

УДК 620.17:623.445

А.В. Лавров¹, Н.О. Яковлев¹, В.С. Ерасов¹

К ВОПРОСУ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ИНДЕНТОРА

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-88-94

Рассмотрены данные из открытых российских и зарубежных источников о механизмах разрушения керамических материалов при соударении с высокоскоростным высокотвердым индентором. Показано, что при воздействии инденторов, аналогичных по своим характеристикам бронебойным пулям ручного стрелкового оружия, на начальной стадии соударения происходит пластическая деформация и разрушение керамики в локальном объеме непосредственно под площадкой контакта «керамика–индентор». Проанализировано влияние различных физико-механических свойств керамических материалов на их функционирование в составе защитных композиций. Рассмотрено влияние конструктивных особенностей преград на характер функционирования керамического слоя. Обоснована необходимость проведения дальнейших исследований механизмов разрушения керамических преград при воздействии высокоскоростного индентора.

Ключевые слова: керамические материалы, броневые материалы, механизм разрушения, физико-механические свойства, оксид алюминия, карбид кремния, баллистические испытания.

A.V. Lavrov¹, N.O. Yakovlev¹, V.S. Erasov¹

DESTRUCTION OF CERAMIC MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF HIGH-SPEED INDENTER

The article considers data from open Russian and foreign sources on the mechanisms of destruction of ceramic materials at the impact of a high-speed high-hard indenter. It is shown that under the influence of indenters, which are similar in their characteristics to armor-piercing bullets of hand-held firearms, plastic deformation and destruction of ceramics in the local volume directly under the ceramic-indenter contact surface occurs at the initial stage of the impact. The influence of various physical and mechanical properties of ceramic materials on their functioning as a part of protective compositions is analyzed. The influence of structural features of armored barriers on the nature of the functioning of the ceramic layer is considered. The necessity of further studies of the mechanisms of destruction of ceramic barriers under the action of a high-speed indenter is substantiated.

Keywords: ceramic materials, armor materials, the mechanism of destruction, mechanical properties, alumina, silicon carbide, ballistic tests.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Керамические материалы благодаря своим уникальным свойствам находят широкое применение в различных областях техники, в том числе в авиационной промышленности [1–6]. Одним из наиболее важных направлений использования керамических материалов являются системы бронезащиты военной и специальной техники, а также средства индивидуальной защиты личного состава Вооруженных сил и специальных служб [7–9]. Для повышения эффективности защитных структур с керамическими элементами разработчикам бронепреград необходимо иметь данные как о взаимосвязи физико-механических свойств керамического материала и баллистических характеристик бронезащитного элемента из данного материала, так и о механизмах разрушения

керамики в условиях ударного воздействия. В статье представлен анализ данных из открытых российских и зарубежных источников о процессах, протекающих в керамических материалах при соударении с высокоскоростными высокотвердыми инденторами, а также о взаимосвязи стойкости преград к воздействию высокоскоростных инденторов с физико-механическими свойствами входящих в состав преграды керамических материалов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10, 11].

Материалы и методы

Рассмотрим сопротивление сплошной среды прониканию высокоскоростного индентора. Под высокоскоростным индентором далее будем понимать цилиндрический стержень из стали, аналогичный по геометрическим характеристикам и физико-механическим свойствам сердечнику бронебойной пули ручного стрелкового оружия [9] и обладающий соответствующей кинетической энергией.

Согласно работе [12], в случае пластической сжимаемой среды сила ее сопротивления прониканию твердого тела определяется формулой:

$$F = F_1 + F_2 + F_3, \quad (1)$$

где F_1 – сила сопротивления в результате инерции вещества сплошной среды, пропорциональная квадрату скорости проникания; F_2 – сила сопротивления сплошной среды, линейно зависящая от скорости проникания; F_3 – сила статического сопротивления сплошной среды, определяемая ее прочностными характеристиками и не зависящая от скорости проникания [12].

В более общем случае F_2 состоит из сопротивления деформации в результате деформационного упрочнения, вязкого течения, а также разупрочнения в результате релаксационных процессов [13]. Таким образом, сила сопротивления среды прониканию определяется силами инерции ее вещества и силами сопротивления, которые определяются физико-механическими свойствами данного вещества (материала преграды).

Объединяя F_2 и F_3 в одно слагаемое H_d , приходим к модифицированному уравнению Бернулли [12, 14]:

$$P_m = H_d + k\rho v^2, \quad (2)$$

где H_d – динамическая твердость материала преграды, Па; ρ – плотность материала преграды, кг/м³; v – скорость соударения, м/с; k – коэффициент формы головной части индентора.

Данная зависимость, известная также как формула ЛФТИ им. Иоффе [15] или формула Алексеевского–Тейта [16], характеризует сопротивление среды P_m полубесконечной преграды внедрению индентора в ее поверхностные слои и прониканию на глубину менее диаметра индентора при $v=100-1000$ м/с [14].

На основании формулы (2) можно сделать выводы как о возможности использования данного материала в составе бронепреграды, так и о состоянии индентора при соударении с данной преградой в исследуемом диапазоне скоростей.

Для оценки величины H_d керамических материалов рассмотрим влияние скорости нагружения на их свойства. Известно [17], что данные материалы при стандартных кратковременных статических испытаниях на растяжение, изгиб и одноосное сжатие, как правило, разрушаются без предварительной пластической деформации. Ряд авторов сообщает, что данный характер разрушения

керамических материалов распространяется и на случай высокоскоростного нагружения. Так, по данным работы [17], характеристики динамической прочности керамики не зависят от скорости нагружения и идентичны ее статическим прочностным характеристикам, по крайней мере – при комнатной температуре. В работе [18] сообщается, что керамические материалы разрушаются без признаков макроскопической пластической деформации при скоростях соударения до 730 м/с. Авторы работы [19] не выявили релаксационных процессов при ударно-волновом нагружении материалов на основе карбида кремния.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что для керамических материалов при скоростях нагружения, характерных для случаев поражения из ручного стрелкового оружия, слагаемое F_2 в формуле (1) равно нулю, и для оценки баллистических характеристик данных материалов в первом приближении можно использовать значения статической твердости.

Оценим величину P_m для стального индентора по формуле (2). Согласно работе [20], динамическая твердость стали, обработанной на высокую статическую твердость, находится на уровне 5 ГПа. С учетом инерционной составляющей величина контактного давления в стальном инденторе не превышает 10 ГПа, что приблизительно в 2 раза меньше, чем твердость керамики на основе оксида алюминия, и в 3 раз меньше, чем твердость карбида бора [21].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно заключить, что внедрения стального термоупрочненного индентора в керамический слой преграды происходить не должно вплоть до того момента, пока не произойдет разрушение керамики в результате каких-либо сопутствующих удару процессов. Данное утверждение имело место в самых первых работах по баллистической керамике [22] и поддерживается многими авторами до настоящего времени [15, 21, 23, 24].

Рассмотрим механизм разрушения керамики при ударе высокоскоростного индентора, описанный в работах [22, 23]. В начальный момент удара вблизи вершины индентора в поверхностных слоях керамического элемента формируется коническая трещина, которая развивается вглубь керамики. Одновременно с этим начинает разрушаться («срабатываться») заостренная вершина индентора, контактирующая с керамическим элементом, в то время как его задний торец продолжает движение в первоначальном направлении с понижением скорости. При этом происходит значительное уменьшение кинетической энергии индентора в результате потери массы его головной части и снижения его скорости. На данной стадии индентор не внедряется в преграду, а происходит его торможение (задержка) на неразрушенной лицевой поверхности керамического элемента. Размеры конуса разрушения ограничивают

объем керамики, который участвует в передаче нагрузки на тыльный слой преграды – подложку. Через некоторое время подложка (металлическая пластина или пластина из композиционного материала) начинает воспринимать сжимающую нагрузку, передаваемую керамическим конусом, и прогибается, что приводит к появлению волн разгрузки с растягивающими напряжениями на тыльной поверхности керамического элемента. В результате этого на данной поверхности формируются осевые трещины, распространяющиеся как в плоскости элемента, так и в направлении его лицевой поверхности, и приводящие к разрушению всего материала керамического конуса. После множественного разрушения внутри конуса задняя часть индентора может проникать сквозь фрагменты разрушенной керамики, не встречая сопротивления. На рис. 1 представлена последовательность разрушения керамического слоя по данным работы [22].

В то же время, ряд авторов сообщает о пластической деформации и разрушении керамики в результате действия сжимающих напряжений в начальный момент удара. Как правило, данные явления связаны с достижением определенной величины сжимающих напряжений или имеют место при ударных скоростях, значительно превышающих скорости, характерные для ручного стрелкового оружия [24].

Так, в работе [19] указывается на значительное деформационное упрочнение SiC в условиях сжатия при напряжениях выше динамического предела упругости. В работах [25, 26] сообщается о снижении сопротивления керамики сдвигу и образовании разрушений в прямой волне сжатия для скоростей удара, превышающих некоторую критическую величину (3–7 км/с – по данным работы [26]). В работе [27] отмечается, что различные керамические материалы разрушаются в результате сжатия при давлениях как ниже, так и выше гюгониевского предела упругости, причем за гюгониевским пределом упругости сопротивление деформации у карбида бора уменьшается, у оксида и нитрида алюминия остается приблизительно постоянным, а у карбида кремния и диборида титана возрастает с увеличением деформации.

В последнее время, благодаря значительно возросшим за прошедшие полвека возможностям исследовательского оборудования, показано, что внедрение индентора в неразрушенную керамику, сопровождающееся ее пластическими деформациями, имеет место не только для описанных ранее случаев сверхвысоких скоростей и давлений, но наблюдается также и в условиях поражения из ручного стрелкового оружия. При этом механизм взаимодействия высокоскоростного индентора и керамического элемента отличается от описанного

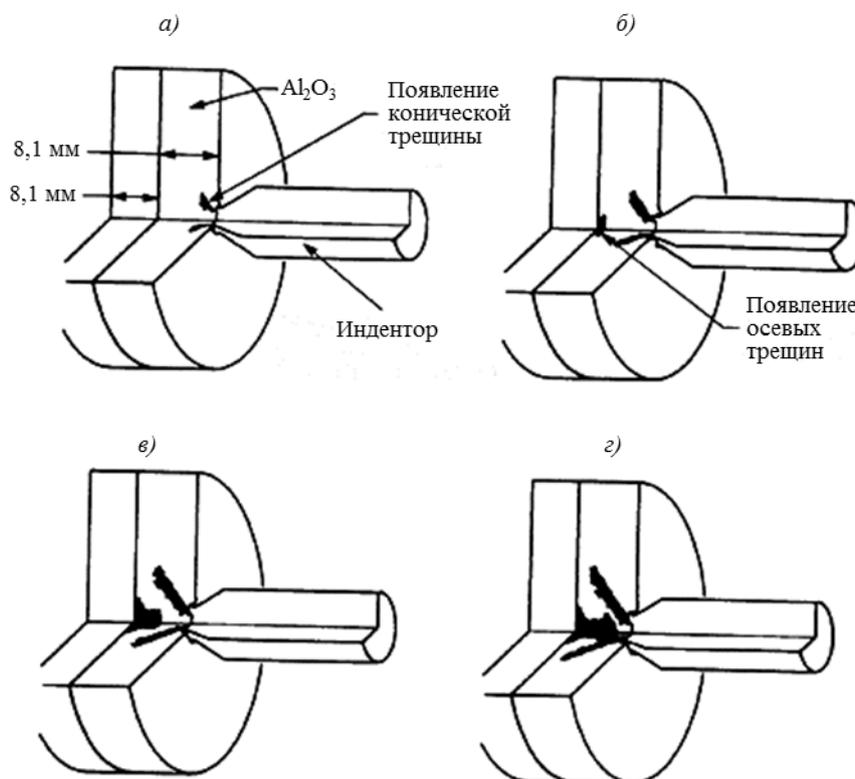


Рис. 1. Стадии развития разрушения в керамическом слое бронеконпозиции при воздействии стального индентора калибра 7,62 мм с ударной скоростью 1000 м/с [22]:

а – начало образования конической трещины; *б* – начало деформации подложки и появления осевых трещин; *в, з* – развитие разрушения в объеме конуса

в работах [22, 23] и от выводов, которые сделаны ранее на основе анализа формулы (2).

Так, по данным работы [28], пластические деформации и микротрещины в керамическом элементе имеют место непосредственно под площадью контакта с высокоскоростным индентором, т. е. в области действия сжимающих напряжений. В работе [29] на различных вариантах карбидокремниевой бронекерамики получено, что на стадии торможения происходит внедрение сердечника пули в слой керамики, но скорость перемещения головной части сердечника составляет малую часть от скорости перемещения на следующей стадии. Продолжительность стадии торможения составляет от 10 до 25 мкс для пластины SiC толщиной 12 мм (бронебойная пуля калибра 7,62 мм со стальным сердечником, соударение по нормали, средняя ударная скорость 841 м/с), а глубина внедрения на данной стадии при стальной или алюминиевой подложке составляет ~1 мм. Вторая стадия представляет собой проникание фрагмента задней части пули сквозь диспергированную керамику. Скорость движения головной части сердечника на стадии торможения составляет 30–40 м/с, на стадии проникания сквозь раздробленную керамику – от 190 до 330 м/с для подложек из алюминиевого сплава и стали толщиной 8,0 и 8,5 мм соответственно [29].

В работе [30] сообщается, что на начальной, волновой стадии взаимодействия на поверхности контакта стального индентора и керамической преграды развиваются весьма высокие контактные напряжения. Например, при скорости соударения 1000 м/с бронебойной пули калибра 7,62 мм с преградой, состоящей из лицевого слоя Al_2O_3 толщиной 8,1 мм, опирающегося на подложку из алюминиевого сплава толщиной 6,4 мм, величина контактных напряжений на этой стадии составляет ~19 ГПа. Этого, по мнению авторов работы [30], достаточно для разрушения некоторого объема керамики непосредственно под индентором. По окончании волновой стадии контактные напряжения снижаются на порядок, в результате чего дальнейшее дробление керамики под индентором прекращается. Таким образом, дробление керамики происходит в начале стадии торможения пули и совпадает с периодом начала образования конической трещины. Измельчение керамических фрагментов в результате совместного действия сжимающих и сдвиговых напряжений непосредственно под индентором имеет место также и на второй стадии (проникание сквозь диспергированную керамику) [28]. На рис. 2 показана последовательность стадий взаимодействия индентора с преградой на основе керамики по данным работы [30].



Рис. 2. Стадии взаимодействия высокоскоростного индентора с преградой на основе керамики [30]

Следует отметить, что авторы работы [21] также указывают на возможность разрушения керамики непосредственно под индентором на стадии неустановившегося волнового процесса, но в результате действия растягивающих напряжений. Появление последних возможно из-за возникновения волн разгрузки при дроблении головной части индентора.

Результаты и обсуждение

Таким образом, поскольку процесс взаимодействия высокоскоростного индентора с керамическим слоем защитной преграды имеет чрезвычайно сложный механизм, описать его с помощью простой модели, связывающей механические свойства керамического материала и его баллистическую эффективность, не представляется возможным.

Согласно работе [30], продолжительность действия максимальных напряжений, вызывающих появление деформаций в керамическом слое, составляет ~2 мкс. Для данного периода времени с учетом критерия инкубационного времени разрушения [31] следует ожидать многократного повышения прочностных характеристик керамического материала. Так, согласно работе [32], для карбида кремния и оксида алюминия прочностные характеристики возрастают в 2,5 раза при увеличении скорости деформации с 10^{-2} с^{-1} , соответствующей статическим испытаниям, до 10^5 с^{-1} , соответствующей соударению с высокоскоростными инденторами [33]. По данным работы [18], повышение характеристик прочности в 2 раза по сравнению с результатами статических испытаний на карбиде кремния происходит уже при скорости соударения 270 м/с (пластина толщиной 10 мм, круговой изгиб сферическим бойком). С учетом значительного возрастания прочностных характеристик керамики на начальной стадии торможения следует ожидать заметного вклада процессов деформации и разрушения в керамическом материале на данной стадии в энергетический баланс индентора.

Таким образом, при оценке кинетической энергии индентора, переходящей в работу разрушения керамического слоя, следует учитывать деформацию и разрушение керамики на стадии торможения (приблизительно 20 мкс с момента касания индентора и керамики), в частности – на стадии неустановившегося волнового процесса (приблизительно 2 мкс с момента касания индентора и керамики). С учетом недостатка информации о механизмах деформации и разрушения в этом периоде взаимодействия [21, 28–30] разработка подобных моделей в настоящее время крайне затруднительна.

Ряд авторов [15, 28, 33, 34] также указывают на невозможность однозначного определения зависимости баллистических свойств керамиче-

ских материалов от каких-либо физико-механических свойств керамики.

В то же время для однотипных керамических материалов можно выделить основные физико-механические свойства, улучшение которых будет способствовать повышению эффективности функционирования керамики в составе защитных систем.

Так, сообщается о положительном влиянии на стойкость керамических преград следующих характеристик: твердости [10, 15, 28, 33–37], прочности при сжатии [15, 33–35], прочности при изгибе [15, 28, 35, 36], трещиностойкости [15, 28, 33, 35–37], модуля упругости [28, 33, 34, 37].

Важную роль играет получение керамических материалов с минимальной пористостью [28, 34]. По данным работы [24], при значении пористости 5% сопротивление внедрению (H_d) карбидокремниевой керамики уменьшается в ~2 раза по сравнению с беспористым материалом. В работе [19] также показано, что при увеличении плотности SiC с 3,09 до 3,2 г/см³ динамический предел упругости возрастает с 8 до 16 ГПа.

Предел прочности керамики при растяжении также считается важным параметром, влияющим на стойкость композиции с керамическим слоем, поскольку чем выше предел прочности при растяжении, тем продолжительнее стадия торможения, на которой происходит основное срабатывание индентора [22, 23]. Аналогичным образом влияет жесткость подложки, препятствующей прогибу керамической пластины, в результате которого инициируется тыльное растрескивание керамики [15, 22, 25, 27, 30, 38], а также наличие остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое с тыльной стороны керамической пластины [22].

О благоприятном влиянии на стойкость композиций с керамическим слоем сопротивления сдвигу фрагментированной керамики упоминают авторы работ [33, 38]. Авторы работ [22, 33, 35] считают, что благодаря наложению радиальных сжимающих напряжений можно увеличить прочностные характеристики раздробленной керамики и таким образом повысить сопротивление прониканию индентора, а также дополнительно увеличить степень срабатывания его головной части. Кроме того, наложение сжимающих напряжений препятствует развитию конической трещины [27], что благоприятно влияет на продолжительность стадии торможения. Данное положение находится в полном соответствии с имеющимися данными о росте прочностных и пластических характеристик хрупких материалов при наложении напряжений гидростатического сжатия [39].

Сообщается также о благоприятном действии жестких лицевых слоев, препятствующих обратному выбросу раздробленной керамики и радиальному смещению фрагментов керамической пластины [10, 15, 28, 38], что эквивалентно наложению сжимающих напряжений на керамический слой.

Заклучения

Таким образом, разработка математических моделей, связывающих физико-механические свойства керамических материалов с их функционированием в защитных композициях, представляет собой чрезвычайно трудную задачу. Поэтому наиболее адекватными в настоящее время следует признать простые эмпирические модели – как, например, предложенная авторами работы [8] модель, связывающая стойкость керамической преграды с массой керамики в объеме конической трещины.

С учетом вышеизложенного представляется целесообразным проведение дальнейших исследований как в области механизмов деформации и разрушения керамических материалов при воздействии высокоскоростного индентора, так и по оценке влияния физико-механических характеристик керамики, ее химического состава, технологии изготовления, а также конструктивного оформления преграды с керамическим слоем на эффективность ее функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники // *Стекло и керамика*. 2012. №4. С. 7–11.
2. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
3. Ивахненко Ю.А., Варрик Н.М., Максимов В.Г. Высокотемпературные радиопрозрачные керамические композиционные материалы для обтекателей антенн и других изделий авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №5. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-5-5.
4. Сорокин О.Ю., Гращенков Д.В., Солнцев С.С., Евдокимов С.А. Керамические композиционные материалы с высокой окислительной стойкостью для перспективных летательных аппаратов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8.
5. Бучилин Н.В., Люлюкина Г.Ю., Варрик Н.М. Влияние режима обжига на структуру и свойства высокопористых керамических материалов на основе муллита // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №5. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-4-4.
6. Бучилин Н.В., Прагер Е.П., Ивахненко Ю.А. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики шликеров для получения пористых керамических материалов на основе оксида алюминия // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-6-6.
7. Ерасов В.С., Лавров А.В., Луценко А.Н., Гриневич А.В. К вопросу взаимодействия термоупрочненного ударника с керамической преградой // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №2. С. 69–75. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-69-75.
8. Гриневич А.В., Ярош В.В. Особенности разрушения керамики при ударном воздействии // *Вопросы оборонной техники*. Сер.: 15. 1999. Вып. 1–2. С. 23–30.
9. Odanovich Z., Bobich B. Ballistic protection efficiency of composite ceramics/metal armours // *Scientific-Technical Review*. 2003. Vol. LIII. No. 3. P. 30–38.
10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
12. Сагомоян А.Я. Проникание (проникание твердых тел в сжимаемые сплошные среды). М.: Изд-во МГУ, 1974. 300 с.
13. Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова думка, 1979. 268 с.
14. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела // *Прикладная механика сплошных сред*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. Т. 2. 420 с.
15. Григорян В.А., Белобородько А.Н., Дорохов Н.С. и др. Частные вопросы конечной баллистики / Под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 592 с.
16. Балаганский И.А., Мерзиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 408 с.
17. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика. Пер. с англ. / Под ред. А.С. Власова. М.: Металлургия, 1980. 256 с.
18. Степанов Г.В., Зубов В.И., Майстренко А.Л. и др. Влияние скорости нагружения на прочность керамических материалов на основе самосвязанного карбида кремния // *Проблемы прочности*. 2010. №3. С. 79–88.

19. Савиных А.С., Канель Г.И., Разоренов С.В., Румянцев В.И. Эволюция ударных волн в керамике SiC // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 43–47.
20. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. Средства поражения и боеприпасы: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
21. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. М.: РадиоСофт, 2008. 406 с.
22. Wilkins M.L. Third progress report of light armor program. Lawrence Radiation Laboratory. University of California, Livermore, 1968. P. 58.
23. Rozenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 323 p. DOI 10.1007/978-3-642-25305-8.
24. Власов А.С., Зильбербранд Е.Л., Кожушко А.А. и др. Высокоскоростное внедрение в SiC-керамику с различной пористостью. Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 62–65.
25. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.
26. Кожушко А.А., Рыкова И.И., Синани А.Б. Сопротивление керамик внедрению ударяющего тела при высоких скоростях взаимодействия // Физика горения и взрыва. 1992. №1. С. 89–93.
27. Material modeling for terminal ballistic simulation / Ed. by J. Walter. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground (Maryland, USA), 1992. 84 p.
28. Rahbek D.B., Johnsen B.B. Dynamic behavior of ceramic armor systems. Norwegian Defence Research Establishment, Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), 2015. 45 p.
29. Strassburger E., Bauer S., Weber S., Gedon H. Flash X-ray cinematography analysis of dwell and penetration of small caliber projectiles with three types of SiC ceramics // Defence Technology. 2016. Vol. 12. P. 277–283.
30. The Science of Armour Materials. Edited by Ian G. Crouch. Woodhead Publishing, 2017. 715 p.
31. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб.: Изд-во С.Пб. ун-та, 1997. 132 с.
32. Евстифеев А.Д. Временные эффекты пластического деформирования и разрушения твердых тел при динамическом воздействии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. С.Пб., 2014. 102 с.
33. Clayton J.D., Kraft R.H., Leavy R.B. Mesoscale modeling of nonlinear elasticity and fracture in ceramic polycrystals under dynamic shear and compression // International Journal of Solids and Structures. 2012. Vol. 49. P. 2686–2702.
34. Fakolujo O.S. Characterisation and properties improvement of armour ceramics. University of Ottawa (Canada), 2016. 190 p.
35. Numerical simulation of ballistic impacts on ceramic material. A.P.T.M.J. Lamberts. MT07.33. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2007. 74 p.
36. Dateraksa K., Sujirete K., McCuiston R., Atong D. Ballistic performance of ceramic/S₂-glass composite armor // Journal of Metals, Materials and Minerals. 2012. Vol. 22. No. 2. P. 33–39.
37. Espinosa H.D., Brar N.S., Yuan G. et al. Enhanced ballistic performance of confined multi-layered ceramic targets against long rod penetrators through interface defeat // International Journal of Solids and Structures. 2000. Vol. 37. P. 4893–4913.
38. Lundberg P., Renström R., Andersson O. Influence of confining prestress on the transition from interface defeat to penetration in ceramic targets // Defence Technology. 2016. Vol. 12. P. 263–271.
39. Лавров А.В., Ерасов В.С., Ландик Д.Н. Об одном подходе к трактовке объединенной теории прочности Я.Б. Фридмана. // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-87-94.