

СИНТЕЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СВС-ЛИТЬЯ

Клубович В. В., Рубаник В. В., Самолетов В. Г.

ГНУ «Институт технической акустики», Витебск, Беларусь

Введение

Комбинирование различных веществ остается одним из основных способов создания новых материалов. В большинстве случаев компоненты композиции различны по геометрическому признаку. Один из компонентов, обладающий непрерывностью по всему объему, является матрицей; компонент прерывный, разделенный в объеме композиции, считается усиливающим или армирующим. В таких материалах при нагружении всю нагрузку воспринимает пластичная матрица, а нерастворимые дисперсные частицы второй фазы затрудняют движение дислокаций, упрочняя материал. Подобная структура материала повышает не только прочность, но и улучшает его стойкость к износу. Причина состоит в том, что при трении наиболее интенсивному разрушению подвергается менее прочная матрица, в результате чего на поверхности образуются своеобразные карманы, которые при сухом трении значительно ограничивают присутствие абразива и продуктов износа в зоне трения, а при трении со смазкой увеличивают маслосъемкость поверхности, что и приводит к повышению износоустойчивости [1]. Примером такого материала могут служить различные инструментальные и износоустойчивые стали. Пластичной матрицей в них является чистое или легированное железо, а упрочняющими дисперсными частицами – карбиды, бориды, нитриды или другие высокопрочные тугоплавкие частицы. Традиционные технологические процессы получения изделий из этих сталей состоят из 6–8 стадий, для каждой из которых требуется соответствующее оборудование и энергетические затраты. Метод СВС позволяет существенно сократить путь от руды до готового изделия. Исходные реагенты в процессе СВС претерпевают несколько превращений, непрерывно переходя из одного состояния в другое.

В основу СВС положен принцип максимального использования химической энергии реагирующих веществ для получения соединений, материалов и изделий различного функционального назначения. В качестве реагирующих веществ используют смеси металлов с неметаллами, металлов с металлами, неметаллов с неметаллами, или их соединения, способные при взаимодействии выделять большое количество тепла. СВС-продуктами являются соединения различных классов.

В современном понимании СВС включает в себя не только твердофазное горение, но и другие реакции, для которых характерно лишь то, что это – экзотермическое взаимодействие с отчетливо выраженным фронтом горения и возможностью регулирования условий его распространения. Реагенты в СВС процессах используются в виде тонкодисперсных порошков, тонких пленок, жидкостей и газов. Наиболее распространены два типа систем: смеси порошков (спрессованные или насыпной плотности) и гибридные системы газ-порошок (или спрессованный агломерат).

Обзор литературы

Процесс горения в смеси кристаллических порошков описывается системой уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) - U_{\text{ср}} \frac{dT}{dx} + Q\Phi = 0, \\ \Phi - U \frac{d\eta}{dx} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

Граничные условия:

$$x \rightarrow -\infty, \quad T = T_0, \quad \eta = \eta_0 = 0, \quad \frac{dT}{dx} = 0,$$

$$x \rightarrow +\infty, \quad T = T_p, \quad \eta = \eta_p = 1, \quad \frac{dT}{dx} = 0,$$

где T – температура (К), λ – коэффициент теплопроводности среды ($\text{Дж} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), c – удельная теплоемкость среды ($\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), ρ – плотность среды ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$), U – скорость распространения волны горения ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$), Φ – кинетическая функция (с^{-1}), Q – тепловой эффект реакции ($\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3}$), η – безразмерная величина, выражающая степень превращения

реагентов в продукты реакции $\eta = \frac{m_p}{m_R + m_p}$; m_p – масса продуктов реакции (кг),

m_R – масса реагентов (кг), T_0 , T_p , η_0 , η_p – температура и степень превращения до реакции и после нее, соответственно. Решение этой системы уравнений имеет вид

$$U = \sqrt{\frac{2\lambda K_p z}{Q(T_p - T_0)} \left(\frac{RT_p^2}{E} \right)^{z+1} \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right)}, \quad (2)$$

где z – порядок химической реакции (без разм.), K_p – предэкспоненциальный множитель, пропорциональный вероятной частоте столкновений молекул (с^{-1}), E – энергия активации ($\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$), R – молярная газовая постоянная ($\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$).

Приведенная здесь модель первоначально предназначалась для описания процессов горения в газах, но ее часто применяют и для описания горения различных, в том числе, и гетерогенных систем, используя соответствующую формулу для кинетической функции Φ [3]. В условиях центробежных перегрузок скорость горения значительно возрастает, и нами предложена математическая модель, позволяющая делать количественные оценки этой зависимости [4].

Функционально градиентные материалы (ФГМ), то есть композиты с пространственным градиентом состава, такие как металлокерамические композиты, имеющие градиент плотности распределения керамических частиц в металлической матрице – предмет особого интереса. Такие материалы являются износостойкими и термостойкими в области, где высока концентрация керамических частиц, и имеют высокую прочность и пластичность там, где высока концентрация металла. ФГМ уже получали ранее разными способами, в том числе, и синтезом горением [5], но готовое изделие имело ступенчато изменяющийся состав вдоль направления прессования, поэтому при термических и механических нагрузках между слоями возникали растягивающие напряжения, и изделие разрушалось. Если градиент возникает в результате действия центробежной силы на компоненты расплава, имеющие различный удельный вес, то состав изменяется плавно, и растягивающие напряжения не возникают. В работе [6] впервые было указано на то, что СВС-процесс в условиях центробежных перегрузок можно использовать для получения ФГМ. Центробежные перегрузки заметно влияют также и на микроструктуру полученного металла: с увеличением перегрузки происходит измельчение зерна [7].

Экспериментальные результаты и обсуждение

Поэтому представляет интерес исследование возможности создания износостойкого материала с использованием СВС-металлургии или СВС-технологии высокотемпературных сплавов. Суть метода состоит в том, что на первой стадии происходит восстановление металлов из окислов другим металлом (металлотермическая стадия), а затем восстановленные металлы вступают в реакцию с неметаллическими компонентами шихты, образуя твердые тугоплавкие соединения (стадия синтеза). В отличие от ранее исследованных однородных металлических расплавов, в нашем случае, кроме жидкой металлической связки Fe-Cr-Ni с высокой плотностью $\rho \approx 8 \text{ г/см}^3$, присутствовали твердые тугоплавкие карбиды (Cr + Ti)C, которые имеют плотность $\rho \approx 6-7 \text{ г/см}^3$. Поэтому при высоких перегрузках более легкие карбиды начинают всплывать на поверхность металлической фазы.

На рис. 1 показано распределение элементов по глубине слоя состава (проценты по массе): 5%С, 15%Cr, 10%Ni, 10%Ti, остальное – железо, наплавленное на основу из стали ВСт3 при 400-кратной перегрузке в центрифуге [8]. Образец исследовали на сканирующем электронном микроскопе с микрозондовым анализатором. На графике видно, что в поверхностном слое до 5 миллиметров концентрация титана (значит, и карбида титана) в 10–15 раз выше, чем в глубине, а с глубины 10 мм начинается материал основы, и в области шва сплав имеет промежуточный состав. На рис. 2 показано электронное изображение участка шва этого наплавленного образца. Т.е. синтезированный материал имеет градиент концентрации карбидов. Вполне возможно, что такой материал будет обладать преимуществом над однородными материалами.

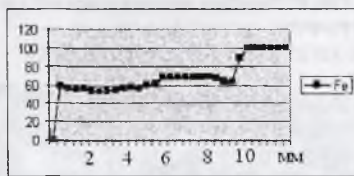
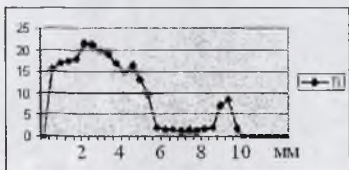


Рис. 1. Распределение титана и железа по глубине в образце с наплавкой.

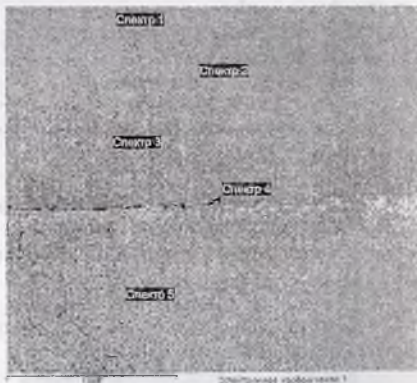


Рис. 2. Переходная зона наплавленного образца.

Было опробовано также упрочнение сплава Fe-Cr-Ni боридами титана. Для этого в исходную шихту добавили 5% порошка TiB_2 и отлили слиток диаметром 28 мм при такой же перегрузке. Полученный материал обладает высокой твердостью и износостойкостью в литом состоянии. Кроме того, в нем также наблюдается (рис. 3) градиент распределения титана (или диборида титана). Ценность проведенных исследований состоит в том, что синтез материала можно совместить в одном процессе с литьем гото-

вого изделия. При этом необходимый комплекс свойств изделия можно получить, подбирая параметры шихты и внешнего воздействия.

Раннее проведенное исследование структурообразования при СВС-литье [9] позволяет сделать вывод, что равновесное распределение тугоплавких частиц по глубине слитка подчиняется экспоненциальному закону, однако такое равновесное состояние в СВС-процессах достигается редко, но тенденция на приведенных рисунках (рис. 1 и 3) видна хорошо.

Металлографические структуры образцов, легированных титаном и бором и отлитых в центрифуге, показаны на рисунках 4 и 5. Для всех образцов структура верхней кромки формируется с образованием эвтектики (рис. 4), в которой присутствуют крупные карбидные включения. Мелкие и средние карбидные включения по данным микрозондового анализа (рис. 1) в этой зоне имеют более высокую концентрацию, чем в глубине. То есть, в образцах наблюдается неоднородность распределения карбидов, содержащих титан и имеющих меньшую плотность, чем металлическая матрица.

На рис. 5 показана структура сплава, содержащего около 5% TiB_2 . Такая структура не встречалась в слитках другого состава. Анализ микроструктуры образцов из стали ВСт3 с СВС-наплавкой (рис. 6), полученных в центрифуге показал, что в результате подплавления основы переходная зона имеет промежуточную структуру.

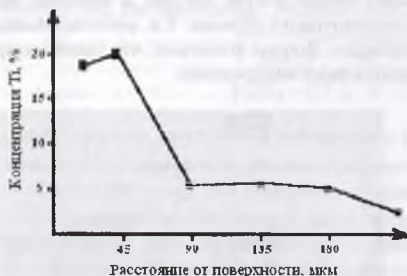


Рис. 3. Распределение титана в слитке состава 3%С, 12%Сr, 5%Ni, 5% TiB_2

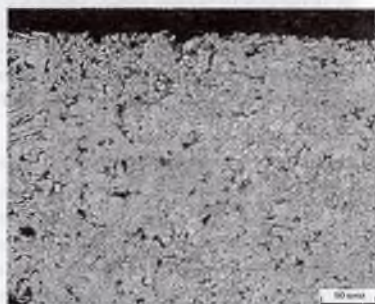


Рис. 4. Структура эвтектик в верхней части отливок.

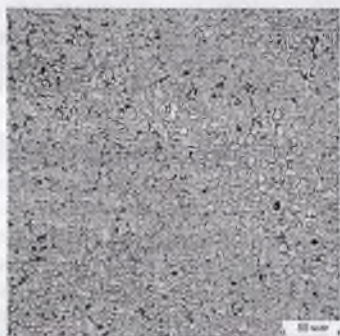


Рис. 5. Структура слитка, легированного бором.

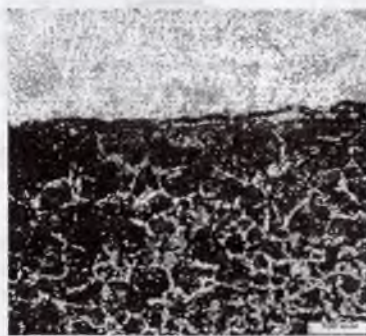


Рис. 6. Структура наплавленного слоя и переходной зоны.

Выводы

Разработан ряд составов износостойкого материала и технология получения из него слитков и изделий методом СВС-литья, в том числе, и с градиентом концентрации упрочняющих частиц.

Список литературы

1. Горячева, И.Г. Контактные задачи в трибологии / И.Г.Горячева, М.Н. Добычин – Москва: Машиностроение, 1988. – 132 с.
2. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А. Теория теплового распространения пламени. // Ж. физ. химии, 1938 г. Т. 12, № 1, С. 100-105.
3. Мерджанов А.Г. Новые элементарные модели горения второго рода. // Доклады АН СССР, 1977, Т. 233, № 5, С. 1133-1136.
4. Клубович В.В., Кулак М.М., Самолетов В.Г. Особенности структурообразования при СВС в плавящихся конденсированных смесях при воздействии центробежной силы // Литье и металлургия, 2007, № 1, с. 154-157.
5. Hirano T., Second Symposium for Functionally Gradient Materials, Jul. 1, 1988, Tokyo, The FGM Research Society, Kino Zairyo 8:15 (1988).
6. Lai W., Munir Z.A., McCoy B.J., Risbud S.H. Centrifugally-assisted combustion synthesis of functionally-graded materials // Scripta Materialia, 1997, Vol. 36, №3, P.331-334.
7. Yukhvid V. I., Vishnyakova G.A., Sylyakov S.L., Sanin V.N., Kachin A.R. Structural Macrokinetics of Alumotermic SHS Processes // Int. J. SHS, 1996, V.1, № 3, P.93-105.
8. Пат. 2889 ВУ, МПК В22D 13/06. Устройство для центробежного литья металлоизделий и наплавки покрытий / Клубович В.В., Кулак М.М., Самолетов В.Г.; № U 20050826, Заявл. 22.12.2005 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь, 2006, №3(50), С.166.
9. Клубович В.В., Кулак М.М., Платонов Л.Л., Румянцова И.Н., Самолетов В.Г. Получение материалов с градиентным распределением упрочняющих частиц методом СВС-литья // Весті Нацыянальнай Акадэміі Навук Беларусі, серыя фіз.-тэхн. навук, 2006, №3, С. 11-16.

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЯ И СПЛАВА НА ЕГО ОСНОВЕ

Бетехтин В. И., Кадомцев А. Г., Нарыкова М. В., Амосова О. В.,
Скленичка В.*, Саксл И.**.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
**Institute of Physics of Materials Academy of Sciences of Czech Republic CZ-61662 Brno,*
Czech Republic

***Mathematical Institute Academy of Sciences of Czech Republic CZ-11567 Praha, Czech Republic*

Высокие механические свойства ультракристаллических материалов стимулируют исследование структурных особенностей, влияющих на формирование этих свойств. В данной работе изучалось влияние интенсивной пластической деформации при ранно-канальном угловом (РКУ) прессовании на дефектную структуру и механические свойства Al (99,99%) и сплава Al+0,2%Sc. Исходные заготовки, имевшие прямоугольное