

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ**

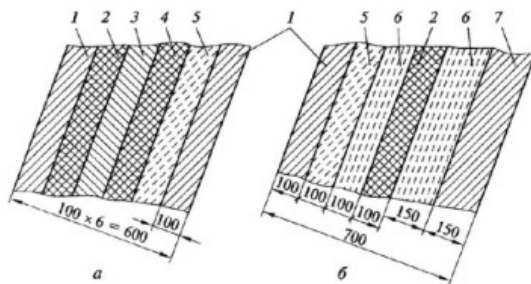
В. Ю. Костыря\*, Л. Н. Дейнеко\*, Ю. Н. Ушаков\*, И. Е. Долженков\*,  
Г. В. Кокашинская\*, А. Н. Карпов\*\*, Л. А. Фетишева\*\*,  
А. Ю. Алифонов\*\*, Н. В. Донец\*

*\*Национальная металлургическая академия Украины*

*\*\*Днепропетровский лицей с усиленной военно-физической подготовкой*

Броня в XX столетии становится предметом изучения самых различных дисциплин как технических, так естественных и общественных, как общих, так и частных. В настоящее время одновременно с ускоренным развитием материаловедения броневых сталей интенсивно ведутся работы по "кевларам" типа 29 и 45 (они ранее применялись только для бронежилетов), карбиду вольфрама и бора (сплавы ВС типа  $B_4C$  или  $B_nC_n$ ), бронепластмассам, СВС - композитам и другим материалам, в сочетании с которыми "классические броневые стали" могут стать эффективным способом защиты современной и дорогой сухопутной бронетехники и кораблей. Одним из направлений создания новых материалов для элементов конструктивной защиты является разработка композитных материалов с неметаллическим наполнителем.

Работы по данному направлению материаловедения были начаты в ФРГ в 1970-х годах прошлого века и к 2010 году на рынок вышла полислоистая броня фирм «Краус Матфей» и «Рейнметалл».



**Рис.1.** Броня фирм «Краус Матфей» (а) и «Рейнметалл» (б): 1 – броневая сталь; 2- керамика; 3 – алюминиевый сплав; 4 – углеродное волокно; 5 – тефлон; 6 – тефлон с углеродным волокном

В качестве керамической фазы применяют спеченный диоксид кремния, корунд, карбид бора, в СССР керамика применялась для заполнения полостей в передней части отливки башни танка. Для данных броневых конструкций как демпфирующие наполнители применяются геометрические тела с дефектом

упаковки решетки – неизометрические монокристаллы или сферолиты. Одной из альтернатив «чисто» стальной броне являются СВС-материалы, с железной матрицей упрочненные оксидной фазой. В данном случае броня рассматривается как композиционный материал.

Так как любой композиционный материал содержит как минимум две фазы, различающиеся по своей физической и термодинамической сути, он является метастабильной системой. Причем компоненты такой системы как индивидуально, так и во взаимодействии, могут вносить существенную коррекцию в результаты измерений характеристик материала. Композиты, полученные СВС-методом, благодаря термодинамически неравновесным условиям получения и наличия в структуре фазы-связки, могут быть использованы в качестве материалов для пружинной брони из-за контролируемого хода трещин. Поскольку именно степень уплотнения СВС-композитов определяет запас конструктивной прочности (в данном случае ударостойкость) материалов, то можно провести аналогию между степенью однофазности уплотнения композита и вероятностью зарождения и развития трещин в его матрице. Первоначально трещины развиваются в равновесных условиях, проходя через слабые звенья структуры. Это является основным отличием от неконтролируемого разрушения, проявляющегося в броневых сталях, когда в результате высокой кинетической энергии путь трещины оказывается случайным (особенно в области хрупкого разрушения). Область межзеренного разрушения у СВС-материалов в идеальном случае должна представлять гладкую криволинейную поверхность, на которой могут проявляться массивы фазы-связки. В случае если модуль сдвига ( $\Delta G$ ) какого-либо локального микрообъема композита больше нуля, – возникает сила отталкивания. Она имеет место, например, при огибании дислокациями частиц упрочняющей фазы по механизму Орована (жесткие частицы оксидов-упрочнителей, когерентно связанные с матрицей, посредством фазы-связки). В случае же, когда оксид-упрочнитель и матрица композита разделены микропорами, модуль сдвига которых равен нулю и соответственно  $\Delta G < 0$ , на дислокации возникает сила притяжения к свободной поверхности микропоры. Таким образом, когда дислокация приближается к ряду границ с локальным нарушением сплошности, она испытывает притяжение к тем местам, где есть поры, и отталкивается от мест, где межфазные границы термодинамически устойчивы. При движении последующих дислокаций кинематика их перемещения не нарушается, за исключением небольшого дополнительного воздействия со стороны полей упругих напряжений сформировавшихся ранее сегментов.

При подборе упрочняющей фазы во время структурного конструирования элементов бронезащиты наряду с традиционными требованиями необходимо руководствоваться следующими критериями оценки: неметаллическая фаза должна обладать достаточным тепловым сопротивлением, чтобы полностью не продиссоциировать при температурах СВС-реакции и в то же время быть способна к образованию с матрицей зон реакционного взаимодействия; геометрическая форма упрочняющей фазы должна обеспечивать как ей, так и матрице разрабатываемого композита достаточный запас конструктивной

прочности, чтобы при самых жестких условиях эксплуатации бронекompозит не разрушился.

Форма частиц упрочняющей фазы должна, с целью обеспечения максимального запаса структурной прочности композита, дублировать геометрическое строение ее атомов. Известно, что оптимальная геометрия упрочняющих и армирующих фаз, в основном, присуща монокристаллам. А форма частиц корунда в виде дробленых зерен-сферолитов или "усов" не будет являться оптимальной из-за высокой вероятности их выкрашивания или скола. Скорее всего, прочность и жесткость бронекompозиции может обеспечить упрочняющий элемент в виде фигуры, подобной по своей кристаллогеометрии решетке корунда, – призмы или параллелепипеда. В структуре корунда атомы кислорода образуют несколько искаженную плотнейшую гексагональную упаковку. Перпендикулярно тройной оси плотнейшей упаковки выделяются слои из Al-октаэдров, слои наложены друг на друга таким образом, что по направлению тройной оси два заселенных октаэдра чередуются с одним незаселенным. Корунд имеет в структуре ориентированные слоистые группировки атомов с ослабленными химическими связями между слоями. Эти особенности создают предпосылки для получения кристаллов, имеющих пластинчатую форму.

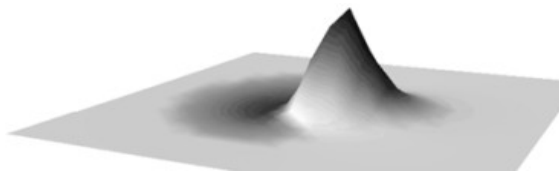
Но следует отметить, что такое высокоогнеупорное соединение, как  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обладает значительным тепловым сопротивлением. Поэтому даже колоссальные температуры СВС-реакций могут не "спровоцировать" физико-химическое взаимодействие между матричной и упрочняющей фазами синтезируемого металлокомпозита. Для гарантированного протекания процессов диффузионного СВС-взаимодействия, и как следствие предотвращения растрескивания брони, поверхность упрочняющей фазы целесообразно покрыть зольем или гелем из вещества (смеси веществ), идентичного по характеристикам оксиду алюминия, но обладающего большей химической активностью. Как покрытие было решено использовать поликомпонентную оксидную систему Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, наносимую на поверхность неизометрических монокристаллов  $\alpha$ -корунда по золь-технологии. А так как система в целом находится в состоянии метастабильного равновесия (литературные данные не указывают на возможность формирования каких-либо соединений в рассматриваемой четырехкомпонентной системе), то возможно предположить и "повышенную" химическую активность ее ингредиентов.

Ввиду недостаточно полной изученности диаграммы состояния четырехкомпонентной системы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> и сложности пространственного изображения диаграмм подобного типа, целесообразно рассматривать составляющие ее подсистемы. Грани пирамиды четырехкомпонентной системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> представляют собой диаграммы состояния трехкомпонентных систем: ZrO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>-MgO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>. Ребра пирамиды представлены двухкомпонентными системами: MgO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO-ZrO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>. В системе MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> четырехкомпонентных соединений не образуется, тройных соединений также

не обнаружено. Твердые растворы обладают широкой областью распространения, но изучены очень мало, сведения об эвтектиках также неполные, поэтому описание системы  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  схематично. В ней содержится три условных тетраэдра:  $\text{MgO}[\text{MgOCr}_2\text{O}_3\text{-MgOAl}_2\text{O}_3]\text{-ZrO}_2$  (567);  $[\text{MgOCr}_2\text{O}_3\text{-MgOAl}_2\text{O}_3]\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  (150);  $\text{MgOAl}_2\text{O}_3\text{-}[\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3]\text{-ZrO}_2$  (283). Фазы, образующие непрерывный ряд твердых растворов, заключены в квадратные скобки. В круглые скобки заключен относительный объем элементарного тетраэдра, умноженный на 1000.

Расшифровка дифрактограмм опытных материалов показала, что в пробах основной составляющей является алюмомагнезиальная шпинель  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ . О большом количестве этой фазы свидетельствует высокая интенсивность линий, характерных для шпинелей (2,84; 2,42; 2,02; 1,55; 1,43 и др.) на дифрактограммах. Кроме четких максимумов этой фазы, на дифрактограммах присутствуют линии значительно меньшей интенсивности, т.е. имеется небольшое количество других фаз: хромовая шпинель (2,51; 2,09; 1,60; 1,47; 1,27),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (2,69; 2,23; 1,65; 1,57),  $\text{ZrO}_2$  (5,07; 3,13; 2,93; 1,79; 1,53). Двоокись циркония не вступает во взаимодействие с другими составляющими системы, а кристаллизуется самостоятельно в промежутках между зернами шпинельного твердого раствора. Следовательно, самым химически "активным" компонентом поликомпонентной системы будет являться оксид алюминия, что более благоприятно скажется на термокинетическом характере взаимодействия упрочняющей фазы и матрицы во время синтеза разрабатываемого материала, а следовательно увеличения запаса его конструктивной прочности.

Важным фактором для разработки современного материала для конструктивной защиты являются его электромагнитные характеристики. В данном случае наличие в железной матрице СВС-бронематериала керамической фазы, с отсутствием четкой ориентировки компонентов позволяет «размыть» магнитостатическое поле защищаемого объекта, сбивая тем самым программирование высокоточного оружия. При наличии корундового компонента СВС-бронематериал будет иметь «косое» намагничивание. Магнитное поле бронеобъекта будет иметь заметное смещение, уменьшающее вероятность поражения его соответствующей проекции.



**Рис.2.** Вид магнитостатического поля (3D изображение) объекта с конструктивной защитой из СВС-материала с комплексной неметаллической фазой, расчет по программе «Surfer»

Принцип защитного действия подобного СВС-материала заключается в следующем. При встрече с керамическим элементом пуля (снаряд) начинает разрушаться (дробиться) и отклоняться от траектории полета. При этом большая часть ее энергии расходуется на приведение в колебательное движение соседних керамических элементов в закристаллизовавшейся матрице, что в принципе напоминает "бильярдный эффект". Магнитостатическое поле объекта при этом претерпевает изменения, заставляя тем самым разбалансироваться магнитные взрыватели, а кроме того, подобное взаимодействие отклоняет от нормали камулятивный боеприпас, сводя на нет эффект воздействия камулятивной струи на бронеобъект. В результате этого "ослабленная", полуразрушенная пуля (снаряд) и образовавшиеся при этом осколки легко задерживаются последующим матричным слоем.

Таким образом, защитный эффект в этом случае достигается не за счёт упрочнения брони, так как внешний дробяще-отклоняющий слой не является сплошным и высокопрочным, а в результате рассеивания энергии бронебойного сердечника в плоскости этого слоя и отклонения его от первоначальной траектории.

*Таблица 1*

*Значения параметра решетки комплексной шпинели*

<b>Номер плавки</b>	$2\theta_{д.т.}$	$a, \times 10^{-10}$ м	Табличное значение $a, \times 10^{-10}$ м
MgO–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> стехиометрия	148°00'	8,0620	8,05–8,07
2	146°27'	8,0948	
3	145°09'	8,1213	
4	146°28'	8,0948	
8	146°45'	8,0860	7,910–8,081
9	145°30'	8,1254	
11	145°16'	8,1211	
12	146°09'	8,0990	
13	146°28'	8,0948	