

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СТРУКТУРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОКСИДНОЛЕГИРОВАННЫХ СВС – МЕТАЛЛОКОМПОЗИТОВ**

**В. Ю. Костыря\***, д.т.н., **Ю. Н. Ушаков\*\***, **А. В. Марусов\***,  
**Т. П. Карпова\*\***, **Д. Н. Берелет\*\***

*\*Лицей с усиленной военно-физической подготовкой*

*\*\*Национальная металлургическая академия Украины*

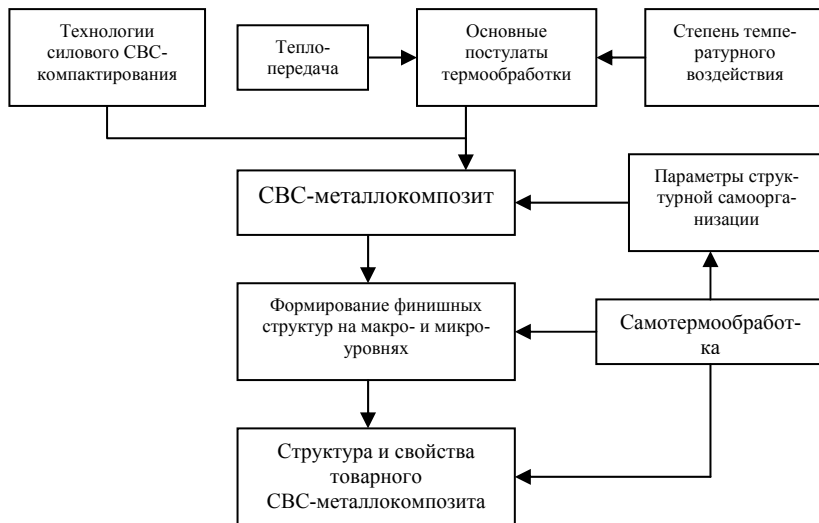
*Памяти УЧИТЕЛЯ  
Ивана Егоровича Долженкова  
посвящается*

Само по себе протекание твердофазных СВС-реакций в мультифазных системах связано с действием ряда металлургических процессов, стимулируемых температурой синтеза и характером остывания компакта. И именно эти процессы определяют морфологию структуры синтезируемых материалов как во время, так и после силового компактирования. Начиная от локального разогрева поджигового участка шихты, протекания СВС-структурообразования и до последующего остывания компакта, его структурные ингредиенты подвергаются интенсивному воздействию высоких температур – термическому воздействию. И не будет преувеличением, что именно термическое воздействие (структурная термообработка) придает всем синтезируемым СВС-материалам присущий им уникальный комплекс свойств.

Поскольку СВС – материалы претерпевают в результате технологии получения силового компактирования, нагрев до определенной температуры, выдержку при ней и последующее охлаждение с заданной скоростью то о них можно говорить как о "самотермообработывающихся". Сочетание высокотемпературного нагружения синтезируемого композита с варьированием скорости объемного охлаждения компакта может быть приравнено к термомеханической обработке (ТМО). В момент приложения формообразующей деформации поверхностные слои образца закаляются в результате интенсивного теплоотбора пресс-формой, а после завершения силового воздействия по всему объему компакта протекают процессы самоотпуска. В процессе самотермообработки СВС-металлокомпозиты получают информационный потенциал о степени структурной самоорганизации и величине эффекта наследования. Это выражается в формировании на всех уровнях структурной иерархии строго определенного ансамбля составных ингредиентов. Общую концепцию протекания процессов самотермообработки можно представить в виде нижеприведенной схемы.

Степень термического воздействия у самотермообработывающихся СВС-металлокомпозитов регулируется взаимоотношением критериев "температура–время" и определяет следующие фазовые и структурные превращения: формирование, рост и зональная консолидация структурно-фазовых ингредиентов металлической матрицы и фазы-связки; миграция границ в матрице;

мартенситное превращение в матрице и фазе-связке; термодинамическая стабилизация полученных структур.



**Рис. 1.** Схема общей концепции протекания процессов самотермообработки в СВС-материалах

После протекания последней стадии первичного структурообразования синтезируемый СВС-композит начинает подвергаться самотермообработке, причем следует подчеркнуть, что степень термического воздействия на финишное структурообразование интенсивнее в тех локальных микрообъемах материала, которые примыкают к оксидной упрочняющей фазе. Это объясняется более высоким термическим сопротивлением оксидной фазы по сравнению с матричной, металлоидной.

На мультиуровневом иерархическом уровне структура СВС-металлокомпозитов может быть рассмотрена как конгломерат из:

- а) бесструктурной зоны оплавления;
- б) зоны закалки из твердофазного состояния: матричного твердого раствора; зоны предвыделения металл-оксидных твердых растворов (фаза-связка).

Причем структурные превращения, проходящие в этих зонах, зависят как от внешних условий и температурного фактора (совпадение с "классической" термообработкой), так и от степени перекрытия структурообразующих потоков с возможной локально-диффузионной структурной стабилизацией.

Это свидетельствует о том, что фазоструктурообразование при самотермообработке не могло произойти по механизму объемной диффузии, а реали-

зовалось за счет структурно-деформационных перестроек и локальной диффузии. Сформировавшаяся в результате СВС-самотермообработки структура зон плавления и закалки из твердофазного состояния последующее температурное воздействие воспринимает по-разному, в зависимости от величины накопленной при СВС-консолидации энергии Гиббса. Следует отметить, что зона оплавления в структуре СВС-металлокомпозитов занимает не более 15 об. %.

Поскольку реакции образования химических соединений проходят в нестехиометрических условиях, то можно предположить, что межфазная контактная поверхность будет представлена "сэндвич-конгломератом" из послойно закристаллизовавшихся химических соединений: от оксидов до интерметаллидов. Причем концентрация железа в контактном слое увеличивается от оксида к интерметаллиду. При выделении из жидкости первичных кристаллитов "фазы-связки" образуется концентрационный градиент, способствующий проявлению в локальных микрообъемах СВС-композитов "островков" жидкой фазы на финишных этапах структурообразования.

Причины возникновения температурно-концентрационного градиента можно установить при анализе микроструктуры СВС-композита после экзотермического спекания. Можно отметить локальные ячейки из жидкофазных составляющих, инициирующих "вторичное" структурообразование в близлежащих микрообъемах матрицы.

Промежутки между ними состоят из субдисперсных упрочняющих частиц. Известно, что максимум тепла экзотермической реакции выделяется по периметру межфазной поверхности раздела при горении "активатора синтеза" и его жидкофазном растворении. Это способствует локальному растворению оксидов, примыкающих к жидкой фазе, а с противоположной стороны на поверхности контакта с закристаллизовавшейся матрицей образуется слой интерметаллидов.

По равновесной диаграмме состояния полученные СВС – материалы должны иметь структуру твердых растворов сложношпинельного типа и химические соединения. В высокотемпературной области первичная структура композитов представляет собой твердый раствор и эвтектику.

Можно предположить, что первичное структурообразование в СВС-материалах выполняет три основных функции в динамике конструирования композита:

- подготовки микроструктуры основной матрицы;
- подготовки субструктуры с использованием наследования ее элементов;
- подготовки субструктуры с воздействием на упрочняющую оксидную фазу, не претерпевающую существенных изменений при структурно-стабилизирующей термообработке.

Компактирующая деформация замедляет диффузию ингредиентов композита при последующем отжиге в результате сегрегации атомов активных ком-

понентов (частично диссоциировавших оксидов) на дислокациях. Однако, при возможном изменении порядка диффузионного насыщения (оксидного легирования) матрицы на обратный и после компактирующей деформации изотермическим отжигом создать устойчивую субструктуру типа полигонизации, то можно ускорить процесс финишного структурообразования.

Используя возможность наследования полигональных субграниц матрицы композита, например, от аустенита к мартенситу, можно деформацией и изотермическим отжигом регулировать распределение и геометрию дефектов к моменту финишного структурообразования. Диффузия оксида (в исследованной системе – частиц  $Al_2O_3$  из состава частично диссоциировавшей упрочняющей фазы) в макрообъеме матрицы композита (данный пример – Fe) определяется не только диффузией по межфазным поверхностям раздела и дефектам структуры матрицы, но и геометрией дефектов. Поэтому можно регулировать скорость насыщающего упрочнения матрицы, изменяя изотермическим отжигом и последующей пиротермической обработкой характер распределения дефектов и их протяженность. Это было подтверждено металлографическим анализом. В полученном СВС-композите после дополнительной структурно-стабилизирующего отжига получено увеличение "массивности" фазы-связки на 0,03-0,04 мм при ее общей протяженности 0,1 мм.

В некоторых субмикрообъемах синтезируемого СВС-материала одна из фаз, образовавшихся при кристаллизации эвтектики (контактный слой "**фазы-связки + матрица**") при понижении температуры в подсолидусной области, может испытывать эвтектоидный распад. При этом формируется "самоупрочненная" микрокомпозиция с упрочнением в двух направлениях. Высокая конструктивная прочность композита в одном направлении определяется эвтектическими колониями фазы-связки, а в другом – кристаллами "эвтектико – эвтектоидной" игольчатой фазы в микроструктуре матрицы.

Рассматривая «первичное» (самоорганизационное) структурообразование СВС – композитов, системы «металл – оксид» необходимо отметить его особенность на финишных стадиях – формирование "вторичных" структур, представленных преимущественно оксидной фазой. Финишное (твердофазное) структурообразование – сложный процесс. Его протекание зависит от многих факторов. В зависимости от конкретных условий, свойств компонентов, их концентрации и диффузионной активности могут образовываться различные типы структур. Ими могут быть окислы, растворы переменной концентрации металлоидной фазы и кислорода в окислах; оксидные растворы переменной концентрации различных типов одного и того же элемента.

Изложенное выше показывает, что в процессе первичного структурообразования и структурной обработки, самотермообработки, в СВС – композитах самоорганизуются три типа диссипативных структур, обеспечивающих дискретизацию энергии синтеза, "накачанную" в материал, на макро-, мезо- и микроскопическом уровнях:

– динамические микроструктуры каркасного типа, обеспечивающие конвективное перераспределение диффузионных и кристаллизующихся жидкофазных конвективных потоков;

– квазистатические структуры мезоскопического масштаба, связанные с гетерофазной взаимодиффузией ингредиентов композита;

– динамические диссипативные субструктуры, обеспечивающие стабилизацию структурных ингредиентов композита на атомном уровне, в результате когерентной туннельной диффузии.

Особо следует отметить стадийность и локальную мультиуровневую саморганизацию процесса первичного структурообразования, включающую фрагментацию и "цементирование" ингредиентов структуры композита; образование мультиуровневых структурных композиций из матричного твердого раствора и фазы-упрочнителя; коагуляцию и коалесценцию; образование "вторичных" структур; смешивание составляющих композитов на атомном уровне.

Соотношение интенсивностей адаптации и диссипации энергии на каждой стадии структурообразования определяется формой и размером соответствующих структурных компонентов, коэффициентами многофазной диффузии, а также температурным потенциалом стадий структурообразования. Поскольку каждая стадия структурообразования характеризуется собственным набором резонансных частот, возможна оптимизация технологических факторов получения оксиднолегированных композитов, заключающаяся в последовательном усилении информационного фактора (температуры, компактирующего давления).

### **Список использованных источников:**

1. Костыря В.Ю., Дейнеко Л.Н., Ушаков Ю.Н., Долженков И.Е., Кокашинская Г.В., Мурадян Е.А. Броня. Технологии получения, применения, перспективы: Учебник по специальной дисциплине. – СПб: ЭКСМО, 2012. – 1021 с.

2. Дейнеко Л.Н., Костыря В.Ю., Ушаков Ю.Н., Кокашинская Г.В., Карпова Т.П., Луцкевич Д.А. Применение СВС-материалов для дисперсно-керамической брони // Труды IX междунар. конф. "Стратегия качества в промышленности и образовании", 31 мая – 07 июня 2013 г., Варна, Болгария.

3. Костыря В.Ю., Долженков И.Е., Карпова Т.П., Карпов А.Н. Роль термической обработки в формировании структур СВС-материалов // Труды IX междунар. конф. "Стратегия качества в промышленности и образовании", 31 мая – 07 июня 2013 г., Варна, Болгария.

4. Пружинная броня. Структурные возможности СВС-композитов / В.Ю.Костыря, Л.Н.Дейнеко, Ю.Н.Ушаков, И.Е.Долженков, Е.А.Мурадян, Л.А.Фетищева, В.М.Лиференко, А.К.Морока // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. – Вып.67. Дн-вск, ПГАСА, 2013. – С.131-135.