

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ШТАМПОВОГО ІНСТРУМЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОЦЕСІВ САМОРОЗПОВСЮДЖУВАЛЬНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗУ

*У статті розглядаються актуальні питання впровадження інноваційних технологій нанесення захисних і зміцнюючих покриттів на поверхні штампового інструменту із використанням методу саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС). Автори аналізують проблеми ресурсозбереження в промисловості, пов'язані з використанням дорогих легованих сплавів, та пропонують альтернативний підхід — формування покриттів із заданими властивостями, що дозволяє знизити собівартість виробництва без втрати експлуатаційних характеристик. У дослідженні окремо розглянуто вплив таких параметрів, як пористість, дисперсність компонентів, концентрація легуючих добавок, швидкість горіння, а також вплив зовнішніх чинників (температури, електричних і магнітних полів, імпульсних струмів) на якість і структуру покриттів. Значна увага приділена методам швидкої кристалізації, які дозволяють отримувати метастабільні й аморфні матеріали з унікальними властивостями, зокрема підвищеною корозійною стійкістю й питомою міцністю. Проаналізовано роль ударно-хвильового навантаження як способу створення дефектної структури підкладки, що стимулює дифузійні процеси та посилює зчеплення між основним матеріалом і покриттям. Основна мета роботи полягає у розробці та обґрунтуванні технологічних параметрів процесу СВС для отримання захисних покриттів із заданими фізико-механічними властивостями при мінімізації використання дорогих компонентів. Одержані результати можуть бути корисними для впровадження ефективних ресурсозберігаючих технологій при виготовленні штампового інструменту, а також для подальших досліджень у сфері матеріалознавства.*

**Ключові слова:** штамповий інструмент; саморозповсюджувальний високотемпературний синтез (СВС); захисні покриття; ресурсозбереження; легуючі добавки; швидка кристалізація; дифузія; ударно-хвильове навантаження; метастабільні структури.

Проблеми інноваційного розвитку виробництва в напрямку ресурсозбереження вимагають розробки та впровадження нових конструкційних матеріалів. Оскільки суттєвим фактором для впровадження таких матеріалів є певний комплекс фізичних і механічних властивостей при низькій собівартості, одним з перспективних напрямків з вирішення даного питання є нанесення температуро-, зносо- і хімічно стійких покриттів на робочих поверхнях та подальша їх експлуатація.

Зі збільшенням вмісту легуючих елементів у виробках, такі фізико-механічні характеристики, як міцність, твердість, зносостійкість зростають, але й підвищується ймовірність крихкого руйнування, збільшується вартість легованого металу. В даний час, це пояснює все зростаючий інтерес до покриттів. Необхідність застосування покриття, перш за все, обумовлена необхідними і, бажано, прогнозованими експлуатаційними властивостями. Сукупність умов експлуатації і визначає призначення покриттів, за якими вони діляться на: термостійкі, жаростійкі, ерозиційностійкі, зносостійкі, антифрикційні, корозійностійкі, ті, що відображають або поглинають різні випромінювання. Способи отримання захисних покриттів на металевих виробках розрізняються технологією нанесення покриття, і основною метою створення є задовільна адгезія з підкладкою, а також отримання суцільного, безпористого і стійкого вданому середовищі захисного шару [1].

В реаліях сьогодення явища саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) набувають все більшого розповсюдження як такі, що дозволяють регулювати склад і структуру захисних покриттів, забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики при мінімальному терміні їх формування та відносно низькій собівартості виготовлення [1–3].

Перспективи розвитку спрямування СВС при штампувальних процесах пов'язані зі створенням нових методик та обладнання; розвитком експериментальних та теоретичних досліджень з горіння сумішей термітного типу в умовах примусової фільтрації розплаву та конвективного руху у розплаві продуктів горіння; дослідження взаємодії відновлювальної та "СВС" стадій у хвилі горіння; можливістю управління складом та структурою продуктів горіння за допомогою внутрішніх та зовнішніх параметрів, впливу зовнішніх полів тощо.

Розвиток прикладних досліджень пов'язаний із створенням технологій нових матеріалів

та виробів для промисловості [4]: литої напівпровідникової кераміки, трубчастих нагрівачів, перетворювачів теплової енергії в електричну, жаростійких матеріалів та покриттів для авіаційної техніки, зносостійких покриттів на штамповому інструментові, що піддаються інтенсивному зносу, переробка промислових відходів, зокрема і радіоактивних.

Мета статті — аналіз технологічних параметрів процесу саморозповсюджувального високотемпературного синтезу для отримання захисних покриттів штампового інструменту із заданими фізико-механічними властивостями при мінімізації використання дорогих легуючих компонентів.

Основною задачею є дослідження напрямків отримання СВС-покриттів, притаманних для виготовлення штампового інструмента і іншого устаткування.

Одним з видів кінцевих продуктів високотемпературного синтезу, що самопоширюється, (СВС) є покриття різної товщини. Процес нанесення покриттів криється в наступному. На підготовлену поверхню підкладки наноситься реакційна суміш необхідного складу, піддана ущільненню за допомогою пресування прокатки [5]. Після цього здійснюються підпалювання суміші й утворення в процесі синтезу покриття на підкладці. В залежності від функціонального призначення покриття надалі, або ущільнюється, або залишається у вихідному стані. В останньому випадку покриття залишається пористим і знаходить застосування у вузлах тертя, що змазуються. У пори попадає змащення і в міру зносу і збільшення контактних напружень змащення інтенсивніше видавлюється з пір полегшуючи роботу вузла тертя.

Різновидом одержання покриття методом високотемпературного синтезу, що самопоширюється, є відцентрове СВС-лиття і метод теплового самозапалювання [2]. Відцентрове СВС-лиття застосовується для плакування внутрішніх циліндричних поверхонь і виробництва біметалічних труб. Якість і пористість покриттів у цьому випадку головним чином залежить від швидкості обертання плакованої заготовки наступне чи ущільнення допресовка покриттів не потрібні.

Нанесення зміцнюючих захисних покриттів методом теплового самозапалювання полягає в сполученні хімічних транспортних реакцій з самозаймистим процесом синтезу. Реакційна суміш розігривається до температури запалення. При цьому відбувається взаємодія між компонентами суміші з підвищенням температури у реакторі. Утворюючі газоподібні галогеніди переміщуються до поверхні виробів і в результаті обміну і диспропорціонування формують обложений шар [4]. Далі при прогріві й ізотермічній витримці підкладки і реактора активні атоми компонентів реакційної суміші починають дифундувати в підкладку. Товщина зміцненого шару в цьому випадку залежить від температури і часу витримки і звичайно складає 10–85 мкм. Пористість покриттів відповідає пористості зміцнених шарів отриманих методами хіміко-термічної обробки.

Хід реакції СВС при формуванні покриттів залежить від параметрів вихідних розрахунків, таких як розмір часток, щільність пресовки, товщини шару складу, методу ініціювання горіння суміші.

Макроструктура пресованої суміші характеризується контактним перетином, сумарним обсягом пір, загальною, відкритою і закритою пористістю; ці параметри роблять найбільш істотний вплив на швидкість поширення хвилі синтезу, а отже на процеси дифузії при формуванні СВС-покриття. Контактний перетин обумовлюється по формулі:

$$\alpha = \frac{P}{P_{HB}}; \quad (1)$$

де  $P$  – тиск пресування;

$P_{HB}$  – контактна твердість матеріалу, обумовлена шляхом екстрополяції кривих пресування до значення пористості рівної нулю.

Залежність контактного перетину від параметрів пористого тіла має вигляд:

$$\alpha = \frac{A}{p_k^2} \left( \frac{\Pi}{1-\Pi} \right)^2 - \frac{B}{p_k} \frac{\Pi}{1-\Pi} + 1; \quad (2)$$

де  $A = 20,7 \text{ м}^2/\text{див}^3$ ,  $B = 9,1 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  
 $\rho_{\text{до}}$  – щільність контактного матеріалу суміші;  
П – пористість.

Процес ущільнення порошкової суміші протікає поетапно, в першу чергу відбувається укладання часток зі стану насипки, потім деформація і дроблення. Пористість, при якій спостерігається максимальна швидкість горіння для більшості реакційних сумішей знаходиться в межах 40–50 %. Залежність має вид параболи з вираженим максимумом. Мінімальні значення швидкості горіння, при яких синтез найбільш ефективний, природно знаходяться на границі зон стійкого і хиткого горіння. При максимальному значенні пористості порядку 70 %, що досягається ущільненням і при насипній щільності 20 % СВС-продукт виходить найбільш високої якості і дифузійні процеси протікають при більш сприятливих умовах.

При малих значеннях пористості, коли частка відкритого простору велика і переважає відкрита пористість, десорбований у процесі горіння газ може вільно виходити, не руйнуючи структури покриття, що утворилося [5]. Це доцільно використовувати при створенні пористих антифрикційних покриттів.

При деформації інтенсивно зменшується обсяг вільного простору і більше закритої пористості. Зі зменшенням вихідної пористості знижується кількість десорбованого газу, що може вийти з пресовки за час руху хвилі синтезу [4]. Кількість газу, який залишився в порах пресовки росте. У зменшуваному обсязі пор вихідної пресовки різко збільшується внутрішньопоровий тиск. Він тим більше, чим менше пористість. Коли внутрішньопоровий тиск перевищить зовнішній вибір газу з пресовки, що руйнується останньою. Реакційна маса і кількість актів взаємодії зменшується. У результаті цього знижується кількість тепла, а отже знижується швидкість горіння. Тому швидкість горіння попередньо спресованої суміші знижується шляхом зменшення кількості виділюваного тепла, що виникає внаслідок зменшення реагуючої маси. Це не сприяє інтенсифікації дифузійної взаємодії компонентів суміші і продукту з підкладкою. Отже, формування СВС-покриттів найбільш доцільно робити при сильному укладанні часток реакційної суміші без підпресовки з деформацією наступних.

Товщина захисних покриттів, які наносяться різними методами знаходиться в межах від сотих часток до 3–5 мм [5]. Покриття, одержувані методом СВС надалі піддаються ущільненню різними методами деформування. Необхідність наступної деформації зв'язана з високою пористістю покриттів і тим, що процес горіння відбувається при товщинах не менш критичного діаметра горіння. Останній залежить від комплексу параметрів синтезу: початкової температури, складу суміші і температури горіння. У процесах СВС-покриттів необхідні вірогідні дані про можливість досягнення критичного діаметра  $d_{\text{кр}}$  при заданому комплексі початкових параметрів реакції. Знання їх дозволить коректно визначити розміри найбільш тонких покриттів одержаних методом СВС.

Вивчення горіння різних реакційних систем відзначене зниженням критичного діаметра зі збільшенням концентрації вуглецю в суміші. Це пов'язано з тим, що підвищення вмісту приводить до росту температури горіння, обумовленому високою екзотермічністю реакції карбідоутворення. Введення вуглецю в суміш титан-алюміній призводить до підвищення температури горіння від 1625 °С для бінарної системи до 1985 °С при  $[C] = 16 \%$ . Різке зниження  $d_{\text{кр}}$  характерне при  $[C] > 14 \%$ , що відповідає переходу температури горіння суміші через точку плавлення титану 1930 °С.

Зниження значення  $d_{\text{кр}}$  пов'язано із підвищенням початкової температури  $T_0$ . Ріст  $T_0$  спричиняє ріст рідкої фази в зоні реакції, що в свою чергу призводить до більш інтенсивного розтікання в зону прогріву. Кількісне збільшення рідиннофазної складової з ростом температури горіння пов'язано з процесом розтікання який є термічно активним.

На величину  $d_{\text{кр}}$  впливає введення в суміш легуючих елементів, що змінюють режим розтікання. Легування карбідоблагодуючими елементами (Cr, Mo, W, Zr) не обмежено розчинними в компонентах реакційної суміші приводить до перегрівання розплаву і зниженню його липкості. Процес розтікання інтенсифікується, що відповідає зниженню критичного діаметра горіння.

Найбільше зменшення  $d_{кр}$  для реакційних сумішей, що містять титан і алюміній спостерігається при введенні до складу міді. Мідь утворює з титаном, алюмінієм і інших глибоких евтектик, котрі характеризуються зниженою липкістю середовища, яке розтікається.

Введення до складу реакційної суміші кремнію сприяє підвищенню  $d_{кр}$ . Утворення глибоких евтектик компенсується утворенням тугоплавких силіцидів, що підвищують липкість розплавів, які розтікається і мають високу теплоємність.

До параметрів шихти, що роблять вплив на характер поширення хвилі синтезу і властивості кінцевого продукту відноситься дисперсність легкоплавкого компоненту [2]. Найбільш сприятливою вважається така дисперсність, коли розплав легкоплавкого пального змочує поверхню основної маси тугоплавких компонентів і відбувається зменшення реакційної поверхні. Це призводить до уповільнення швидкості поширення хвилі горіння і посиленню процесів дифузії.

Для зменшення пористості СВС-покриттів обіжно необхідно прикласти навантаження, щодо забезпечення деформування твердих тугоплавких продуктів. Одним з ефективних шляхів зменшення пористості покриттів є додаткове нагрівання, що сприяє збільшенню рідкої фази і застосуванню легкоплавких добавок.

Дуже цікавим виявляється введення добавок, що змінює параметри процесу, безпосередньо в ході синтезу [1]. Відомо, що електричні і магнітні поля значно впливають на горіння з газових і конденсованих систем. Пропущення електричного току через екзотермічні суміші металів і неметалів, а також вплив імпульсами струму і високочастотним електромагнітним полем приводять до запалення суміш. При цьому запалення реакційних сумішей відбувається при їхній товщині меншій критичного діаметра. Крім того, пропущення імпульсів струму синхронно швидкості горіння, дає можливість здійснювати процес синтезу й одержання покриттів товщиною менше  $d_{кр}$ , тобто менш 3 мм.

Як джерело імпульсів струму використовували установку ЕФІ-5. Електроіскровий вплив здійснювали вібруючим електродом, виготовленим з мідного сплаву. При іскровому розряді відбувається віднесення матеріалу електрода в шихту. У якості останньої з використовували титан марки ПТМ і графіт з дисперсністю менш 45 мкм. Суміш титана з графітом розташовували на підкладці зі сталі 20. Товщина шару шихти не перевищувала критичного діаметра. Матеріал електрода що легує СВС-складу, утворює з титаном легкоплавку евтектику [3], і сприяє підвищенню якості покриття. При розряді відбувається запалення суміші. Якщо товщина шару перевищує критичний діаметр  $d_{кр} \approx 4$  мм при  $[C] > 14$  %, процес горіння протікає стійко. При товщинах 2,5; 1,5; 1,0; 0,5 мм горіння загасає на відстані 2,4; 2,1; 1,6; 0,8 мм від центра ініціювання.

Для того, щоб процес синтезу не загасав необхідно багаторазове ініціювання, що досягається при переміщенні вібруючого електрода при застосуванні багатоелектродних систем. У цьому випадку розряд можливий в палаючу, чи у вихідну реакційну суміш, або в готовий СВС-продукт. У першому випадку відбувається оплавлення електрода, розбризкування й інтенсивне переміщення рідкого металу в розплаві. В другому - запалення реакційної суміші. У третьому - зміцнення, додаткове легування й ущільнення покриття, що утворилося; проходження імпульсів електричного струму призводить до виникнення електричної дифузії СВС-продукту в підкладку і посиленню реакції синтезу компонентів. Під електричною дифузійсю в даному випадку мається на увазі явище перерозподілу компонентів реакційної суміші і підкладки при проходженні імпульсів струму через мікроділянки фактичного взаємного контакту. Дифузія пов'язана з рухом атомів з одного вузла ґрат в іншій. Результатом підвищення температури твердого тіла є як збільшення швидкостей самодифузії що зовсім не зв'язані зі зміною концентрацій, так і дифузії атомів легуючих елементів і домішок, що можуть знаходитися в розплаві реакційної суміші.

На механізм дифузії у твердих тілах існує декілька поглядів. Основними з них є міжвузловий і міжвакансійний механізми, а також дифузія по між шляхом витиснення. Відповідно до першого з них атом дифундує, переходячи з одного міжвузла в яке небудь сусіднє, не викидаючи при цьому безупинного зсуву атомів матриці. Міжвузловий механізм дифузії діє в

сплавах, у яких розчинені атоми звичайно займають положення впровадження. В основі вакансійного механізму лежить, та відома обставина, що у всіх кристалах деякі вузли ґрати виявляються незайнятими, котрі називаються вакансіями. Якщо один із сусідніх атомів займає вакансію, то говорять, що він дифундував по вакансійному механізму. Вакансійний механізм переважає в металах і сплавах з кубічної ґранецентрованої і кубічної об'ємноцентрованої ґратами, а також у гексагональних металах, кристалах і окислах.

Механізм дифузії по міжвузільям шляхом витиснення полягає в тому, що розглянутий атом виштовхує одного зі своїх найближчих сусідів у міжвузлове і займає його місце в ґратах. Перекручування ґрат, що при цьому відбувається дуже малі. Тому переміщення такого типу відбувається відносно легко.

Оскільки дифузія відбувається шляхом послідовного переміщення окремих атомів, то для руху будь-якого атома у твердому тілі обов'язкове придбання ним визначеної енергії активації  $E$ . У будь-який даний момент енергія окремих атомів міняється в широких межах. Одні атоми приходять в активний стан тільки в результаті великого збільшення енергії, інші меншого, а деякі взагалі не вимагають додаткової активації. Усякий фактор, що сприяє збільшенню вихідної енергії атома, тим самим сприяє зменшенню тієї додаткової енергії, що необхідна для активації атома при дифузії.

Численні дослідження вітчизняних закордонних учених показують, що уявлення, яке існувало на протязі довгого часу, про металеву провідність, як провідності з електронної, не зв'язаної з переносом маси речовини провідника при проходженні по ньому струму, є уявленням що достатньо відбиває цей процес [1–5].

При визначених температурах провідних матеріалів стає можливим перенос речовини при проходженні електричного струму. Явище полягає в спрямованій міграції іонів, що утворюють кістяк кристалічних ґраток. Електропереніс речовини характерний і для досліджуваних компонентів титан-вуглець, залізо-титан-вуглець. Більш висока міцність зчеплення СВС-покривів за традиційною технологією і технології СВС-синтезу з електроіскровою обробкою свідчить про дифузійні явища імпульсів, які протікають при пропущенні струму.

Важливим фактором, посилюючим процес дифузії, є попередня деформація плакованого металу підкладки. Це зв'язано з тим, що наявність надлишкової потенційної енергії призводить до збільшення імовірності активації атомів, які знаходяться в областях з неправильною структурою, підвищуючи тим самим швидкість дифузії, що звичайно значно швидше протікає по перекручених областях границь зерен, що мають високу енергію, чим в обсязі кристалів, що характеризуються більш зробленою структурою. В цілому збільшення перекручень рівно-сильне збільшенню температури.

Найбільш ефективним методом одержання дефектної структури в металах є ударно-хвильове нагруження останніх. Дія ударної хвилі, викликає виникнення дефектів типу вакансій і дислокацій. Механізм їх появи пов'язаний з високошвидкісними деформаціями ковзання, двійникування і зрушення по атомних площинах. Зміна концентрації дефектів у процесі високошвидкісного навантаження описують співвідношенням.

$$K = K_0 \exp\left(\frac{t}{t_i}\right), \quad (3)$$

де  $K_0$  – вихідна концентрація дефектів;  $t$  – тривалість процесу;  $t_i$  – час релаксації для даного процесу.

При хвильовому навантаженні імовірніше виникнення двійникування, чим ковзання, у релаксації напруги. Двійникування проходить при напругах менших теоретичної межі міцності, однак для початку двійникування. Подальший розвиток процесу йде при менших напругах. Час утворення двійникового прошарку, що є часом релаксації двійникування, складає  $10^{-8}$  с. Збільшення швидкості деформації сприяє розвитку двійника в металах і сплавах з об'ємноцентрованими кубічними ґратками.

Двійники утворюються як при ударних, так і при вибухових навантаженнях, пов'язаних

з ударними хвилями. Зміна структури середовища при ударно-хвильовому навантаженні відбувається в три стадії. У першій стадії деформація супроводжується розвитком легкого ковзання з виходами на поверхню кристала тонких слідів рівнобіжних слідів ковзання; напруги цієї стадії є напругами переходу пружної деформації в пластичну. Друга стадія починається в момент, коли в ковзання включається більше число систем ковзання, по-різному орієнтованих стосовно прикладеної напруги: взаємодія дислокацій, пов'язана зі зменшенням довжини вільного пробігу дислокації, приводить до інтенсифікації зміцнення. Для третьої стадії характерна висока щільність дислокацій, що нагромадилися на другій стадії й утворення дефектних структур – найбільш прийнятних для зчеплення нанесеними на них покриттями. Зразки матеріалів дивіться на рис. 1.



Рис. 1. Зразки матеріалів з СВС-покриттям

У такому способі основними факторами, що визначають якість СВС-покриттів є: ступінь дисперсності більш легкоплавкого компоненту; концентрація легуючих елементів, карбідо- і силіцидоутворюючих; ступінь попередньої деформації; початкова температура запалення реакційної суміші і структура підкладки.

В останні роки найбільший інтерес виявляють до метода швидкої кристалізації, суть якого полягає в охолодженні розплавленого металу зі швидкістю порядку одного мільйона градусів за секунду. Швидко охолоджені сплави порівняно гомогенні, оскільки для утворення і росту великих зерен бракує часу. Матеріали з гомогенною структурою міцні і мають високі температури плавлення. Швидка кристалізація може викликати утворення метастабільних фаз: кристалічними аморфних, менш стійких фаз, що утворюються при повільному охолодженні. Метастабільні фази володіють рядом не тривіальних властивостей. Наприклад, алюмінієві сплави, що швидко кристалізуються, мають питому міцність, рівну чи перевищуючу міцність титанових сплавів при помірних і високих температурах. Вони також надзвичайно корозійно-стійкі. Швидкоохолоджені алюмінієві сплави здатні замінити титан у деталях компресорів газотурбінних двигунів, чавун у гальмових дисках автомобільних коліс, чавунні корпуси букс залізничних загонів і т. д.

Існують наступні методи одержання швидкоохолоджених сплавів. Найпростіший з них – надтверде загартування, при якій краплі розплавленого металу викидаються на охолодну поверхню. Інший метод - розпилення: дрібнорозпилені краплі проохолоджуються атмосферою винятково холодного інертного газу. Фірма Prant and Whitney розробила устаткування, в якому тонкий струмінь розплаву падає на швидкообертаючий диск, що розбиває її на краплі, і викидає їх у холодну атмосферу. За допомогою цього методу одержують дрібнодисперсні порошки швидкоохолодженого сплаву, що потім запресовуються шляхом гарячого пресування. General Company об'єднала плавлення, пресування і формування в єдиний процес, у якому за допомогою плазмового факела швидкоохолоджений сплав використовується як тонке покриття деталей. Охолоджений сплав добре протистоїть термічній стомленості [3].

В одному з найбільш універсальних методів швидкого охолодження використовуються лазери з високою щільністю енергії. Ці шари загартовуються шляхом контакту з холодним матеріалом, що знаходиться під ним. За допомогою цього методу досягають швидкості охолодження більш десяти мільйонів градусів за секунду. Основні переваги методу в тому, що мікроструктура поверхні металу може бути змінена без впливу на об'ємну частину. Можна одержувати і більш товсті шари швидкозагартованого металу, вирощуючи їх шляхом безупинного

нанесення на поверхню легованого порошку з одночасним впливом на нього лазером. Маніпулюючи лазерним променем, можна одержувати досить складні конфігурації.

Зроблена спроба здійснення динамічного загартовування для одержання швидкозагартованого дробу. Спосіб динамічного загартовування полягає у швидкому переході від розгону до гальмування з використанням охолоджуючого середовища для утворення метастабільних фаз.

Процес можна здійснити за схемою (рис. 2). У порожнині, утвореній у високоміцному сплаві, розташовується вибухова речовина 1 і тіло, що метається, 2. При вибуху заряду 1 середовище, що метається, 2 розганяється і при зіткненні з охолоджуваною поверхнею 3 відбуваються процеси, характерні для швидкої кристалізації.

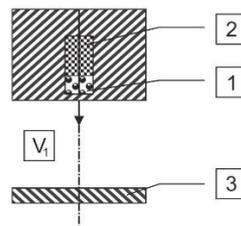


Рис. 2. Схема метання при швидкій кристалізації

Максимальний тиск, який виникає при зіткненні середовища, що метається, з твердою поверхнею, можна оцінити за формулою.

$$P = \rho_0 C_0 V (1 + kV/C_0), \quad (4)$$

де  $\rho_0$  – щільність середовища що метається, і швидкість звуку в ній,  $V$  – швидкість часток середовища, що метається;  $k$  – постійна, що характеризує збільшення швидкості хвилі при ударному стиску. Тиск, необхідний для утворення метастабільної фази, відповідає сотням кілобар і його можливо досягти при швидкостях співударяння, що перевищують у декілька разів швидкість звуку в повітрі. Досягти цього можна при використанні імпульсних джерел енергії. Задача про метання тіл продуктами вибуху в спрощеній постановці вирішена в роботах. Швидкість тіла, що метається складе:

$$V_1 = D \left[ \frac{3r}{(k^2 - 1)(3 + r)} \right]^{0,5}, \quad (5)$$

де  $k$  – показник продуктів вибуху;  $D$  – швидкість детонації;

$$r = \frac{\rho_0 \rho_1}{\delta_0 \delta_1}, \quad (6)$$

$\rho_0, \rho_1$  – густини вибухової речовини і тіла, що метається;  $\delta_0, \delta_1$  – протяжності вибухової речовини і тіла, що метається. У залежності від виду вибухової речовини і співвідношення мас вибухової речовини і тіла, що метається, швидкість  $V_1$  досягає  $2500 \text{ мс}^{-1}$ .

Швидкість спаду температури при зіткненні тіла, що метається, з поверхнею іншого матеріалу при швидкостях зтикання порядку  $1000 \text{ мс}^{-1}$  в інтервалі температур  $700\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C}$  складає до  $3,5 \cdot 10^6$  град/с. При таких градієнтах температур відбувається одержання аморфних матеріалів з розплавів. Такі параметри зіткнення характерні для процесів зварювання вибухом і ряд дослідників, що вивчають структури зони з'єднання зварених вибухом заготовок, знайшли в звареному шві включення аморфного металу. Як видно, утворення аморфних структур відбувається з розплавленого металу. Т. ч. зіткнення тіла, що метається, з підкладкою повинне приводити до розплавлення зони контакту, підданого обробці матеріалу. Під впливом деяких режимів зварювання вибухом у зонах притиснутих до звареного шва, утворюються литі включення. Останні знижують якість і міцність звареного з'єднання і вкрай не бажані. Для утворення шару з аморфного матеріалу, чи матеріалу, який володіє великою кількістю аморфних складових, режими зіткнення повинні забезпечити розплавлення приконттактних шарів

і високу швидкість охолодження. Кількість литих включень в міру збільшення швидкості детонації Д, а отже і швидкості в місці контакту. Структура зони зіткнення повинна бути хвилеподібною. При зіткненні без хвилеутворення литі включення не утворюються. Тому граничне значення швидкості і місці контакту повинне лежати в межах зони хвилеутворення. Величина зварювального зазору  $h$  і параметр зварювання  $g$  повинні відповідати максимальній швидкості зіткнення. Як правило, при таких режимах зварювання не відбувається, а утворюється аморфний шар, що володіє рядом унікальних властивостей. У такий спосіб на стику процесів зварювання вибухом і вибуховим зміцненням для ряду матеріалів можливий процес швидкої кристалізації. І цей процес, вірогідно, дає можливість одержання монометалів з поверхневою структурою і властивостями характерними для біметалів.

У процесах високотемпературного синтезу, що самопоширюється, питання фіксації проміжних продуктів при протіканні багатостадійних реакцій у хвилі СВС вирішується при швидкостях охолодження  $10^4$ – $10^5$  К/с близьких до швидкостей швидкісного загартування. У цих умовах відбувається одержання метастабільних структур і станів речовини з особливими властивостями. Необхідну швидкість охолодження можна забезпечити при використанні високошвидкісного струменя води, спрямованої перпендикулярно фронту хвилі синтезу.

### ВИСНОВКИ

У ході дослідження встановлено, що найбільш оптимальною схемою руйнування твердих сплавів для виготовлення штампового інструменту (зокрема матриць, пуансонів та інших елементів) є використання синхронізованих зарядів у двосторонньому варіанті, що дозволяє підвищити ефективність передачі детонації та покращити властивості кінцевого продукту. Параметри вихідної реакційної суміші, такі як пористість, розмір часток, концентрація легуючих елементів, а також зовнішні чинники (температура, електричні та магнітні поля, імпульси струму), мають вирішальний вплив на швидкість горіння, формування структури та рівень пористості СВС-покриттів, що критично важливо для забезпечення високої зносостійкості та міцності робочих поверхонь штампового інструменту.

Для досягнення високої якості покриттів, здатних ефективно працювати в умовах значних контактних навантажень і тертя, необхідно застосовувати додаткове ущільнення, використовувати легкоплавкі добавки або реалізовувати багаторазове ініціювання синтезу. Важливим напрямом є також використання методів швидкої кристалізації, що дозволяють отримувати метастабільні та аморфні структури з підвищеною твердістю, жаростійкістю й стійкістю до абразивного зносу, що розширює можливості їх застосування у виробництві матриць та інших штампуєчих елементів.

Крім того, ударно-хвильове навантаження ефективно створює дефектну структуру підкладки, що стимулює дифузійні процеси та забезпечує високу міцність зчеплення між покриттям і основним матеріалом, що є ключовим фактором для підвищення довговічності та працездатності штампового інструменту в умовах багаторазових циклів навантаження.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sereda B., Sheyko S., Kruglyak I., Belokon Y. Application of activation of substrate by aluminium and copper for increase of adhesive durability of sheetings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions. *10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives*. 2008, pp. 437–439.
2. Белоконов Ю. О., Кулинич В. Д., Середя Д. Б., Драгобецький В. В. Перспективи розвитку технологій та обладнання саморозповсюд-жувального високотемпературного синтезу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2021. Випуск 6(131), С. 110-116.
3. Sereda B., Zherebtsov A., Belokon Y. The processes research of structurization of titan aluminides received by SHS. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. Pittsburgh, 2009. Vol. 3, pp. 2069–2073.
4. Sereda B., Sereda D., Sereda I. Establishment of the relationship between the microstructure characteristics and the heat resistance of silicate coatings obtained under SHS conditions. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. Pittsburgh, 2017. Vol. 1, pp. 412–416. 10.7449/2017/MST\_2017\_412\_416
5. Sereda B., Sereda D. Advanced chromoaluminizing coatings for heat-resistance on composite materials under SHS. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. Pittsburgh, 2015. 1, pp. 229–232.

6. Zhongjie Pu, Jiandong Shi, Dunxu Zou, Zengyong Zhong. Microstructure and mechanical properties of TiAl-based alloy. *Journal of Materials Science & Technology*. 1993. 9, pp. 449–457.
7. Noebe R.D., Bowman R.R., Nathal M.V. Physical and mechanical metallurgy of NiAl. *NASA Technical Paper*. Washington. 1994. 44 p.
8. Appel F., Heaton Paul J. D., Oehring M. Gamma titanium aluminide alloys: *Science and Technology*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2011. 762 p. ISBN 978-3-527-31525-3.
9. Kim Y.W., Boyer R.R. Microstructure: Property relationships in titanium alloys and titanium aluminides. *Proceedings of the Symposium, Fall Meeting of the Minerals, Metals, and Materials Society, Detroit, MI, Warrendale*. 1991, p. 91

## REFERENCES

1. Sereda B., Sheyko S., Kruglyak I., Belokon Y. Application of activation of substrate by aluminium and copper for increase of adhesive durability of sheetings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions. *10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives*. 2008, pp. 437–439.
2. Y. Belokon, V. Kulynych, V. Drahobetskyi, D. Sereda, Technologies and equipment development prospects for self-propagating high-temperature synthesis (SHS), *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. Kremenichuk: KrNU. 2021. 6(131), pp. 110–116. (in Ukrainian).
3. Sereda B., Zherebtsov A., Belokon Y. The processes research of structurization of titan aluminides received by SHS. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. Pittsburgh, 2009. Vol. 3, pp. 2069–2073.
4. Sereda B., Sereda D., Sereda I. Establishment of the relationship between the microstructure characteristics and the heat resistance of silicate coatings obtained under SHS conditions. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. Pittsburgh, 2017. Vol. 1, pp. 412–416. 10.7449/2017/MST\_2017\_412\_416
5. Sereda B., Sereda D. Advanced chromoaluminizing coatings for heat-resistance on composite materials under SHS. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. Pittsburgh, 2015. 1, pp. 229–232.
6. Zhongjie Pu, Jiandong Shi, Dunxu Zou, Zengyong Zhong. Microstructure and mechanical properties of TiAl-based alloy. *Journal of Materials Science & Technology*. 1993. 9, pp. 449–457.
7. Noebe R.D., Bowman R.R., Nathal M.V. Physical and mechanical metallurgy of NiAl. *NASA Technical Paper*. Washington. 1994. 44 p.
8. Appel F., Heaton Paul J. D., Oehring M. Gamma titanium aluminide alloys: *Science and Technology*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2011. 762 p. ISBN 978-3-527-31525-3.
9. Kim Y.W., Boyer R.R. Microstructure: Property relationships in titanium alloys and titanium aluminides. *Proceedings of the Symposium, Fall Meeting of the Minerals, Metals, and Materials Society, Detroit, MI, Warrendale*. 1991, p. 91

### ***Kulynych V. Ensuring wear resistance of a stamp tool using self-propagating high-temperature synthesis processes.***

*The article considers the current issues of implementing innovative technologies for applying protective and strengthening coatings on the surface of a stamping tool using the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The authors analyze the problems of resource conservation in industry associated with the use of expensive alloyed alloys and propose an alternative approach - the formation of coatings with specified properties, which allows reducing the cost of production without losing operational characteristics. The study separately considers the influence of such parameters as porosity, dispersion of components, concentration of alloying additives, burning rate, as well as the influence of external factors (temperature, electric and magnetic fields, pulsed currents) on the quality and structure of coatings. Considerable attention is paid to rapid crystallization methods, which allow obtaining metastable and amorphous materials with unique properties, in particular increased corrosion resistance and specific strength. The role of shock wave loading as a method of creating a defective substrate structure that stimulates diffusion processes and enhances adhesion between the base material and the coating is analyzed. The main goal of the work is to develop and justify the technological parameters of the SHS process to obtain protective coatings with specified physical and mechanical properties while minimizing the use of expensive components. The results obtained may be useful for the implementation of effective resource-saving technologies in the manufacture of stamping tools, as well as for further research in the field of materials science.*

**Keywords:** stamping tool; self-propagating high-temperature synthesis (SHS); protective coatings; resource conservation; alloying additives; rapid solidification; diffusion; shock-wave loading; metastable structures.

**Кулинич Вікторія** – канд. техн. наук, докторантка КрНУ.

**Kulynych Viktoriia** – Candidate of Technical Science, Doctoral Student KrNU.

E-mail: [vikulsija@gmail.com](mailto:vikulsija@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4303-7124>

КрНУ – Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Кременчук.

KrNU – Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenichuk.

*Стаття надійшла до редакції 12.07.25 р.*