УДК 621: 547

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВС-МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.Ю. Костыря, Р.В. Морозов

Национальная металлургическая академия Украины

В настоящее время контроль качества СВС-материалов как при их производстве, так и при потреблении производится выборочным испытанием статистически представительной выборки из партии изделий. При этом основные параметры изделий (предел прочности при сжатии, изгибе, открытая пористость и др.) определяются разрушающими методами. Применение разрушающих методов позволяет прямо определять эксплуатационные свойства изделий, существующий риск пропуска дефектных изделий подчиняется статистическим закономерностям [1].

Высокая твердость, износостойкость и структурная стабильность с достаточно высоким значением ударной вязкости позволяют предположить возможность использования разработанных СВС-материалов в качестве деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивных истирающих и абразивных нагрузок, в возможном контакте с агрессивной средой, при локальном разогреве поверхности. Подбор области применения каждого вновь разработанного материала зависит от методов контроля его параметров и всегда является итерационным процессом, начинающимся с определения структурной стабильности и эксплуатационной надежности материала. Существует целый ряд факторов, которые должны учитываться в подборе областей эксплуатации: масса материала, цена материала, включающая стоимость его разработки и интеллектуальные затраты; конвертируемость, надежность и испытанность. В отличие от металлов и сплавов композиты являются объектами оптимизации, поскольку имеют мультиуровневую структурную иерархию. Поэтому для композитов области применения должны подбираться по запасу общей конструктивной прочности и какому-либо превалирующему технологическому показателю.

В случае СВС-металлокомпозитов это величина сопротивления изнашиванию и, в какой-то мере, твердость. Следует отметить, что, несмотря на невысокие значения ударной вязкости, требуемый запас конструктивной прочности СВС-металлокомпозитам, упрочненным оксидной фазой, обеспечивает структурная стабильность, невосприимчивость к разупрочняющему действию эксплуатационных температур и когерентная взаимосвязь структурных ингредиентов в единый конгломерат посредством фазы-связки. На априорном уровне это полностью удовлетворяет условиям, необходимым для стабильной работы деталей машин и механизмов триботехнического назначения.

В настоящее время в триботехническом материаловедении используется огромное количество металломатериалов: углеродистые, легированные и комплексно-легированные стали; стали, подвергаемые ХТО; быстрорежущие стали, карбидостали, легкие и цветные сплавы и композиты. Однако, ни один из

этих материалов не является универсальным (не удовлетворяет решению всех шести задач).

Так, легкие и цветные сплавы, несмотря на относительную дешевизну, не выдерживают длительной эксплуатации в ”жестких” условиях, а обладающие значительным запасом эксплуатационной стойкости быстрорезы являются очень дорогостоящими и малотехнологичными в производстве и структурной обработке. Конструкционные стали являются более технологичным материалом, широко использующимся в технике, однако, в силу неразрешенности ряда технологических противоречий (см. главу 1), получение экономичных качественных сталей может быть затруднительно.

При сравнительном анализе СВС-металлокомпозитов и металломатричных трибоматериалов можно отметить, что химический состав трибосталей обязательно включает в себя ряд дорогостоящих легирующих элементов, предназначенных на получение необходимого структурного состояния, обеспечивающего износостойкость. Однако, никакая система легирования не может предотвратить структурные изменения в сталях и чугунах, протекающие под влиянием процессов диффузии и самодиффузии.

В СВС – материалах возможные структурные изменения будут сведены к минимуму. Во-первых, из-за отсутствия в составе композита термодинамически активного углерода и закрепления атомов железа оксидной фазой-упрочнителем. Во-вторых, из-за наличия у СВС-металлокомпозита остаточного энергетического потенциала, соответствующего высокотемпературной области СВС-реакции.

В настоящее время ценообразование СВС-металлокомпозитов определяется преимущественно ценой шихтовых ингредиентов (при практически полном отсутствии энергетических затрат на технологию производства), поэтому цены могут колебаться, в пропорциональности от цен давальческого сырья на шихтовые ингредиенты. Но разработка СВС-технологий, ориентированных на ”техногенные месторождения” – отходы, позволит минимизировать ”сырьевую” статью ценообразования, повысив тем самым их конкурентоспособность и рыночную устойчивость. В общем, технические разработки и коммерческие планы, относящиеся к СВС-металлокомпозитам, ни в коей мере не направлены против применения других металломатричных материалов. Более того, наблюдается тесная взаимосвязь между заказчиком от производства и интеллектуальным производителем в поиске оптимальных решений по структурному и технологическому конструированию новых материалов. Причем, это относится и к техническому, и к экономическому аспектам.

Однако, применение СВС-материалов в качестве ответственных тяжелонагруженных изделий требует их 100% контроля, и как следствие, дорогостоящих методов контроля свойств. Основными методами контроля свойств – являются разрушающие методы. Однако ряд причин ограничивает применение выборочного разрушающего метода. Во- первых, растущая стоимость разрушаемых изделий приводит зачастую к неприемлемым экономическим затратам на надежный контроль у изготовителя. Во-вторых, цена ремонта при аварии вышедшей из строя установки в результате эксплуатации конкретных

Таблица 1

Характеристика сравниваемых трибоматериалов

Материал	Состав, % по массе	Примечание
Сталь 20 ГОСТ 1050-91	**0,17…0,24 C; 0,17…0,37 Si; 0,35…0,65 Mn**	*Нелегированная сталь*
Сталь 20ГС2 ГОСТ 1050-91	**0,19…0,25 C; 1,7…2,2 Si; 0,70…1,05 Mn**	Легированная сталь
Сталь 15Н2 ГОСТ 4543-94	**0,10…0,18 C; 0,17…0,37 Si; 0,40…0,70 Mn; 1,5…2,0 Ni; 0,20…0,30 V**	Легированная сталь для деталей ответственного назначения
Сталь 46ГР ГОСТ 4543-94	**0,45…0,51 C; 0,20…0,35 Si; 0,65…1,10 Mn; 0,13…0,65 Cr; < 0,005 B**	Легированная сталь для деталей особо ответственного назначения
Сталь 45ХГНМР	**0,42…0,50 C; 0,20…0,32 Si; 0,62…1,01 Mn; 0,35…0,65 Cr; 0,35…0,80 Ni; 0,15…0,25 Mo; ~ 0,005 B**	Легированная сталь для деталей особо ответственного назначения
Сталь 67ГН	**0,66…0,73 C; 0,20…0,32 Si; 0,65…1,10 Mn; 0,41…0,57Ni; 0,20…0,30 Mo**	Легированная сталь для тяжело нагруженных деталей машин
Карбидосталь типа ТЖС	**Матрица – титановая стружка со стружкой из стали 40ХНВА, упрочнение – карбидами титана (~ 12 % об.)**	Материал ~ на 50 % технологически получают из отходов; снижение затрат на легирование на 50 %
СВС-металлокомпозит Fe–оксид	**Матрица – α-Fe (СВС), упрочняющая оксидная фаза (~ 18 % об.)**	Материал на 100 % получен из отходов
СВС-металлокомпозит Cu–оксид	**Матрица – восстановившаяся Cu (СВС), упрочняющая фаза – оксиды (~ 18 % об.)**	Материал на 100 % получен из отходов

Примечание. *Кроме приведенных в таблице, в триботехнике применяются, в основном, хромистые стали типа ХГТ, ХНВА, а также ШХ15 и 95Х18. Они достаточно полно описаны в литературе и в таблицу не внесены (причем дороговизна хрома ни у кого сомнений не вызывает). Применяющиеся в деталях, работающих на износ, чугуны глобально по химсоставу не стандартизированы. Наиболее типичный состав чугуна для прокатных валков: 2,7…3,0 % C; 0,4…0,8 % Si; 0,3…0,8 % Mn; 0,4…1,0 % Cr; 1,7…2,5 % Ni; 0,2…0,8 % Mo. Помимо относительно высокой износостойкости, обладают низкой ударной вязкостью и конструктивной прочностью. Кроме того, чугуны подвержены эксплуатационной структурной эволюции.*

дефектных огнеупорных изделий ставит задачу 100 %-ного контроля (например, испытания 7000 плиток высокотемпературной обшивки корабля «Спейс-шаттл» [2]).И, наконец, для целого ряда изделий определение прямым методом механической прочности, пористости и других эксплуатационных параметров встречает серьезные трудности. К таким изделиям, например, относятся крупноблочные формы, изделия сложной конфигурации (дырчатые и щелевые насадки, цилиндры), мелкоштучные изделия (трубки, втулки, бусы и др.).

В связи с этим при сертификации СВС - материалов у изготовителя и потребителя предпочтительнее применение неразрушающих физических методов контроля, уже получивших частичное распространение в промышленности. Эти методы основаны, как правило, на анализе прошедших через изделие электромагнитных или звуковых колебаний.

Электромагнитные колебания в СВС – материаловедении нашли применение в качестве рентгеновского и радиоволнового методов анализа. Мягкие рентгеновские лучи (10 нм) дают четкую картину внутренней структуры изделий низкой плотности, тонких деталей с незначительным различием плотности. Жесткие рентгеновские лучи (0,001 нм) выявляют внутреннюю структуру плотных и крупногабаритных изделий. В типичном случае рентгеновский метод имеет разрешающую способность около 2 % от толщины изделия. На Кировском заводе (г. Санкт-Петербург, Россия) качество изделий для машин непрерывного литья заготовок (погружаемые стаканы, стопоры-моноблоки, трубы для защиты струи металла от окисления) контролируется рентгеновским методом. Метод позволяет определять наличие посторонних включений, величину разнотолщинности стенок изделий, степень распределения добавок графита, внутренние дефекты (трещины, посечки и др.). Другие возможности метода заключаются в выявлении таких внутренних дефектов, как разноплотность, внутренние пустоты .

Радиоволновый метод основан на измерении амплитуды и фазы проходящего через изделие СВЧ излучения. Показано, что смещение минимума стоячей волны

$$x = \frac{\lambda B}{\lambda}(\sqrt{\varepsilon - 1})l,$$

где λ, λ_B — длины волн в изделии и волноводе соответственно; ε — диэлектрическая проницаемость; / — толщина изделия.

Радиоволновый метод может быть использован для контроля различных свойств СВС материалов и в первую очередь пористости изделий. Для СВС-композитов с медной матрицей, упрочнённых карбидом кремния изменение открытой пористости в пределах 3,5— 18,5 % соответствовало изменению диэлектрической проницаемости ε в пределах 9,6— 6,5. Однако следует отметить , что подобные методы малоприменимы, а рентгеновский метод вообще не применим при контроле качества материалов, изготовленных из *ресурсов техногенных месторождений (отходов и отвалов), из-за невозможности усреднения компонентов в шихтовой навеске.

Звуковые колебания получили промышленное применение в поштучном 100 %-ном неразру шающем контроле серийной СВС – продукции за рубежом (фирмы «Фойерфест — Прюфлабор ФЛП», Германия; «Кавасаки родзай»,

«Нихон руцубо», Япония; «Рипаблик стил корп.»,. США). Традиционно выделяют несколько разновидностей использования возбуждаемых в изделии ультразвуковых колебаний, каждая из которых решает свой круг проблем. Существуют теневой метод, эхо-метод и др. Отдельное положение занимает метод акустической эмиссии, при использовании которого в отличие от предыдущих регистрируются не активно возбуждаемые излучателем волны, а пассивное упругое излучение возникающих дефектов (трещин) в процессе деформации и разрушения.

Метод акустической эмиссии эффективен при определении механизма деформации и разрушения СВС-материалов, зарождения и развития трещин. Испытания на термостойкость под действием теплосмен показывают корреляцию параметров акустической эмиссии (общего прямого счета, суммарной энергии эмиссии) с объемом разрушений в материале (количество трещин). На рисунке представлены данные, показывающие суммарную энергию разрушения акустической эмиссии А в зависимости от числа термоциклов нагружения N от 20 до 600 °С СВС– изделий.

Эхо-метод, доминирующий при контроле металлов, основан на регистрации отраженных от внутренних дефектов ультразвуковых импульсов. Выявляются внутренние трещины, раковины, а также степень износа и остаточная толщина огнеупорной футеровки тепловых агрегатов [2].

Прочностные свойства СВС– материала могут быть определены через параметры ультразвукового излучения по известным соотношениям:

$$E = p\frac{(1+v)(1-2v)}{1-v}C_{зв}^2$$

где *E — модуль Юнга; ρ плотность материала;*
v — коэффициент Пуассона, для СВС–материалов, согласно классификации Дубинина v ~0,16;
C — скорость ультразвуковых волн;
ρ напряжение разрушения;

$$\sigma_{разр}=E\varepsilon_{разр},$$

$\sigma_{разр}$ — разрушающая деформация.

Однако в связи с большим разбросом свойств СВС–материалов изделий на практике используют иной подход. Предварительно для данных компонентов СВС–шихты проводят на представленных образцах параллельные измерения параметров ультразвуковых колебаний и прямые разрушающие испытания на предел прочности, открытую пористость, термостойкость и т. д. Полученную экспериментальным путем зависимость далее используют как градуировочную для прогнозирования свойств всех изделий данной марки, измеряя лишь их ультразвуковые свойства. Степень зависимости измеренного параметра параметра ультразвуковых колебаний характеризуют коэффициентом корреляции. Однако для материалов изготовленных из отходов такой метод применим мало, из этой группы он лучше всего подходит шихт на базе никельсодержащих отходов (Торезский химкомбинат).

Резонансный (акустический) метод получил промышленное применение в связи с установленной корреляцией резонансной частоты свободно колеблющегося изделия с его эксплуатационными свойствами. Метод оценивает ин-

тегральные свойства изделия, основан на использований известного физического явления — изменения тона звучания, вибраций при наличии дефектов и структурных отклонений. При изменении состава шихты требуется новый набор экспериментальных данных для составления градуировочной зависимости.

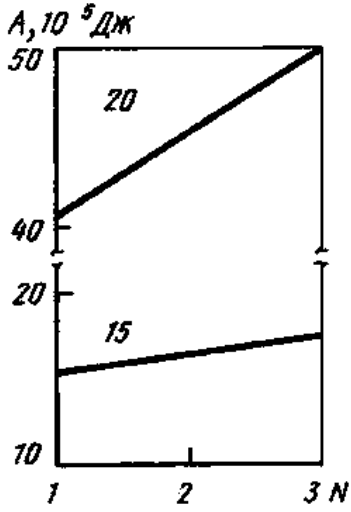

Рис. 1. Суммарная энергия разрушения акустической эмиссии А в зависимости от числа термоциклов N (20—600 °С) медноматричных СВС-материалов, упрочнённых периклазом при скоростях нагружения 15 и 20 °С/с (указаны на кривых)

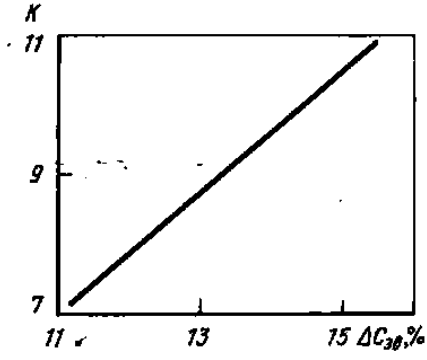

Рис. 2. Местная термостойкость К в зависимости от скорости звука Сзв в образце СВС – металлокомпозита с железной матрицей, упрочнённого шпинелью.

Теневой метод первоначально был внедрен в строительную индустрию (ГОСТ 17624—78), откуда был распространен на металлугрическую отрасль (ГОСТ 24830—81). Измеряемым параметром является непосредственно скорость звука $C_{зв}$ между излучающим и принимающим ультразвуковые импульсы датчиками. Корреляция была установлена практически со всеми характеристиками СВС – изделий: пределом прочности при сжатии на холоду (0,79), открытой пористостью (—0,88), кажущейся плотностью (0,87), износом (—0,79) и потерей массы при 1000 °С (0,96).

Каждый СВС – композит, по своей природе, не может считаться гомогенной системой, помимо присутствия как минимум трех фаз, при этом он обязательно будет насыщен порами, дефектами кристаллического строения, включениями. Поэтому, в отличии от стали и сплавов, подобные материалы целесообразно рассматривать как интегральную систему двух дискретных факторов:

1. Физико-механического взаимодействия матрицы и упрочняющей фазы.
2. Физико-химического или химического взаимодействия тех же фаз.

Физико-механический аспект заключается в однородности контактных поверхностей матрицы и фазы-упрочнителя. Если поверхность частиц упрочняющей фазы идеально гладкая, то степень однородности композита определяется, в первую очередь, соотношением между краевым углом смачивания в системе расплав – упрочняющая фаза, в минимальный хрональный промежуток, свойственный СВС – реакциям. В структуре подобного композита могут возникать расслоения, поры на месте контакта матрица – упрочняющая фаза, возможен большой риск структурной неадекватности. В то же время подобный композит будет иметь большой запас конструктивной прочности, за счет минимизации концентраторов напряжений. Физико-химический аспект заключается в протекании реакций межфазного взаимодействия, при котором образуется фаза-связка. Причем компоненты композита следует подбирать так, чтобы температуры образования и линейные коэффициенты термического расширения продуктов реакций имели геометрически-противоположные значения. При получении композиционных материалов СВС – методом всегда используется, кроме матрицы и фазы-упрочнителя, еще так называемый катализатор. Им является окислитель, который вступает в реакцию с матрицей полностью, выгорая в процессе реакции, при этом температура горения, скорость распространения фронта волны горения соизмерима с дозвуковыми скоростями. Чаще всего независимо от массы объекта, синтез проходит за 30 ~ 50 с.

Несмотря на это, мало что известно о структуре неупорядоченных материалов или о связи между структурой и физико-химическими процессами ее образования. Этот недостаток знаний распространяется также на соотношение между параметрами СВС – технологий и свойствами. Проблема здесь в основном заключается в том, что лишь недавно были разработаны как методы изучения случайных структур, так и модели, связывающие эти структуры с условиями их роста и эксплуатационной эволюции

Таблица 2

Градация методов исследования и управляющего воздействия на «структуру/свойства» СВС – композитов

1.Структурный уровень	**Атомный**	**Мезо-уровень**	**Субмикро - уровень**	**Микро-уровень**	**Макро-уровень**
2.Размерность,м	$10^{-10} – 10^{-9}$	$10^{-9} – 10^{-8}$	$10^{-7} – 10^{-6}$	$10^{-5} – 10^{-3}$	10^{-2} - 10^{0}
3.Средства научного анализа (приведено по аналогии состалями)	Микрорентгеноспектральный анализ	Туннельный микроскоп	Электронный микроскоп	Оптический микроскоп	Невооруженный глаз, лупа
4.Структурные элементы	Атомы ингредиентов композита	Блоки, ассоциаты, фрактальные кластеры, «скелеты» упрочняющей фазы	Частицы фазы–связки, микрочастицы упрочняющей фазы	Структура матрицы и упрочняющей фазы композита вцелом	Морфология и топология структуры
5.Структурные составляющие различных уровней		Кристаллическая решетка, субмикропоры, дислокации, капиллярные каналы	Границы зерен матрицы СВС – композита, морфология межфазных контактных поверхностей,	Зерно матрицы, зеренные конгломераты и ассоциаты, границы фазы-связки	Дендриты матрицы и фазы-связки, макродефекты, распределение упрочняющей фазы
6.Средства воздействия на структурные уровни		Модифицирование шихты, физико-химические методы обработки исходных материалов в неравновесном состоянии	Режимы физического воздействия (силовое СВС – компактирование)	Режимы физического воздействия (силовое СВС – компактирование	Регулирование характера протекания СВС-реакций в матрице и фазе-связке, режимы структурной обработки

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Испытательная лаборатория // Черные металлы. 1990. № 4. С. 79.
2. Сима А., Кудзима С. // Тайкабуцу. 1986. Т. 38. № 3. С. 151 — 161.
3. Russel R.O., Morrow G. D. // Arner. Ceram. Soc. Bull. 1984. V. 63, № 7, P. 911—914.
4. Каваками Т. // Тайкабуцу. 1989. т. 41. № 6. С. 38—41.
5. Semi er K. E. // Interceram. 1981. V. 30. № 5. P. 485—488.
6. Малютин А. А., Кузнецова Т. А., Кузеванова Г. И. и др. Методика выполнения измерений МИ 14-345.1-142—89. ВостИО, 1989.— 7 с.