

РАЗРАБОТКА ПУЛЕСТОЙКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОКОН НА ОСНОВЕ САПФИРА ДЛЯ УКРАИНСКОЙ БРОНЕТЕХНИКИ

Постановка проблемы. Задача усовершенствования конструкции прозрачной брони является чрезвычайно актуальной, так как её применение позволит значительно повысить защищённость бронетехники, где будет применяться прозрачная броня, и уменьшить её общий вес. Одновременно может решаться задача по повышению пулестойкости прозрачной брони боевых машин сухопутных войск, чтобы выдерживать попадание более сильных средств поражения, например, пуль калибром 12,7мм с металлокерамическим (WC) сердечником.

Анализ последних достижений. В развитых странах мира в последние годы активно разрабатывается прозрачная броня на основе сверхтвёрдых материалов (оптической нанокерамики магний-алюминиевой шпинели, материала ALON и кристаллов сапфира) [1,2]. Рядом стран (США, Франция, Чехия, Словакия, Россия) проводятся НИОКР по разработке более эффективной прозрачной брони, обладающей при сохранении достигнутого уровня противопульной стойкости меньшей массой и толщиной, и базирующейся на принципе построения комбинированной брони с высокотвёрдым лицевым слоем. Перспективным материалом для прозрачной брони является искусственный монокристаллический сапфир. Одной из известных компаний, представляющих разработки в этом направлении, является Saint-Gobain (США).

При создании высокоэффективной прозрачной брони применяются также другие прозрачные поликристаллические материалы. Одним из лидирующих материалов такого рода является ALON (оксинитрид алюминия $Al_{23}O_{27}N_5$), запатентованный армией США. Его разработку провела компания Raytheon, а производит Surmet Corporation (обе фирмы из США). ALON по свойствам приближается к лейкосапфиру и может служить ему альтернативой.

Подходящим материалом для прозрачной брони может быть также нанокерамическая шпинель ($MgAl_2O_4$), обладающая кубической кристаллической структурой. Прозрачная шпинель производится методом горячего спекания и изостатического прессования (ГИП). Промышленное производство шпинели освоено двумя американскими фирмами – Technology Assessment and Transfer и Surmet Corporation.

Целью настоящей статьи является оценка возможности применения многослойных окон на основе сапфира для украинской бронетехники.

Основная часть. Хотя за последние годы в производстве вышеперечисленных материалов достигнуты значительные успехи, остаётся несколько важных проблем. Среди них – доступность производства, возможность изготавливать изделия необходимой формы и размеров, а также высокая стоимость.

Ранее было показано [3], что применение сапфира значительно повышает класс защиты окон бронетехники, не увеличивая вес и толщину конструкции. В настоящее время в Институте монокристаллов НАН Украины развиты методы выращивания кристаллов искусственного сапфира (метод Степанова и метод горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК)), что позволяет использовать этот материал при усовершенствовании структуры прозрачной брони для украинской бронетехники.

Сапфир является уникальным материалом с высокой твердостью. Он характеризуется в 3-5 раз большей твердостью по сравнению с упрочненным стеклом и может эффективно противостоять современным пулям со сверхтвердыми сердечниками. Применение сапфира в структуре прозрачной брони позволяет уменьшить массу и толщину окон бронетехники без снижения их пулестойкости, что обеспечивает соответствие конструкции образцов бронетехники стандартам НАТО (рис.1). Разработка усовершенствованной структуры прозрачной брони может существенным образом повысить защиту смотровых окон бронетехники, например, от пуль калибром 12,7 мм.



Рис. 1. Сравнение обычного бронестеклянного пакета и прозрачной брони на основе сапфира с одинаковым классом защиты (слева), расстрелянный бронемобиль "Когуар" с окнами из бронестекла (справа)

Целью данной работы является усовершенствование конструкции прозрачной брони для уменьшения веса и толщины окон бронетехники без снижения пулестойкости.

Как известно, основными критериями сопротивления высокоскоростному удару являются: 1) твердость и трещиностойкость материала; 2) характер фрагментации материала; 3) условия затухания ударных волн. Исходя из этого были сформулированы следующие задачи: 1) разработать пути упрочнения сапфировых элементов в структуре прозрачной брони; 2) оптимизировать конструкцию бронепакета с целью увеличения прочности и трещиностойкости остальных слоев в зависимости от характера их непосредственного взаимодействия с пулей; 3) рассмотреть воздействие продольных и поперечных ударных волн на прозрачную броню, установить условия и разработать конструкцию бронепакета, обеспечивающую максимальное затухание данных волн.

Упрочнение сапфира является актуальной задачей, так как, несмотря на высокую твердость, сапфир является хрупким материалом. Как правило, технические и методологические аспекты решения этой задачи практически отсутствуют в открытой печати. Работа по упрочнению сапфира велась в двух направлениях: повышение трещиностойкости за счет отжига элементов в различных средах и оптимизация степени обработки поверхности.

В качестве сапфировых элементов прозрачной брони были выбраны кристаллы призматической ориентации, где расположена базисная система легкого скольжения, полученные как методом Степанова, так и ГНК при оптимально подобранных градиентах температуры в зоне роста, что позволяло минимизировать возникновение термиче-

ских напряжений. Снижение оставшихся внутренних напряжений в сапфировых элементах обеспечивалось дополнительным высокотемпературным отжигом в вакууме. В результате такого отжига происходит процесс диффузии структурных дефектов к поверхности, что снижает внутренние остаточные напряжения в объеме.

Известно [4], что окислительно-восстановительный потенциал среды отжига может влиять на прочностные свойства сапфира. Поскольку износостойкость (скорость износа) характеризует прочностные свойства материала, были проведены эксперименты по определению влияния среды отжига на скорость износа сапфира. Образцы диаметром 13мм, толщиной 5мм отжигали при разных условиях. Затем их обрабатывали свободным или связанным абразивом (80...28мкм) на станке ЗШП-350М при скорости вращения шпинделя 100 об/мин с различным нагружением. Скорость износа контролировали с помощью индикатора (цена деления 1 мкм). Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость скорости износа сапфира (мм/ч) от среды отжига

Тип абразива	Свободный абразив, карбид бора N4			Связанный абразив, АСМ80/63	
	Среда отжига				
	Нагружение×10 ⁻² , кг/мм ²				
	3	7	11	3	5
Вакуум (P ₀ =1·10 ⁻² Па)	1,58	3,205	4,485	8,685	12,793
СО+СО ₂ (P ₀ =1·10 ⁻⁷ Па)	1,5	2,947	3,8	8,25	11,73
Отжиг на воздухе (P ₀ =1·10 ⁴ Па)	1,64	3,075	4,41	8,52	12,44
Отжиг в потоке водорода (продувка)	1,356	2,53	2,955	7,5	10,98

Показано, что окислительно-восстановительный потенциал среды отжига может изменить износостойкость сапфира в 1,2 раза (табл. 1).

Из таблицы видно, что наибольшая износостойкость, а значит и наибольшие прочностные характеристики поверхности, наблюдается после отжига в водороде. Такой эффект объясняется насыщением приповерхностной области сапфира атомами водорода, в результате чего происходит образование водородных связей, что увеличивает общую энергию межатомных связей в решетке. Кроме того, происходит образование активаторно-вакансионных комплексов, которые являются стопорами распространения трещин. Наилучший эффект увеличения прочности сапфира наблюдался при последовательном отжиге в вакууме и водороде. Прочность сапфира увеличивалась более чем на 50%.

Еще более существенное влияние на прочность сапфировых элементов имеет состояние поверхности изделий. Это связано с минимизацией дефектного приповерхностного слоя в процессе полирования образцов [4] и, соответственно, уменьшением концентраторов микротрещин, которые в процессе взаимодействия с пулей служат источниками возникновения трещин.

В результате исследований было показано, что глубина дефектного приповерхностного слоя, которая определялась методом травления, составляет для шлифованных образцов – 40...45 мкм, а для полированных до $R_z=0,05$ мкм – 5...7 мкм. Полученные данные свидетельствуют о необходимости применения финишной химико-механической полировки сапфировых элементов, которая позволяет существенно снизить количество микроцарапин, образованных абразивом (так называемый алмазный фон на поверхности), до минимума. Следует отметить, что в процессе химико-механической полировки также убираются дополнительные стопоры трещин (дислокации), что незначительно снижает трещиностойкость сапфира.

В результате проведенных экспериментов был подобран оптимальный режим финишной химико-механической полировки, отвечающий максимальному повышению прочностных характеристик сапфировых элементов. Граница прочности полированных образцов после отжига в водороде выше на 60-70%, чем аналогичных шлифованных.

Следующая задача – оптимизация конструкции бронепакета – решалась как расчетным, так и опытным путем. Вследствие сложности описания высокоскоростного процесса проникновения пули в многослойную преграду применялись совместные расчетные и экспериментальные методы исследований. По результатам предварительного анализа взаимодействия пули с преградой были изготовлены несколько образцов разной конструкции (с минимальным и максимальным запасом прочности) и проведены пулевые испытания. По результатам испытаний (по характеру и сложности повреждения) проводился расчет прочности конструкции прозрачной брони. Расчет проводился на основе математического моделирования с учетом геометрических, физических и механических характеристик пули (масса, скорость, длина, диаметр и форма меридиана, модуль упругости, граница прочности или граница текучести, твердость), а также характеристик каждого из слоев пакета (плотность, модуль упругости, граница прочности, твердость). Основными критериями для расчета являлись: 1) усиление прочностных характеристик бронестекла с одновременной минимизацией фрагментации; 2) максимальное затухание ударных волн.

В результате расчета была предложена окончательная конструкция бронепакета для окон бронетехники, соответствующая классу защиты СК6 (ДСТУ 4546:2006). Мы считаем, что усовершенствованная структура прозрачной брони имеет следующие преимущества по сравнению со стандартными бронепакетами из бронестекла:

– оптимизированные форма и размер сапфировых элементов, их соединение через ПВБ-пленку улучшает прозрачность и увеличивает гашение кинетической энергии пули при увеличенной плоскости сапфирового сегмента за счет упругой деформации и работы на разрушение, а также снижает действие продольных ударных волн в сапфировом слое и препятствует распространению трещин в соседние сегменты этого слоя;

– подбор подходящих качественных марок стекла и применение для их упрочнения метода травления поверхности вместо термозакалки снижает фрагментацию материала без потери прочностных свойств;

– увеличение вдвое толщины клеевой прослойки между слоями бронестекла снижает действие поперечных ударных волн, а уменьшение толщины слоев бронестекла, соответственно, способствует увеличению скорости затухания продольных ударных волн, что повышает прочностные свойства всей конструкции в целом;

– применение поликарбоната с оптимальными прочностными и вязкостными свойствами обеспечивает лучшую защиту от разлета осколков стекла с тыльной стороны бронепакета.

Совместно с сотрудниками ГП «ХКБМ» были проведены пулевые испытания предложенной структуры бронепакета прозрачной брони размером 500x500x56мм с учетом требований ДСТУ 4546:2006 для класса защиты СК6.

Результаты испытаний (рис. 2) показали следующее:

- бронепакет на основе сапфира выдержал испытания пулевым обстрелом по пустойкостности;
- область прозрачности образца после трех выстрелов является недостаточной для обзора водителю при движении бронемашины.



Рис. 2. Общий вид образца прозрачной брони на основе сапфира размером 500x500x56мм до (слева) и после (справа) пулевых испытаний, проведенных сотрудниками ГП «ХКБМ» согласно требований ДСТУ 4546:2006

Следует отметить, что поскольку данная конструкция еще не оптимизирована по необходимой прозрачности окна после обстрела, а также не имеет достаточного запаса прочности для защиты от пули калибром 12,7 мм, что также является актуальной задачей, необходимы дальнейшие исследования в этом направлении.

ВЫВОДЫ. 1. Применение сапфирового слоя в качестве основной составляющей защиты в конструкции прозрачной брони приведет к уменьшению веса и толщины бронепакета без снижения класса защиты.

2. Проведенное улучшение прочностных характеристик сапфировых элементов, включающее термический отжиг и обработку поверхности, увеличивает сопротивление проникновению последующих пуль при ослаблении конструкции бронепакета после первого попадания, что дает дополнительный запас прочности для конструкции прозрачной брони.

3. Уменьшение фрагментации в результате примененной обработки поверхности бронестекол не ухудшило прочностные свойства данных слоев, однако большая область повреждения при попадании пули не позволяет сохранить необходимую часть прозрачности окна для обзора.

4. Применение моделирования для анализа поведения материала преграды при высокоскоростном ударе позволило разработать новые пути решения проблемы по оптимизации конструкции прозрачной брони.

Литература: 1. J.Rioux, C.Jones, M.Mandelartz, V.Pluen. *Transparent armor // Advanced materials and processes, 2007, V.10, P.31-33.* 2. D. Galusek: „Advanced sintering methods for preparation of nanostructured ceramics“, VI Konferencja Polskiego Towarzystwa Ceramicznego, Zakopane, 2007. 3. В.М. Пузиков, Л.А. Литвинов. Прозрачная броня и перспективы ее применения в украинской бронетехнике. – *Вестн. НАН Украины.* – 2015. – №2, с.58-62. 4. Е.Р. Добровин-

ская, Л.А. Литвинов, В.В. Пищик. *Энциклопедия сапфира.* – Х.: Институт монокристаллов НАНУ.– 2004. – 510 с.

Bibliography (transliterated): 1. J.Rioux, C.Jones, M.Mandelartz, V.Pluen. *Transparent armor // Advanced materials and processes, 2007, V.10, P.31-33.* 2. D. Galusek: „Advanced sintering methods for preparation of nanostructured ceramics“, VI Konferencja Polskiego Towarzystwa Ceramicznego, Zakopane, 2007. 3. V.M. Puzikov, L.A. Litvinov. *Prozrachnaya bronya i perspektivy ee primeneniya v ukrainskoj bronetehnikе.* – Vestn. NAN Ukrainy. – 2015. – №2, s.58-62. 4. E.R. Dobrovinskaya, L.A. Litvinov, V.V. Pishchik. *EHnciklopediya sapfira.* – H.: Institut monokristallov NANU.– 2004. – 510 s.

Гринь Л.А., Притула И.М., Дураченко В.В., Костин Ю.Н.

РАЗРАБОТКА ПУЛЕСТОЙКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОКОН НА ОСНОВЕ САПФИРА ДЛЯ УКРАИНСКОЙ БРОНЕТЕХНИКИ

Разработана новая структура прозрачной брони для окон бронетехники по классу защиты СК6 (ДСТУ 4546:2006) с применением сверхтвердого сапфирового слоя в конструкции бронепакета. Исследовано влияние условий отжига на прочностные свойства сапфира. Показано увеличение прочности более чем на 50% при двух стадийном отжиге в вакууме и водороде. Оптимизированы условия химико-механической полировки поверхности сапфировых пластин для максимального повышения прочностных характеристик образцов. По результатам экспериментов и математического моделирования проведена оптимизация конструкции бронепакета на основе сапфира, которая на 25-30% легче и меньше по толщине в сравнении с бронестеклянной конструкцией с аналогичным классом защиты.

Гринь Л.А., Притула И.М., Дураченко В.В., Костин Ю.Н.

РОЗРОБКА КУЛЕСТІЙКИХ БАГАТОШАРОВИХ ВІКОН НА ОСНОВІ САПФІРА ДЛЯ УКРАЇНСЬКОЇ БРОНЕТЕХНІКИ

Розроблено нову структуру прозорої броні для вікон бронетехніки по класу захисту СК6 ДСТУ 4546:2006 із застосуванням надтвердого сапфірового шару в конструкції бронепакету. Досліджено вплив умов відпалу на міцнісні властивості сапфіра. Показано збільшення міцності більш ніж на 50% при двох стадійному відпалі у вакуумі та водні. Оптимізовано умови хіміко-механічного полірування поверхні сапфірових пластин для максимального підвищення міцнісних характеристик зразків. За результатами експериментів та математичного моделювання проведена оптимізація конструкції бронепакета на основі сапфіра, яка на 25-30% легша та менша за товщиною в порівнянні з бронестекляною конструкцією з аналогічним класом захисту.

L. Grin', I. Pritula, V. Durachenko, Yu. Kostin

DEVELOPMENT OF BULLET-PROOF MULTILAYER WINDOWS BASED ON SAPPHIRE FOR UKRAINIAN ARMoured TRANSPORT VEHICLES

Developed is a new structure of transparent armor for windows of armoured transport vehicles of SK6 level of protection (DSTU 4546:2006) using super-hard sapphire layer. The influence of annealing conditions on the strength properties of sapphire is studied. It is shown that the strength rises by more than 50% at two-stage annealing in vacuum and hydrogen. The conditions of chemico-mechanical polishing of the surface of sapphire plates are optimized to achieve maximum increase of the strength characteristics of the samples. The results of experiments and mathematical simulation of the structure of armor packet based on sapphire have made it possible to optimize the structure of the sapphire-based armor packet and to reduce its weight (by 25-30%) and thickness in comparison with those of armor glass packet of the same level of protection.