

УДК 532.135

Ю.О. Белоконь*Запорізька державна інженерна академія***МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ І РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗУ ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ СВС-ПРЕСУВАННЯ**

У роботі розглянуто вплив напружено-деформованого стану на формування структури і властивостей γ -TiAl сплавів, отриманих в умовах СВС-пресування, за допомогою комп'ютерного моделювання в програмі Deform. Процес екструзії прутка характеризується напруженою всібічною стисненням, що забезпечує γ -TiAl сплави найкращі в даних умовах пластичні властивості. Показано, що високотемпературний синтез інтерметалідних з'єднань γ -TiAl в порошковій суміші чистих елементів в умовах СВС-пресування дозволяє отримати інтерметалідний сплав із середнім розміром зерна ~ 30 мкм.

Ключові слова: моделювання, інтерметалідний сплав, СВС-пресування, екструзія, розмір зерна

Ю.А. Белоконь**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ СВС-ПРЕССОВАНИЕ**

В работе рассмотрено влияние напряженно-деформированного состояния на формирование структуры и свойств γ -TiAl сплавов, полученных в условиях СВС-прессования, с помощью компьютерного моделирования в программе Deform. Процесс экструзии прутка характеризуется напряжением всестороннего сжатия, что обеспечивает γ -TiAl сплавам наилучшие в данных условиях пластические свойства. Показано, что высокотемпературный синтез интерметаллидного соединения γ -TiAl в порошковой смеси чистых элементов в условиях СВС-прессования позволяет получить интерметаллидный сплав со средним размером зерна ~ 30 мкм.

Ключевые слова: моделирование, интерметаллидные сплавы, СВС-прессование, экструзия, размер зерна

Y. Belokon'**THE MODELING OF DEFORMATION AND RHEOLOGICAL PARAMETERS SYNTHESIS OF INTERMETALLIC ALLOYS IN SHS-PRESSING**

The paper considers the influence of the stress-strain state of the formation structure and properties of γ -TiAl alloys obtained under SHS-pressing, with the help of computer modeling program Deform. The process of extrusion rods is characterized by uniform compression stress, which provides γ -TiAl alloys best in these conditions plastic properties. It was shown that high-temperature synthesis intermetallic γ -TiAl compounds in the powder mixture in a pure elements SHS intermetallic compression allows to obtain an alloy having an average grain size of about 30 microns.

Keywords: modeling, intermetallic alloys, SHS-pressing, extrusion, grain size

Постановка проблеми. Одним з найбільш перспективних напрямів в області одержання нових композиційних матеріалів з високим рівнем експлуатаційних характеристик є створення інтерметалідних з'єднань на основі алюмінідів титану. Висока температура плавлення, низька щільність ($3,8 \text{ г/см}^3$) порівняно із суперсплавами ($8,0 \text{ г/см}^3$), висока жаростійкість і жароміцність алюмінідів титану створює сприятливі перспективи для застосування в авіакосмічній техніці й енергетиці, а саме при виготовленні газових турбін і компресорних станцій, а також як базових конструкційних матеріалів для створення авіадвигунів нового покоління. Не дивлячись на вищезазначені переваги, алюмініди титану на сьогоднішній день не вийшли на рівень масового промислового застосування. Це обумовлено низькою пластичністю зазначених матеріалів за нормальної температури та високими затратними існуючими технологіями їх виготовлення. Тому розробка нових технологій для одержання інтерметалідних сплавів з підвищеними фізичними властивостями, що працюють в агресивних умовах є актуальною темою досліджень [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сформульована вище проблема отримання і пресування порошкових матеріалів на основі Ti-Al дозволило сформулювати основні напрямки і завдання, вирішенню яких і присвячена дана робота. На даний час науковці різних країн опублікували ряд наукових робіт, які зводяться до розробки нових і розвитку існуючих реологічних моделей деформованих порошкових тіл, розробки математичних моделей, теоретичного та експериментального дослідження процесів теплообміну і пластичного деформування при пресуванні гарячих продуктів СВС. Основний напрямок досліджень в області СВС-пресування пов'язаний з розробкою принципово нових матеріалів з часто унікальними спеціальними або багатofункціональними властивостями. Значний успіх у цьому напрямку забезпечили роботи основоположника СВС-процесу академіка О.Г. Мержанова (Інститут структурної макрокінетики і проблем матеріалознавства). Також серед зарубіжних вчених слід відзначити роботи І.П. Боровинської, Є.А. Левашова (Росія) [2, 3], М. Коїдзумі, Е. Міямото

(Японія) [4], І.К. Ла Салвея, М.А. Мейерса (США), Б. Лю, Ю. Чен та ін. (Китай). В Україні, на даний час, число наукових робіт з СВС-пресування матеріалів різного призначення становить лише кілька десятків. Протягом 2000-2015 років більшістю дослідників (ІСМАН, ІПСМ, РФ та GKSS, Німеччина) було визнано, що для забезпечення необхідного поєднання властивостей Ti-Al сплавів – високої жароміцності, пластичності і в'язкості руйнування, необхідно мати рівноосну зернисту структуру з малим розміром зерен ($d = 30...50$ мкм). Зменшення розміру зерен шляхом термомеханічної обробки до рівня $d \approx 10$ мкм веде до подальшого підвищення пластичності при кімнатній температурі, але при цьому відбувається зсув температури крихко-в'язкого переходу (ХВП) з ≈ 800 до $600...700$ °С і відповідне зниження температури потенційного використання γ -TiAl сплавів. Тому проблема подрібнення структури злитків γ -TiAl сплавів є ключовою, оскільки тільки через досягнення однорідної структури з відносно малим розміром зерен у злитку можна розраховувати на поліпшення технологічних властивостей. Як відзначають провідні вчені в галузі отримання γ -TiAl сплавів В.М. Імаєв [1] та Г. Клеменс [5], СВС-технологія може бути з практичної точки зору дуже перспективною, оскільки γ -TiAl сплави належать до важкодеформуємих і низькотехнологічних матеріалів.

Мета роботи – дослідження впливу напружено-деформованого стану на формування структури і властивостей γ -TiAl сплавів, отриманих в умовах СВС- пресування.

Основні результати досліджень. На основі результатів розглянутих вище робіт [1-7] і отриманих раніше власних результатів вивчення процесів СВС-пресування [7], зроблено спробу встановити основні закономірності деформації і структуроутворення, визначити шляхи і способи управління процесами формування структури і властивостей спресованих виробів в умовах СВС. Для вирішення проблеми використано метод математичного моделювання, при реалізації якого умовно можна виділити наступні основні етапи: ідеалізація внутрішніх властивостей заданого процесу (об'єкта) і зовнішніх впливів (побудова фізичної моделі); математичне формулювання поведінки фізичної моделі (побудова математичної моделі); вибір методу дослідження математичної моделі і проведення цього дослідження; аналіз отриманого математичного результату.

Для математичного опису процесу екструзії продукту високотемпературного синтезу необхідно визначити систему рівнянь, що враховує розподіл термодинамічних і реологічних властивостей продукту синтезу в прес-формі і калібрі. Вважаючи, що екструзія відбувається в умовах одностороннього стиснення продукту синтезу при відсутності тертя на стінках прес-форми, можна записати вихідні рівняння:

1. Рівняння нерозривності [6]:

$$\frac{\partial(\rho\rho_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\rho_1V)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

2. Рівняння руху [6]:

$$\rho\rho_1\left(\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial z}\right) = \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2)$$

з реологічними співвідношеннями

$$\sigma_{zz} = \left(\frac{4}{3}\mu + \xi\right)\frac{\partial V}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \left(-\frac{2}{3}\mu + \xi\right)\frac{\partial V}{\partial z}. \quad (4)$$

де ρ – відносна щільність, ρ_1 – щільність конденсованої фази, t – час, V – швидкість в'язкої течії, z – осьова координата, σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} – радіальне, тангенціальне і осьове напруги, μ , ξ – зсувна і об'ємна в'язкості.

Залежність зсувної і об'ємної в'язкості продукту синтезу від його щільності має вид [6]:

$$\mu(\rho) = \mu_1\rho^m, \quad \xi(\rho) = \frac{4}{3}\mu(\rho)\frac{\rho}{1-\rho}, \quad (5)$$

де $\mu_1 = \mu_0 \exp(U/RT)$ – в'язкість нестискаючої основи матеріалу, μ_0 , U – фізичні константи, R – універсальна газова постійна, T – температура суміші, m – показник ступеня.

3. Рівняння теплопровідності [7]:

$$c_1 \rho \rho_1 \left[\frac{\partial(\rho T_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V T_i)}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\rho) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right] + \rho \rho_1 Q \frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{2\chi_i}{r_i} (T_i - T_0), \quad (6)$$

де T_i – температура матеріалу в матриці ($i = 1$) і в калібрі ($i = 2$), $\lambda(\rho)$ – залежність від щільності теплопровідності матеріалу, χ_i – ефективний коефіцієнт теплопередачі, r_i – радіус перерізу матриці і калібру, $c_1 = (1 - \alpha)c_s + \alpha c_{TiAl}$ – теплоємність конденсованої фази; $c_s = c_{Ti}c_0 + c_{Al}(1 - c_0)$ – теплоємність вихідної суміші, Q – тепловий ефект реакції утворення інтерметаліду TiAl, T_0 – початкова температура.

Використовуючи рівняння (1) і співвідношення (2), (3), зміну щільності реагуючих в прес-формі порошкової системи можна записати у вигляді [6]:

$$\frac{\partial(\rho \rho_1)}{\partial t} = \frac{\rho \rho_1 N}{4/3 \mu + \xi} \quad (7)$$

де N – величина прикладеного тиску.

А рівняння теплового балансу продукту синтезу, з урахуванням ряду припущень, може прийняти такий вид [6, 7]:

$$c_1 \rho \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \rho \rho_1 Q_{TiAl} \frac{\partial \alpha}{\partial t} - \chi_1 \frac{S}{V} (T - T_0), \quad (8)$$

де S – загальна площа внутрішньої поверхні прес-форми, V – об'єм прес-форми

Рівняння (7) та (8) дозволяють провести кількісну оцінку параметрів процесу СВС-пресування синтезованого під тиском інтерметалічного з'єднання. Процес формування структури в синтезованому під тиском продукті розглядається в припущенні, що початковий розмір зерна відповідає розміру початкових частинок тугоплавкого компонента (титану), тобто $D_0 = D_{Ti}$ (D_{Ti} – діаметр частинки титану).

Кінетика росту зерен в результаті рекристалізації синтезованого інтерметалідного продукту оцінюється з рівняння [6]:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{K(T_1)}{D^h}, \quad (9)$$

де D – початковий розмір (діаметр) зерна, $K = k_0 \exp(-E_a/RT)$ – залежить від температури константа, k_0 – предекспонента, E_a – енергія активації росту зерна, h – показник ступеня, за величиною близький до 1.

Величина деформації синтезованого продукту при екструзії визначається з рівняння:

$$\varepsilon = \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_1^2}. \quad (10)$$

Залежність розміру зерна синтезованого продукту від ступеня його деформації при екструзії описується емпіричним співвідношенням [6]:

$$D_\varepsilon = \frac{D}{\sqrt[3]{A \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} \right)^2}}, \quad (11)$$

де $\varepsilon_{кр}$ – ступінь деформації, при якому відбувається утворення зародку рекристалізації ($\varepsilon_{кр} \approx 0,1$), A – коефіцієнт форми перетину початкового зерна ($4\pi/3 < A < 6$).

Кількісну оцінку розміру зерна в інтерметалічному продукті синтезу після екструзії можна провести, скориставшись рівнянням теплового балансу (8) і провівши в (9) заміну похідної за часом на похідну по температурі. Таким чином, провівши необхідні перетворення, для кінцевого розміру зерна інтерметалідного продукту при СВС-пресуванні можна записати [6]:

$$D_k = \sqrt{D_\varepsilon^2 + \frac{c \rho_0 \rho_c r_2 R T_{ad}^2}{\chi_2 E_a (T_{ad} - T_0)} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{ad}}\right)}. \quad (12)$$

З рівняння (12) видно, що кінцевий розмір зерна в продукті СВС-пресування залежить від розміру зерна синтезованого в прес-формі продукту D_0 , ступеня деформації ε синтезованого продукту при екструзії через калібр, адиабатичній температури синтезу екструдованого продукту

T_{ad} і швидкості його охолодження (залежить від температури прес-форми T_0 , радіусу його поперечного перерізу r_2 і коефіцієнта теплообміну χ_2 синтезованого продукту зі стінками прес-форми).

Комп'ютерне моделювання процесів гарячої деформації інтерметалідних γ -TiAl сплавів виконано з використанням програмного комплексу Deform. Програма Deform - потужна система моделювання технологічних процесів, призначена для аналізу тривимірної поведінки металу при різних процесах обробки тиском. Програма заснована на методі кінцевих елементів, одному з найвідоміших, надійних і вживаних в даний час розрахункових методів. Автоматичний сітковий генератор дозволяє будувати оптимізовану кінцево-елементну сітку, згущаючи її в найбільш критичних зонах. Крім того, програма надає важливу інформацію про перебіг матеріалу і розподілі температур під час процесу деформування, дозволяє моделювати повний перелік процесів обробки тиском і вирішувати завдання деформування і теплопередачі. При вирішенні термо-деформаційної задачі пресування γ -TiAl сплавів в програму Deform були інтегровані наступні вихідні дані: $H_0 = 50$ мм, $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 15$ мм (рис. 1, а), $T_{ad}(TiAl) = 1654$ К, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 0,6$, $\rho_{Ti} = 4540$ кг/м³, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м³, $\mu = 0,14$, $\rho_{TiAl} = 3800$ кг/м³, $c_{Ti} = 540$ Дж/кг·К, $c_{Al} = 929,5$ Дж/кг·К, $c_{TiAl} = 600$ Дж/кг·К, $Q_{TiAl} = 8,1 \cdot 10^3$ кДж/кг, $E_a(TiAl) = 25$ кДж/моль, $D_{Ti} = 100$ мкм.

Результати моделювання напружено-деформованого стану TiAl сплавів представлені на рис. 1, в, г. Процес екструзії характеризується напругою всебічного стиснення, що забезпечує матеріалу найкращі в даних умовах пластичні властивості. Під впливом стискаючих напруг матеріал тече в напрямку найбільшого градієнта напружень – від поверхні пуансона, де вони мають максимальну величину, до калібру матриці (рис 1, б), де на вільній поверхні витикаючого матеріалу нормальні напруження дорівнюють нулю. Всебічне нерівномірне стиснення забезпечує матеріалу найбільш високу пластичність у порівнянні з іншими процесами обробки металу тиском, проте ця особливість процесу проявляється в умовах вкрай нерівномірних деформацій. В цьому випадку не завжди в повному об'ємі деформованого матеріалу діють тільки стискаючі напруги, безперервно зменшуються в напрямку екструзії від максимальних значень до нуля. Наявність різниці перетинів контейнеру і калібру матриці, сил контактної тертя і інших факторів призводить до того, що частинки матеріалу починають рухатися не тільки в напрямках найбільшої деформації, але і в поперечних напрямках. Останнє сприяє виникненню місцевих (додаткових) напружень, за величиною різних, напрямку і знаку, і появи розтягуючих напруг. Цьому сприяють переміщення частинок матеріалу по траєкторіях різної довжини зі швидкістю, зміною в процесі проходження їх через різні зони.

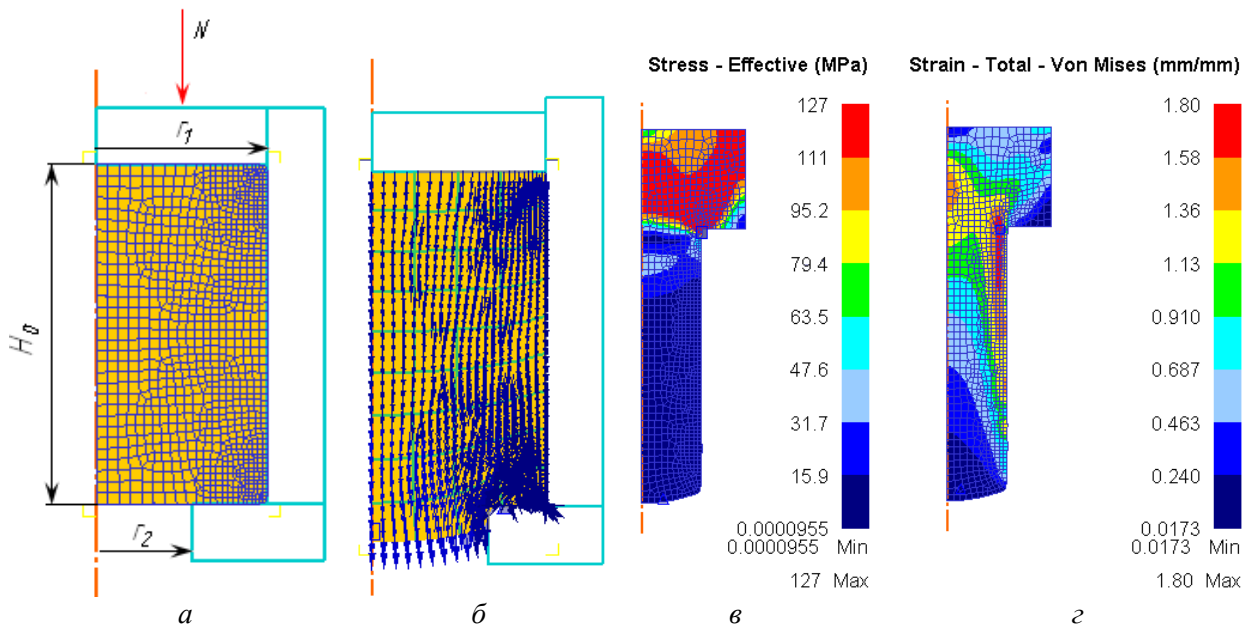


Рис.1. Моделювання процесу СВС-пресування інтерметалідного TiAl сплаву в програмі Deform: а - вихідна заготовка для розрахунку, б - напрямок тічії металу в заготівлі, в - картина розподілу інтенсивності напружень, г - інтенсивності деформацій

В умовах синхронізації теплових процесів СВС і динамічного компактування продукту синтезу можливо отримання компактного інтерметалідного сплаву з високодисперсною структурою, розмір зерен в якому значно менше, ніж у сплавах, отриманих методами лиття, спікання або ударно-хвильової дії на синтезований продукт. Подрібнення зерна інтерметалідного сплаву в процесі його синтезу під тиском відбувається в результаті пластичної деформації продукту синтезу і високих швидкостей охолодження (рис. 2). Високотемпературний синтез інтерметалідного з'єднання γ -TiAl в порошковій суміші чистих елементів в умовах СВС-пресування при тепловому вибуху при мінімальному зовнішньому тиску на суміш дозволяє отримати інтерметалідний продукт синтезу із середнім розміром зерна ~ 30 мкм. Збільшення ступеня пластичної деформації синтезованого під тиском інтерметалідного продукту в умовах СВС-пресування дозволяє на порядок знизити розмір зерна в кінцевому продукті і навіть сформувати в інтерметалідному сплаві субмікросталічну зернисту структуру.

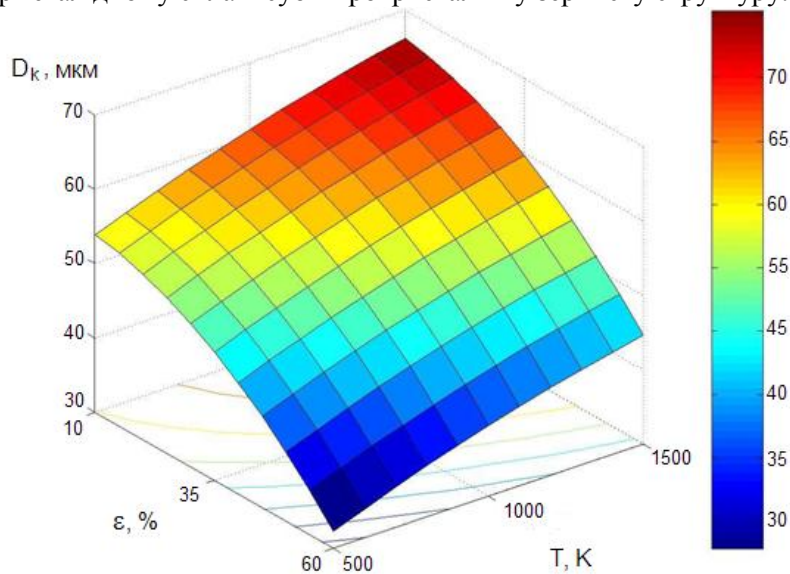


Рис. 2. Залежність розміру зерна інтерметаліду TiAl від ступеня і температури деформації в процесі СВС-пресування

Висновок. Запропоновано і реалізовано математичну модель, спрямовану на отримання γ -TiAl сплавів з заданою структурою і властивостями, заснована на використанні даних про особливості фізичного моделювання процесу СВС-пресування і програмного комплексу DEFORM. Високотемпературний синтез інтерметалідного з'єднання γ -TiAl в порошковій суміші чистих елементів в умовах СВС-пресування дозволяє отримати інтерметалідний сплав із середнім розміром зерна ~ 30 мкм.

Список використаних джерел:

1. Имаев, В.М. Современное состояние исследований и перспективы развития технологий интерметаллидных γ -TiAl сплавов / В.М. Имаев, Р.М. Имаев, Т.И. Оленева // Письма о материалах. – 2011. – Т.1. – С. 25-31.
2. Амосов, А.П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов [Текст]: учеб. пособ. / А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов; под ред. В.Н. Анциферова. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 567 с. – ISBN 978-5-94275-360-3.
3. Левашов, Е.А. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е.А. Левашов, А.С. Рогачев, В.И. Юхвид, И.П. Боровинская. – М.: БИНОМ, 1999. – 176 с. – ISBN 5-7989-0126-2.
4. Miyamoto, Y. High-pressure Self-combustion Sintering for Ceramics / Y. Miyamoto, M. Koizumi, O. Yamada // J. Am. Ceram. Soc. – 1984. – V. 67. – № 11. – P. 224-227.
5. Enhancement of creep properties and microstructural stability of intermetallic β -solidifying γ -TiAl based alloys / [M. Kastenhuber](#), [B. Rashkova](#), [H. Clemens](#), [S. Mayer](#) // Intermetallics. – 2015. – №63. – P. 19-26.
6. Овчаренко, В.Е. Эволюция зеренной структуры при экструзии интерметаллического соединения Ni₃Al в процессе высокотемпературного синтеза под давлением. I Математическая модель / В.Е. Овчаренко, О.В. Лапшин // Физика и химия обработки материалов. – 2007. - №3. – С.76-83.
7. Sereda, B. The Modeling of Products Pressing in SHS-Systems / B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon' [et al.] // Material Science & Technology. – Pittsburg, USA. – 2008. – Vol. 2. – P. 827-831.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2016.