

**ПРУЖИННАЯ БРОНЯ.
СТРУКТУРНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СВС-КОМПОЗИТОВ**

В. Ю. Костыря*, к. т. н., доц., **Л. Н. Дейнеко***, д. т. н., проф.,
Ю. Н. Ушаков*, к. т. н., доц., **И. Е. Долженков***, д. т. н., проф.,
Е. А. Мурадян*, к. т. н., доц., **Л. А. Фетищева****, курс.,
В. М. Лиференко**, курс., **А. К. Морока****, курс.

* *Национальная металлургическая академия Украины*

** *КЗО «Лицей с усиленной военно-физической подготовкой»*

Состояние вопроса Бои между первыми броненосцами показали, что маломерные вытянутые в длину плиты (отчего броневой пояс приходилось составлять из двух рядов) из-за слабости опорного контура (стойки за броней помогали мало) и недостаточного числа броневых болтов при ударе снаряда в кромку поворачивались вокруг своей условной оси и прорывали проходившую за плитой водонепроницаемую рубашку. Вторичное попадание (были и такие случаи, в особенности в Цусимском бою) нередко, не пробивая плиты, срывало ее с креплений. Учитывая этот опыт, пришлось увеличить размеры плит и ставить их длинной кромкой вертикально (пояс получался из одного ряда плит высотой до 5 м, число стыков резко уменьшалось) и по всему периметру плиты имели жесткую опору, исключавшую вращение. Для исключения подобных последствий попаданий снарядов кораблестроители подгоняли ширину плит к размеру шпации, в результате чего шпангоуты служили дополнительным упором. Однако жесткий опорный контур, препятствуя вращению плиты, не мог помешать ее прогибу и при относительно малой толщине броневых плит снаряд, даже не пробивая их, достигал своей цели: рубашка за броней разрывалась, открывая в корпусе течь. Оставалось лишь одно средство: сделать пояс монолитным, т.е. связать плиты между собой так, чтобы они не позволяли снаряду продавить плиту внутрь корпуса. Достигалось это технологически сложным и дорогостоящим конструктивным решением соединительными шпонками типа «двойной ласточкин хвост», или установку броневых плит на толстые деревянные брусья из твердых пород дерева, чаще всего из тика, для получения «пружинного эффекта». Первыми это выполнили англичане на HMS «Warrigor», в 1860 г., затем и все страны мира чтобы уменьшить деформации и рассредоточить удар снаряда, ввели за плитой слой деревянной прокладки, пропитанный негорючим составом.

Результаты исследования и их анализ. Обычно многие представляют себе пружину в виде витой спирали. На самом деле пружиной может служить и абсолютно плоский лист. В чем полезное свойство пружин? Они гораздо лучше поглощают энергию удара, чем неподвижно закрепленные стальные плиты. Потенциальная энергия, запасаемая пружинной, зависит от ее жесткости (коэффициента k), и в квадрате от величины её растяжения. Теперь представьте, что снаряд заставляет деформироваться пружину. Значит, его кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию сжатия пружины. То есть, важно

чтобы снаряд не пробил броню, следовательно, его кинетическая энергия должна быть равна потенциальной энергии деформации пружины. Одной и той же величины этих энергий можно достичь двумя принципиально противоположными методами. Можно идти либо путем увеличения жесткости, либо путем увеличения прогиба пружины. Второй путь гораздо эффективнее. Формула энергии пружины (то есть ее работы против упругой силы)

$$W = \frac{1}{2} \cdot k \cdot s^2$$

Если увеличить деформацию пружины s в десять раз, то запасаемая энергия возрастет в квадрате от $10k=100$ раз. Но поскольку больше запастись энергии чем нужно нет необходимости, то можно ровно в 100 раз уменьшить жесткость пружины - коэффициент k . Но в данном случае роль пружины выполняет броня. А коэффициент жесткости брони - это ее прочность. Броню всегда выполняют или из толстых стальных плит, или из толстых листов. Как альтернативу используют несколько тонких листов пружинной стали с различным ориентационным расположением. При ударе боеприпаса в такую многослойную броню весь этот конгломерат одновременно изгибается, поглощая упругую энергию снаряда. И соответственно такая пружинная броня не будет давать множество осколков.

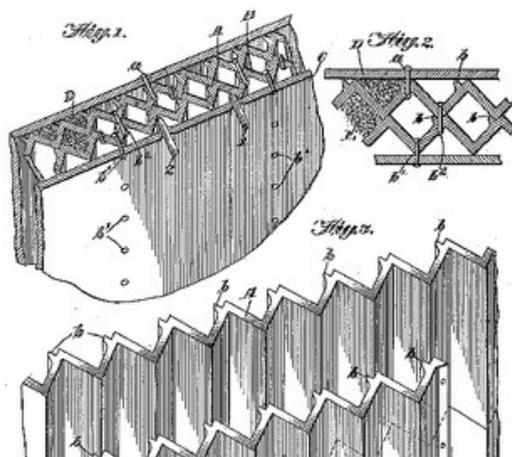


Рис. 1. Американская многослойная броня, патент, 1905 г.

В настоящее время для бронезащиты используют стали типа СП 28-43, СПС43, ВКС-1, ХНМС (хром – никель – марганец – кремний), ВП30 и ВП25 (высокопрочные). Применяют сталь «экстремягкую», «пружинную» и «демпфирующую» типа 38ХНЗМФА. Производится также броневая судовая сталь типа БР2-БР4 (по составу сходна с маркой 37ХНЗМФА, но она нецементуемая). Для максимальной реализации «пружинного эффекта» для данных броневых сталей применяют демпфирующие наполнители геометрические тела с

дефектом упаковки решетки – неизометрические монокристаллы или сфероиды.

Одной из альтернатив «чисто» стальной броне являются СВС-материалы с железной матрицей, упрочненные оксидной фазой. В данном случае пружинная 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 (ΔG) какого-либо локального микрообъема композита больше ноля, – 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. Однако, такое отталкивающее воздействие компенсируется притяжением дислокаций к свободной поверхности микропор на межфазных границах.

Принимая во внимание, что общая пористость композитов, полученных СВС-компактированием, не превышает 2-3 %, а при микроструктурном анализе опытных материалов не выявлено преимущественного расположения пор по межфазным границам, можно предположить, что разрушение СВС-композитов будет связано с деструктуризацией межфазных границ и фазы-связки. По статистической теории прочности хрупких тел Вейбулла вероятность нахождения

трещины связана с величиной объема образца. Вероятность разрушения определяется напряжением и зависит от объема образца и коэффициента гомогенности:

$$m = \frac{\lg\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right)},$$

где V_1, V_2 и P_1, P_2 – соответственно объемы и пределы прочности, разные по величине в зависимости от размеров образцов, выполненных из одного и того же материала. Серийные испытания СВС-металлокомпозитов позволили установить, что коэффициент m не является величиной постоянной и также представляет собой функцию размера.

Применительно к оксиднолегированным СВС-композитам теория Вейбулла имеет следующий постулат: неизометрические монокристаллы с гладкой контактной поверхностью занимают минимальный объем к общей поверхности локального микрообъема композита, а следовательно, они имеют минимальное количество дефектов. Поэтому при введении их (монокристаллов) в матрицу (железо) может самоорганизоваться негомогенный композиционный материал с величиной прочности, близкой к теоретической.

По кинетической теории прочности С.Н.Журкова разрушение материалов происходит не только из-за действия механической силы, но и в значительной мере вследствие флуктуаций тепловой энергии, разрушающей химические связи. С.Н.Журковым показано, что процессы разрушения материалов происходят постепенно и что одним из фундаментальных свойств прочности является ее зависимость от времени. Именно с точки зрения теории С.Н.Журкова можно объяснить локальное эволюционирование структуры СВС-композитов в местах растрескивания. Так вследствие высвобождения некоторой доли накопленной энергии могут инициироваться процессы частичной коалесценции и ассоциирования на межфазных поверхностях раздела.

И в теории Вейбулла, и в теориях Ирвина, Гриффитсаи С.Н.Журкова постулируется закон Гука, который применительно к СВС-металлокомпозитам реализуется следующим образом: модуль сдвига в фазе-связке будет меньше, чем модуль сдвига матрицы и упрочняющей фазы, т.к. только в этом случае при разрушении композитов присутствует микроупругая деформация и к тому же выполняется условие $\Delta G < 0$.

Поскольку как модуль упругости, так и другие упругие константы (модуль сдвига, модуль объемной деформации) характеризуют деформируемость межатомных связей в матрице и на межфазной поверхности раздела композита, то его минимизированные значения для фазы-связки могут служить подтверждением теории С.Н.Журкова. В частности, если модуль сдвига оксидной фазы-упрочнителя значительно превосходит модуль сдвига матрицы, то вблизи межфазных поверхностей раздела "матрица-фаза-упрочнитель" (при нагружении композита) на дислокации действует сила отбражения, которая стремится оттолкнуть эти дислокации от границ раздела фаз в матрицу компо-

зита. В результате при том же уровне концентрации дислокаций, что и в гомогенных материалах, число их скоплений у границ уменьшается, снижается концентрация в вершине скопления, облегчаются условия их релаксации.

Вывод. В мультифазном композите частицы "мелкого" компонента (матрица; частицы упрочняющей фазы, обедненные по оксиду) будут "заклиниться" между "крупными", уменьшая тем самым значение радиуса их контакта (в особенности при силовом СВС-компактировании – первичном структурообразовании).

При концентрации модельных частиц "крупного" компонента упрочняющей корундовой фазы композита меньше пороговой "крупные" частицы изолированы и радиус пятна контакта между ними равен нулю: $r_k = 0$. По достижении пороговой концентрации ($X_{кр} = X_{пор}$) возникает бесконечная непрерывная последовательность контактирующих "крупных" частиц (как в реальных СВС-металлокомпозитах).

В большинстве типов брони после Второй мировой войны лицевой слой цементованной брони обычно достигал твердости: меньшей -490, средней -640 высшей -700 единиц по Бринеллю, тыльный слой достигал средних твердостей 220-240 по Бринеллю. Твердость гомогенной брони составляла в среднем 200-240 единиц по Бринеллю, в некоторых случаях понижаясь и до 190. Подобное соотношение твердостей позволяло реализовать «пружинный эффект», но, по нашему мнению, не более чем на 35-40 %. В настоящее время «пружинный эффект» сопротивляемости брони учитывается по коэффициенту *ARMOR QUALITY (AQ)* по данным полигонных испытаний (Наган Окун).

Этот коэффициент вызывает множество сомнений так как не описывает всех возможных вариантов взаимодействия снаряда с броней, не описывает всех применявшихся типов бронебойных снарядов, однако может приниматься как усредненное справочное значение для примерной оценки ударостойкости типов брони. Стоит сказать, что в данном коэффициенте опускается упоминание о механических свойствах броневой стали, просто по той причине, что манипуляция такими цифрами значения не имеет, так как конкретная броня (броня конкретной выделки, зависящей от соблюдения технологии, проверочных испытаний партий брони, а также условий выпуска, например военное время и крайняя необходимость сдать заказ) может иметь совершенно различные механические свойства.

Список использованных источников

1. R. P. Hunnicutt. Patton. A History of American Main Battle Tank Volume I. — 1st ed. — Novato, CA: Presidio Press, 1984. — P. 123. — 464 p. — ISBN 0-89141-230-1
2. Interaction of Projectiles and Composite Armor." Part II, AMMRC CR 69-15, August 1969 на сайте www.dtic.mil
3. «Study and Design of Armored Aircrew Crash Survival Seat». USAAVLABS Technical Report 67-2. March 1967
4. Материалы Всемирной Сети www