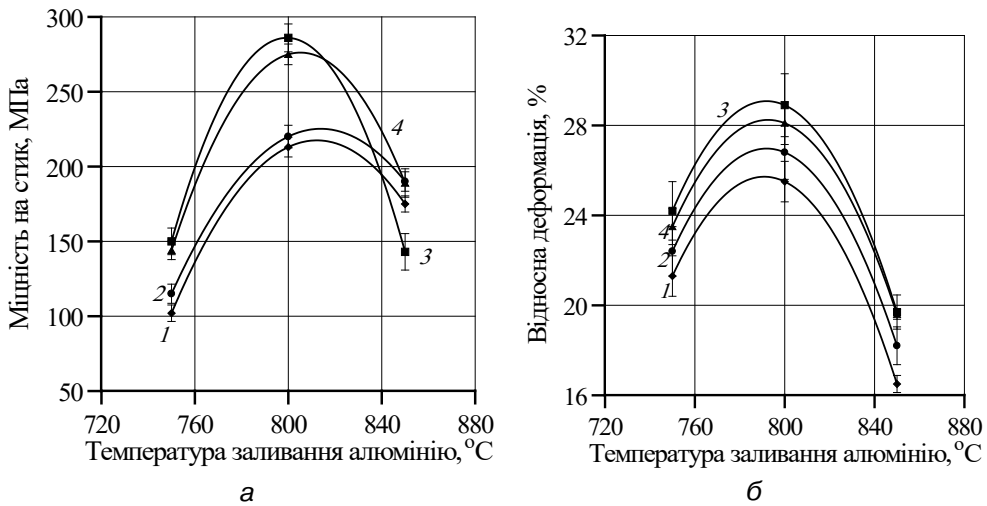


Рис. 1. Механічні властивості композита залежно від температури підігрівання металевого каркаса та оброблення в 0,1 нормальному розчині соляної кислоти в спирті: а — міцність на стик; б — відносна деформація; 1 — 20 °C; 2 — 150 °C; 3 — 300 °C; 4 — 500 °C

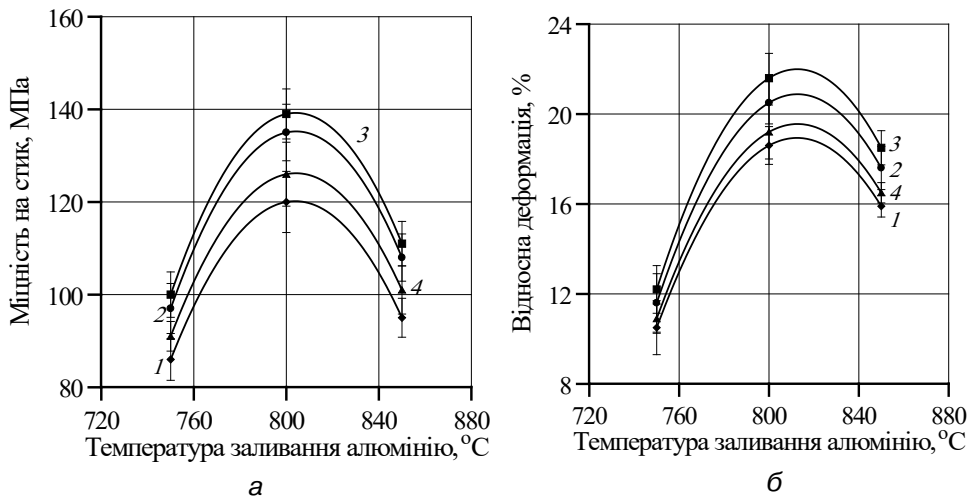


Рис. 2. Механічні властивості композита залежно від температури підігрівання металевого каркаса та оброблення флюсом для пайки алюмінію ФНА: а — міцність на стик; б — відносна деформація; 1 — 20 °C; 2 — 150 °C; 3 — 300 °C; 4 — 500 °C

а відносна деформація на рівні 18–22 %. Такі властивості не можуть забезпечити високі експлуатаційні характеристики конструкційних елементів протимінного захисту.

Підвищення температури заливання до 850 °C сприяє насиченню розплаву розчиненими газами, які виокремлюються на межі контакту металеве стружка / алюміній і призводять до окрихчування композита в цілому.

За результатами металографічного аналізу встановлено, що розподіл армуючої фази композиційного матеріалу в об'ємі є рівномірним (рис. 3). Було визначено, що проникнення інфільтрату відбувається повністю, про що свідчить повна відсутність порожнин; навіть мікропори, які утворилися на межі розподілу металеве стружка / алюміній, повністю заповнені інфільтратом.

Фактична відсутність інтерметалідних фаз у структурі композита зумовлена тим, що час просочування під вакуумом становить декілька секунд і компоненти не встигають прореагувати між собою. Відповідно, механічні характеристики таких каркасних матеріалів будуть вищі, ніж у матеріалів, отриманих просочуванням шляхом занурення в алюмінієвий розплав із тривалим часом витримування.

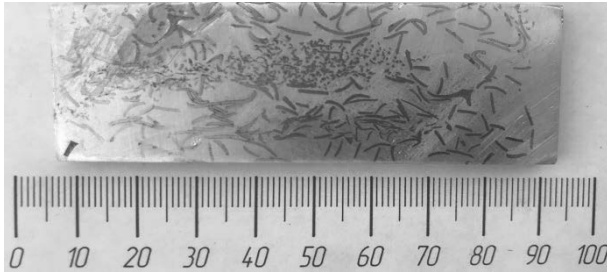


Рис. 3. Макроструктура композита з температурою підігрівання металевого каркаса до 300 °С

За результатами металографічних досліджень встановлено, що вміст структурної складової «металева стружка» за допомогою програмного забезпечення AmScore перебуває в діапазоні від 30 до 36 % і додатково підтверджується результатами гідростатичного зважування.

Підвищення температури заливання рідкого розплаву вище 800 °С не є доцільним, оскільки за

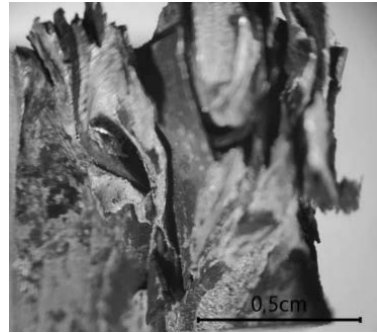
за температури 850 °С збільшується насичення розчиненими газами, що призводить до збільшення закритої пористості під час кристалізації композита.

Температура попереднього нагрівання металеві стружки вище 300 °С не впливає на зміну структури композиційного матеріалу в процесі інфільтрації.

За характером зламів зразків композиційного матеріалу (рис. 4) можна стверджувати, що під час кристалізації розплаву й утворення композита утворився доволі міцний механічний зв'язок між структурними складовими.



а



б

Рис. 4. Злами композита з температурою підігрівання металевого каркаса до 300 °С: а — температура заливання алюмінію 800 °С; б — температура заливання алюмінію 850 °С

Під час руйнування зразків відшаровування металеві стружки з матриці композита практично відсутнє (рис 4, а). Збільшення температури інфільтрації до 850 °С призводить до більш інтенсивного відшаровування металеві стружки (рис 4, б).

Дослідження на ударний згин дозволяють зробити висновок, що, незважаючи на те що при температурі заливання 850 °С і температурі попереднього підігрівання металевого каркаса до 500 °С спостерігається її підвищення. Для заощадження енергетичних ресурсів необхідно вибирати температуру заливання 800 °С і температуру попереднього підігрівання металевого каркаса до 300 °С. Обрані технологічні режими забезпечують високі механічні властивості отриманого композита.

За результатами досліджень механічних властивостей побудовано номограми для інтерполяції міцності на стик та пластичної деформації (у межах досліджуваного діапазону) (рис. 5).

Для визначення поведінки отриманого композита під дією вибухового навантаження з урахуванням залежності пластичності матеріалу від температурних змін використовувалися моделювання вибухового навантаження зарядом вибухової речовини масою 8 кг (у тротиловому еквіваленті, відповідно, ВСТ 01.055.004-2021 (01) (STANAG 4569 Edition 3).

Фізико-механічні характеристики дослідних зразків, визначенні натурним експериментами, застосовані при комп'ютерному моделюванні та наведенні в табл. 1.

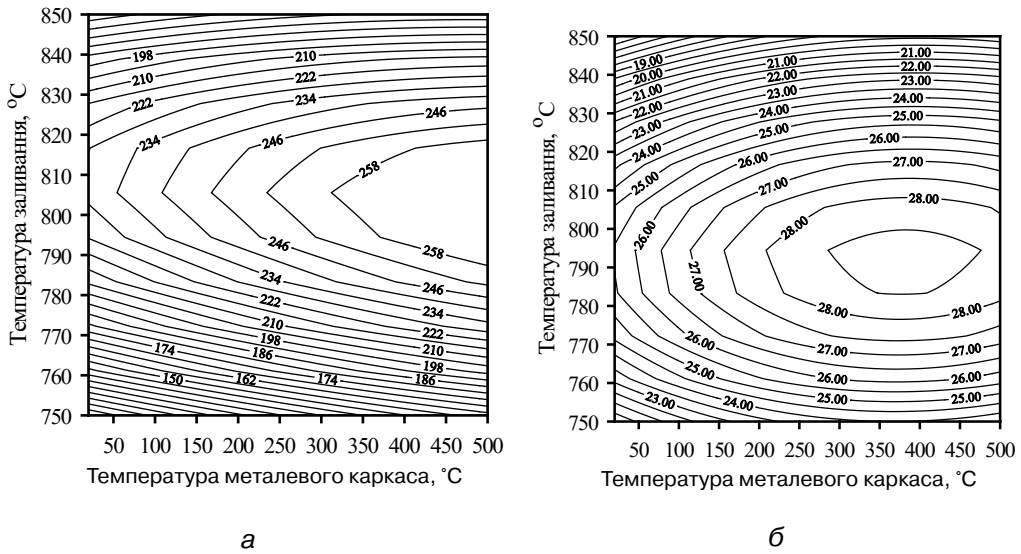


Рис. 5. Номограми визначення механічних властивостей композита: а — міцність на стик; б — відносна деформація

З метою опису поведінки композиційного матеріалу із захисного протимінного екрана (ЗПМЕ) під дією вибухового навантаження з урахуванням залежності пластичності матеріалу від температурних змін використовували модель пластичності матеріалу Джонсона-Кука (англ. Johnson-Cook) для опису поведінки сталі при пробитті [11].

Під час моделювання детонації заряду вибухової речовини (ВР) застосовувалась найбільш розповсюджена на сьогодні (і найбільш раціональна) форма рівняння стану $p = p(\bar{E}, \rho)$, що дозволяє з високою точністю описувати властивості продуктів детонації та має до того ж широку базу вихідних даних для різних ВР, це рівняння стану Джонсона-Уілкінса-Лі (англ. Jones-Wilkins-Lee (JWL) [12].

Застосування комп'ютерного моделювання для дослідження вибухового навантаження макета корпусу бойової броньованої машини (ББМ) передбачає перевірку адекватності, збіжності й точності самої числової моделі.

Перевірка стійкості макета корпусу ББМ, захищеного ЗПМЕ, здійснюється теоретично з використанням пакета прикладних програм ANSYS LS-DYNA.

Розрахунок проводиться в умовах підриву зарядів ВР масою 8 кг у тротиловому еквіваленті. Для проведення випробувань на основі геометричної моделі конструкції макета зразка створюється її скінченно-елементна (СЕ) модель (рис. 6).

СЕ-модель утворюється оболонковими елементами. З її використанням досліджено вплив параметрів вибухового навантаження на прискорення корпусу макета. Кадри результатів моделювання підриву наведено на рис. 7 і є типовими для результатів моделювання з різними параметрами.

Отримані значення зміни швидкості та прискорення макета корпусу ББМ із ЗПМЕ з різними фізико-механічними властивостями наведені в табл. 2.

На зразках 1.2, 2.7 та 2.8 прогини в середині екрана зменшуються, в порівнянні з екраном, виготовленим із алюмінію в 0,9, 0,7 та 0,8 рази відповідно. У цьому випадку прискорення корпусу, захищеного протимінним екраном, зростає відносно зразків 1.2, 2.7 і 2.8, але на 10–20 % нижче, ніж при використанні алюмінієвого екрана.

Таким чином, можна зробити висновок, що зразки 1.2, 2.7 та 2.8 мають більшу стійкість до вибухового навантаження, оскільки забезпечують менші значення прогинів (збільшують жорсткість конструкції) та зменшують прискорення макета корпусу БМ, тому можуть бути перспективними для виготовлення протимінного захисту бойових броньованих машин.

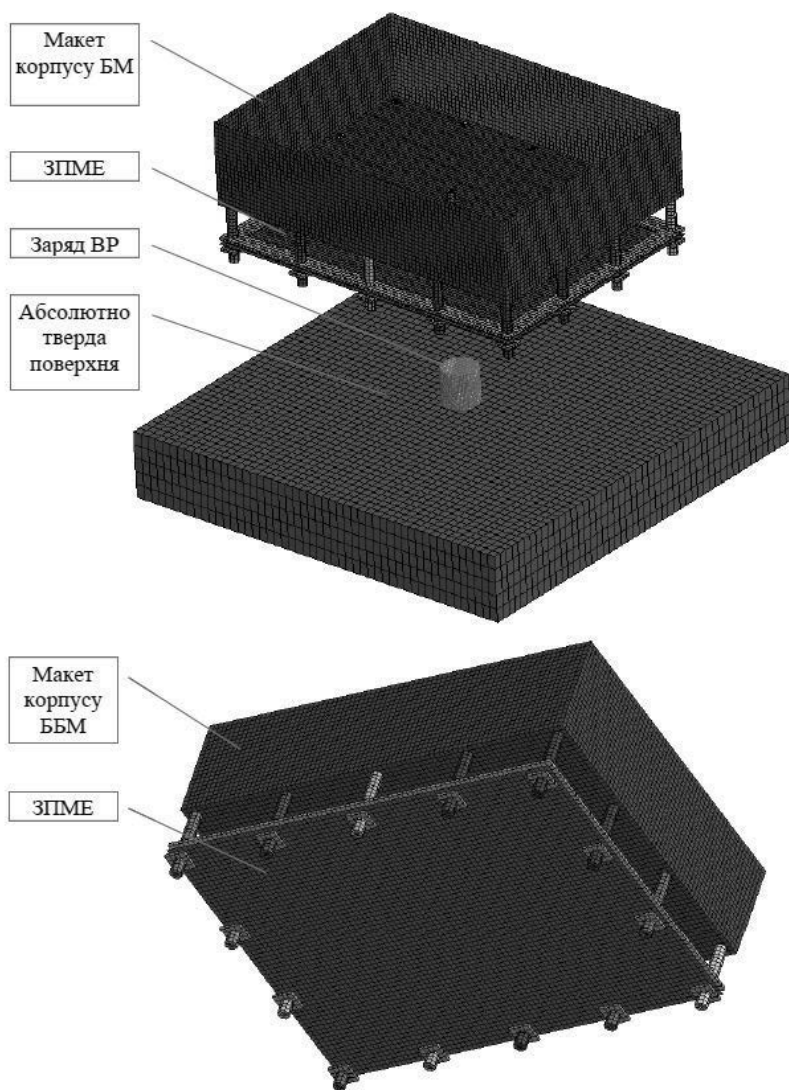


Рис. 6. СЕ-модель макета корпусу ББМ

Висновки

Встановлено, що оптимальні результати отримуються при температурі заливання 800 °С і попередньому нагріванні каркаса до 300 °С. Це дозволяє зменшити утворення порожнин, забезпечити рівномірний розподіл армуючої фази та покращити змочуваність металевої стружки алюмінієм. Перетворення стружки на каркаси для подальшої інфільтрації алюмінієвим розплавом створює вискоєфективний композитний матеріал для конструкцій, що потребують міцності, зокрема для протимінного захисту. Завдяки цьому зменшуються економічні витрати, що підвищує рентабельність виробництва та сприяє більш раціональному використанню матеріалів у технологічних процесах.

Ключовою проблемою під час інфільтрації є взаємодія алюмінію із залізом, яка призводить до утворення інтерметалідних фаз, таких як FeAl_3 . Ці фази мають підвищену твердість, але є крихкими, що погіршує загальні механічні властивості композитного матеріалу, зокрема його пластичність і міцність на удар. Така взаємодія може бути особливо вираженою при підвищених температурах заливання. Для мінімізації цих негативних наслідків важливо проводити інфільтрацію швидко та за умов вакуумування, що сприяє зниженню кількості домішок і запобігає утворенню небажаних фаз.

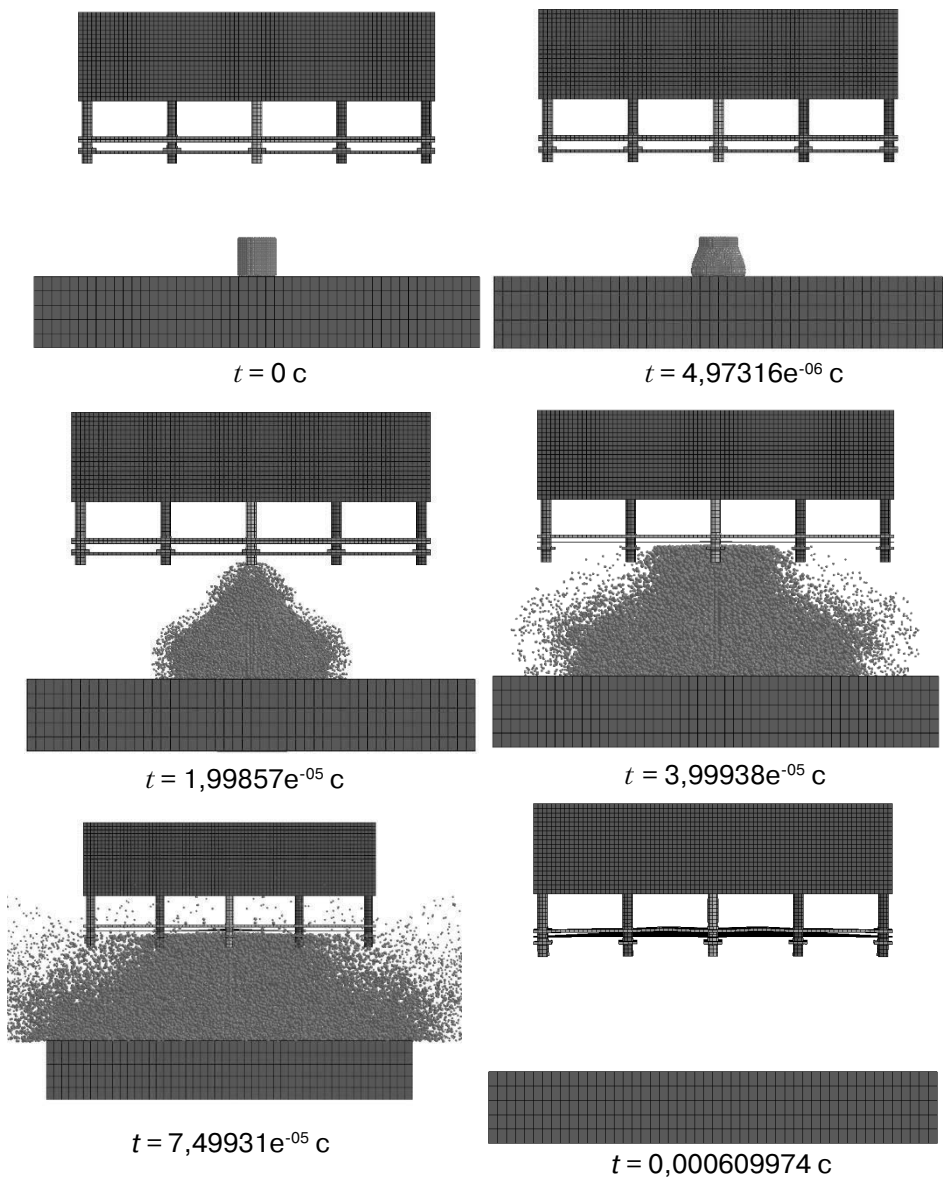


Рис. 7. Кадри результатів моделювання підриву макета корпусу ББМ

Таблиця 2
Розраховані значення зміни швидкості та прискорення макета корпусу ББМ із ЗПМЕ з різними фізико-механічними властивостями

Зразок	Прогин у середині ЗПМЕ, мм	Швидкість макета, м/с	Прискорення макета, м/с ²	Внутрішня енергія ЗПМЕ, Дж
1.2	24,6	2,05	2900	361
1.8	36,2	3,68	4350	1160
2.7	18,8	2,08	3460	367
2.8	20,7	2,09	3360	368

Однак підвищення температури заливання понад 800 °С веде до збільшеного поглинання розплавом алюмінію газів, таких як водень і кисень, що спричиняє формування пористості в матеріалі. Це знижує щільність і цілісність композита, негативно впливаючи на його механічні властивості та довговічність. Важливо контролювати температуру процесу, щоб досягти оптимальних результатів, уникнути насичення розплаву газами і зменшити ризик утворення дефектів

Комп'ютерне моделювання вибухового навантаження підтверджує перспективність використання таких матеріалів для зниження пошкоджень під час вибухів. Технологія інфільтрації пористих каркасів відкриває шлях до створення ефективних композиційних матеріалів із високими механічними характеристиками й значною економічною вигодою.

Список літератури

- 1 Технології переробки металевої стружки (Огляд) / О. Веретільник та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2020. № 1. С. 31–38. URL: <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.06>.
- 2 Дьяконов О. Исследование физико-химических и механических свойств стальной и чугунной стружки. *Литье и металлургия*. 2009. № 4 (53). С. 161–173.
- 3 Чернишов О., Узбек А. Дослідження основних характеристик металевої стружки з метою її подальшої переробки. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015. С. 50–54.
- 4 Підвищення ефективності процесу очищення металевої стружки від мастильно-охолоджуючих рідин за допомогою миючих розчинів / О. Чернишов та ін. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2018. № 5 (112). С. 103–109.
- 5 Ямшинський М.М., Биба Є.Г., Мініцький А.В., Лук'яненко І.В., Бісик С.П., Гринюк В.В., Кивгило Б.В. Дослідження процесів формування, структури та властивостей пористих каркасів. *Процеси лиття*. №1 (155). 2024. С. 58–71. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.058>
- 6 Тринева Т.Л. Технологический процесс изготовления литейной оснастки из композитного материала методом селективного лазерного спекания. *Процессы литья*. 2012. № 1. С. 31–35.
- 7 Белов С.В. Пористые проницаемые материалы. Москва: Металлургия, 1987. 335 с.
- 8 Формирование пористого каркаса порошковых антифрикционных материалов. *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. 2009. № 1(2). С. 51–58.
- 9 Андрешевич А. А. Литые пористые материалы и технологии их получения. *Литье и металлургия*. 2009. №38. С. 165–167.
- 10 Ниженко В.И., Флока Л.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. Москва: Металлургия, 1981. 208 с.
- 11 Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини / С. Бісик та ін. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 2 (14). С. 17–22. URL: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2\(14\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2(14)).
- 12 Порівняння ефективності підходів до числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди / С. Бісик та ін. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 3 (15). С. 8–15. URL: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3\(15\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3(15)).

Надійшла 19 08. 2024

References

- 1 Veretilnyk O. et al. (2020). Technologies of metal chip processing (Review). *Modern electrometallurgy*. No1. pp. 31–38. URL: <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.06> [in Ukrainian].

- 2 Diakonov O. (2009). Investigation of physicochemical and mechanical properties of steel and cast iron chips. *Casting and metallurgy*. No 4 (53). pp. 161–173 [in Russian].
- 3 Chernyshov O. and Uzbek A. (2015). Research of the main characteristics of metal chips for the purpose of their further processing. Collection of scientific papers of *Dniprodzerzhynsk State Technical University (technical sciences)*. Dniprodzerzhynsk: DSTU. pp. 50–54 [in Ukrainian].
- 4 Chernyshov O. et al. (2018). Improving the efficiency of the process of cleaning metal chips from lubricating and cooling liquids using detergent solutions. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. No 5 (112). pp. 103–109 [in Ukrainian].
- 5 Yamshynskiy M.M. et al. (2024). Study of the formation processes, structure and properties of porous frameworks. *Casting Processes*. No 1 (155) 2024. pp. 58–71. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.058> [in Ukrainian].
- 6 Trineva T.L. (2012). Technological process of foundry tooling manufacturing from composite material by selective laser sintering. *Casting processes*. No 1. pp. 31–35 [in Russian].
- 7 Belov S.V. (1987). Porous permeable materials. Moskva: Metallurgy. 335 p. [in Russian].
- 8 Formation of a porous framework of powder antifriction materials (in Ukrainian) (2009). *Bulletin of the Ukrainian Materials Science Society*. No. 1(2). pp. 51–58 [in Russian].
- 9 Andreshevich A. A. (2009). Cast porous materials and technologies of their production. *Casting and Metallurgy*. No. 38. pp. 165–167 [in Russian].
- 10 Nizhenko V.I. and Floka L.I. Surface tension of liquid metals and alloys. Moskva: Metallurgy, 1981. 208 p. [in Russian].
- 11 Bisyk S. et al. (2017). Numerical modeling of penetration of a homogeneous obstacle by impactors with different shapes of the head part. *Arms and military equipment*. No 2 (14). pp. 17–22. URL: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2\(14\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2(14)) [in Ukrainian].
- 12 Bisyk S. et al. (2017). Comparison of the effectiveness of approaches to numerical modeling of penetration of a homogeneous obstacle by a striker. *Arms and military equipment*. No 3 (15). pp. 8–15. URL: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3\(15\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3(15)) [in Ukrainian].

Надійшла 19.08 2024

Mykhailo Yamshinskij, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department Chair;

e-mail: yamshinskiy@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

Evgeny Byba, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor;

e-mail; byba.evgen@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

Anatolii Minitskyi, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor; e-mail aminitsky@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

Ivan Lukianenko, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

Serhii Bisyk*, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Research and Testing Department

of the Ukraine National Defence University; e-mail: sergey-new@ukr.net;

<https://orcid.org/0000-0002-5009-2113>

Bohdan Kyvhylo, graduate student; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com;

orcid.org/0000-0001-5890-9020

Vitalii Kovalenko, higher education student; e-mail: vitaly.kovalenko1983@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0009-9120-6533>

Volodymyr Hryniuk*, Head of the Military Training Department of the National Defense University of Ukraine; e-mail: vova_kira_alla@ukr.net,

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

*Research and Testing Department of the Ukraine National Defence University (Kyiv, Ukraine)

STUDY OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE INFILTRATION PROCESS OF POROUS FRAMES TO THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON THEM

The parameters of the infiltration process of porous frameworks based on metal shavings with molten aluminum, which ensure the production of composite materials for elements of mine protection structures, were studied. The possibility of effective utilization of metalworking waste of machine-building enterprises by forming porous frameworks with a given volume of pores followed by infiltration with molten metal is considered. At the same time, it was determined that the main problem in the formation of the structure of composites is the interaction of aluminum with the iron frame, which leads to the formation of intermetallic phases, such as $FeAl_3$, which characterize the composite and reduce the mechanical properties of the material. It was established that the main technological parameter that determines the mechanical properties of the composite is the temperature regime of the infiltration process. The paper analyzes the influence of the aluminum pouring temperature and preheating of the metal frame on the formation of the structure of the composite material. It was established that the pouring temperature at the level of 800 °C and preheating of the steel frame to 300 °C provide optimal conditions for obtaining a composite with high mechanical characteristics, due to the absence of cavities in the material structure. Metallographic analysis showed a uniform distribution of the reinforcing phase in the volume of the composite and the absence of a significant number of pores, which confirms the effectiveness of the infiltration process during infiltration at a temperature of 800 °C. An increase in the pouring temperature above 800 °C leads to saturation of the melt with gases, which negatively affects the quality of the composite due to the formation of closed porosity. At the same time, to ensure the effectiveness of the infiltration process, it is recommended to carry out the process quickly using the vacuuming of the metal equipment. For the practical application of such materials, it is important to take into account their behavior during explosive loading. The results of computer modeling show that the use of such composites in mine protection structures can significantly reduce damage to the hull during an explosion, while ensuring sufficient strength and plasticity of the material. Thus, the study of the technological parameters of the process of infiltration of aluminum melts into the porous frame is an important step on the way to the creation of highly effective composite materials with high mechanical properties and economic efficiency.

Keywords: metal shavings, aluminum, composite material, flexural strength, impact toughness, strength, pouring temperature, frame temperature, machining waste recycling.

Шановні читачі

Науково-технічний журнал «Процеси лиття»

zareєстрований у категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук

До уваги читачів та передплатників!

Журнал виходить 4 рази на рік.

Для регулярного одержання журналу потрібно оформити підписку через редакцію, надіславши лист-запит на адресу редакції для оформлення **рахунку-фактури**.

Вартість одного журналу — 200 грн., передплата на рік — 800 грн.
Доступні також архівні номери журналу.

Адреса: бульвар Вернадського, 34/1
03142, Київ-142
proclit@ptima.kiev.ua