

МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI 10.17223/19988621/67/7

Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, А.Ю. Саммель, Е.Ю. Степанов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПРОЗРАЧНОЙ БРОНИ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ¹

Предложена математическая модель поведения прозрачной брони в условиях высокоскоростного удара. В рамках данной модели проведен расчет ударного взаимодействия цилиндрического стального ударника с тремя типами мишеней из прозрачной брони одинаковой толщины. Первая двухслойная мишень выполнена из закаленного стекла и подложки из поликарбоната. Вторая и третья мишени трехслойные. Во второй мишени лицевой слой выполнен из ALONa, средний из закаленного стекла, нижний – из поликарбоната. В третьей мишени слой из ALONa заменен на слой из шпинели. Скорость удара 850 м/с.

Ключевые слова: *прозрачная броня, высокоскоростное взаимодействие, математическое моделирование.*

Прозрачная броня для военной и гражданской техники широко используется как в России, так и за рубежом. Кроме противопульной и противоосколочной стойкости броня должна обладать необходимым условием прозрачности и при этом быть как можно легче.

В настоящее время прозрачные защитные преграды, используемые для защиты от высокоскоростных осколков и пуль, это многослойная конструкция. Первый слой должен быть тверже ударника для разрушения его на начальном взаимодействии с преградой. Гюгониевский предел упругости должен превосходить возникающие на начальной стадии ударно-волновые явления в преграде. Силикатные стекла в такой конструкции находятся посередине, так как являются упруго-хрупкими. Последний слой должен сдерживать осколки, и сочетать в себе высокую прочность и жесткость с высокой стойкостью к ударным взаимодействиям. Такими качествами обладают поликарбонаты или оргстекла (ПМАА).

Пластины монокристалла лейкосапфира толщиной 4–8 мм в качестве лицевого слоя – это один из перспективных вариантов. При создании прозрачной брони использование лейкосапфира приводит к снижению массы такой конструкции. Есть два минуса использования пластин монокристалла лейкосапфира – это его стоимость, значительно превышающая стоимость других материалов и невозможность создания преград больших размеров. Разработка новых материалов, способных заменить лейкосапфир – одна из ведущих задач на данный момент.

¹ В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта НУ 8.2.09.2018 Л Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

Одним из таких материалов является ALON (оксид алюминия), запатентованный армией США [1].

В [2] представлены экспериментальные и теоретические результаты в области прочностных, кинетических и упруго-пластических свойств материалов разных классов при ударно-волновом нагружении. Проведен анализ расчетных моделей и экспериментальных результатов вязко-упруго-пластической деформации и разрушения материалов различных классов. Также в [2] представлены особенности силикатного стекла при ударно-волновом деформировании. Стекла и другие высокооднородные хрупкие материалы обладают специфической особенностью поведения, когда в них образуются волны разрушения при сжатии в области упругого деформирования.

Стекло дробится на мелкие блоки при напряжениях вблизи предела упругости. При дальнейшем деформировании они смещаются относительно друг друга. В результате этого изначально плоские поверхности стеклянных пластин становятся шероховатыми. На поверхности преграды имеются микротрещины, способные образовывать области разрушения, за счет которых и происходит дробление стекла.

Под действием девиаторных напряжений сетка трещин распространяется в глубь образца. Таким образом волна разрушения распространяется путем непрерывного роста зоны дробления в напряженном материале. Эксперименты с волнами сжатия различной интенсивности указывают также на возможность существования некоторого порогового напряжения для зарождения волны разрушения и зависимость её от скорости нагружения.

Процессы, происходящие в волне разрушения, в данный момент пока не имеют точного описания. Так как она является дозвуковой, то по мере распространения скорость волны убывает. Под действием напряжений сжатия на поверхности зарождаются волны разрушения, представляющие из себя сетку пересекающихся трещин.

Сопrotивление растяжению и сдвигу уменьшается резко при дроблении материала в волне разрушения. Инициирование роста трещин происходит на части поверхностных дефектов, доля которых определяется скоростью приложенной нагрузки и её конечной величиной.

При пересечении двух трещин происходит остановка одной из них, поэтому по мере распространения волны разрушения между трещинами может возрасти их среднее расстояние. Это, вероятно, и объясняет уменьшение с пройденным расстоянием скорости волны разрушения.

Волны разрушения, которые образуются в стекле, также есть и в хрупких материалах. Разрушения начинается с верхнего слоя преграды, во всех последующих слоях в это момент времени нет еще возмущений.

В расчетах процессов высокоскоростного удара, взрыва и других интенсивных импульсных воздействий в каждой точке среды реакция материала описывается локальными определяющими соотношениями. Полный набор параметров состояния среды в данной частице определяется таким описанием и не зависит от соседних частиц.

В [3] представлены экспериментальные ударные адиабаты различных материалов, таких, как рубин, оргстекло, стекло и корунд. Ударная адиабата нитрида алюминия приведена в [4], а в [5] – ударная адиабата упругого сжатия сапфира. Исследование прочности сапфира при откольном разрушении проведено в [6].

Цель данной работы – разработка математической модели, позволяющей в рамках механики сплошной среды рассчитывать ударное взаимодействие осколочных элементов и пуля с прозрачной броней.

Математическое моделирование поведения материалов ударника и прозрачной брони в условиях высокоскоростного удара проведено в рамках модели пористой упруго-пластической среды с учетом различных механизмов разрушения [7–11]. Пакет вычислительных программ для реализации модели представлен в [12] и предназначен для решения задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке модифицированным на решение динамических задач методом конечных элементов [10].

Результаты расчета

Проведена серия расчетов, с использованием математической модели, изложенной в [7], способной описывать высокоскоростное взаимодействие ударника диаметром 9 и высотой 27 мм с многослойной прозрачной преградой при скорости 850 м/с. Были проведены расчеты с тремя видами прозрачных преград толщиной 24 мм.

Первый вариант преграды двухслойный. Лицевой слой из закаленного стекла толщиной 20 мм, а тыльный слой из поликарбоната толщиной 4 мм. Вторая и третья преграды – это добавление в качестве лицевого слоя к первому варианту преграды сначала ALONa 6 мм, а потом используется слой из шпинели такой же толщины. В трехслойных преградах слой стекла был взят толщиной 14 мм.

В литературе отсутствуют экспериментальные данные по ударным адиабатам Гюгонио для ALONa и шпинели, на основании которых определяются коэффициенты c_{m0} и S_{m0} в уравнении состояния. В [14] приведена эмпирическая формула оксинитрид алюминия $(AlN)_x \cdot (Al_2O_3)_{1-x}$ в молекулярном соотношении $0.30 \leq x \leq 0.37$ и химическая формула NOAL. В работе указаны его плотность $\rho_{m0} = 3.688$ г/см³ и молекулярная масса 56.9877 г/моль. Способы синтеза порошков алюмомагниевого шпинели ($MgAl_2O_4$) для получения оптически прозрачной керамики приведены в [15]. Физические свойства и физико-химические константы шпинели – в [16]. Величины плотности шпинели $\rho_{m0} = 3.57\text{--}3.72$ г/см³, молекулярная масса 142.27 г/моль. По химическому составу шпинель состоит из 28.34 % MgO и 71.66 % Al_2O_3 .

Используя приведённые данные, ударные адиабаты ALONa и шпинели можно определить двумя способами. Данные материалы можно рассматривать как двухкомпонентные среды с начальной плотностью $\rho_{m0} = v_1\rho_{01} + v_2\rho_{02}$, где v_i и ρ_{0i} ($i = 1, 2$) соответственно начальные объемные концентрации и плотности компонентов смеси ($v_1 + v_2 = 1$).

Коэффициенты линейной зависимости c_{m0} и S_{m0} определялись через ударные адиабаты компонентов смеси $D_i = c_{0i} + S_{0i}u$ ($i = 1, 2$).

Ударная адиабата смеси в переменных, где удельный объем v_m , давление p_m (индекс m относится к матричному материалу), имеет вид

$$v_m(p_m) = \sum_{i=1}^n m_i \left\{ v_{0i} - \frac{1}{p_m} \left[\frac{c_{0i}}{S_{0i}} \sqrt{\frac{p_m S_{0i}}{\rho_{0i} c_{0i}^2} + \frac{1}{4}} - \frac{1}{2} \right]^2 \right\},$$

где $m_i = v_i \frac{\rho_{0i}}{\rho_{m0}}$ – массовая концентрация i -компоненты ($m_1 + m_2 = 1$), $v_{0i} = \frac{1}{\rho_{0i}}$.

Используя для смеси соотношение на ударной волне

$$D = v_{m0} \sqrt{\frac{p_m}{v_{m0} - v_m(p_m)}}, \quad u = \sqrt{p_m (v_{m0} - v_m(p_m))},$$

где $v_{m0} = \frac{1}{\rho_{m0}}$, можно построить зависимость скорости ударной волны от массовой скорости и определить коэффициенты c_{m0} и S_{m0} .

Когда нет экспериментальных данных, ударные адиабаты химических соединений можно определить по известной начальной плотности и химической формуле [17]

$$D = u + 3.4 \left(\frac{\rho_{m0}}{M_{\text{эфф}}} \right)^{\frac{1}{3}} u^{\frac{1}{2}} + B \left(\frac{\rho_{m0}}{M_{\text{эфф}}} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где u , D – массовая скорость и скорость ударной волны, км/с; ρ_{m0} – начальная плотность химических соединений, г/см³; $M_{\text{эфф}} = M_B/n$ – эффективная молекулярная масса, г; M_B – молекулярная масса; n – число атомов в соединении; B – константа, величина которой зависит от группы химических соединений.

Коэффициент Грюнаизена γ_{m0} определяется по формуле $\gamma_{m0} = \frac{3(1-\nu)}{2(2-3\nu)}$,

где ν – коэффициент Пуассона.

Для материалов, представленных выше, используются параметры модели для расчетов, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры модели

Материал	ρ_{m0} , г/см ³	c_{m0} , г/см ³	S_{m0}	γ_{m0}	μ_{m0} , ГПа	σ_s , ГПа	α_s , ГПа	α_{00}	ξ^*	e_u^*
Сталь	7.85	0.457	1.50	2.26	82.0	1.0	0.17	1.0006	0.3	1.00
Поликарбонат	1.20	0.174	1.72	2.13	1.0	0.026	0.0173	1.00001	0.09	0.50
ALON	3.71	0.74	1.157	1.4648	139	12.64	0.7323	1.00001	0.0104	0.15
Стекло	2.48	0.31	1.40	1.29–1.77	33.3	7.09	0.3648	1.00001	0.0104	0.15
Секло фрагментированное	2.48	0.16	1.93	1.29	33.3	–	–	–	–	–
Шпинель	3.58	0.73	1.65	1.549	116.2	9.54	0.5038	1.00001	0.0104	0.14

Таблица 2

Параметры модели разрушения

Материал	R_c , ГПа	R_p , ГПа	T_c , ГПа	k	σ_{\max}	σ_{\min}
ALON	14.15	8.5	6.32	0.75	12.64	0.75
Стекло	9.0	4.2	3.547	0.75	7.09	0.75
Шпинель	11.8	5.8	4.77	0.75	9.54	0.75

Результаты математического моделирования представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 – картины проникания ударника в прозрачную броню в моменты времени 2 мкс, 20 мкс, 40 мкс и 64 мкс. Чёрным цветом в мишени помечены области разрушенного материала. Образующаяся в момент взаимодействия ударника с мишенью ударная волна приводит к разрушению под ним материала. В последующие моменты времени ударник взаимодействует с разрушенным материалом. В момент времени 64 мкс происходит его остановка. Глубина кратера в слое стекла 14.04 мм. В начальный момент времени ударник имел длину 27 мм, а его масса составляла 13.4 г. В момент остановки его длина составляла 10.89 мм, а масса 6.2 г.

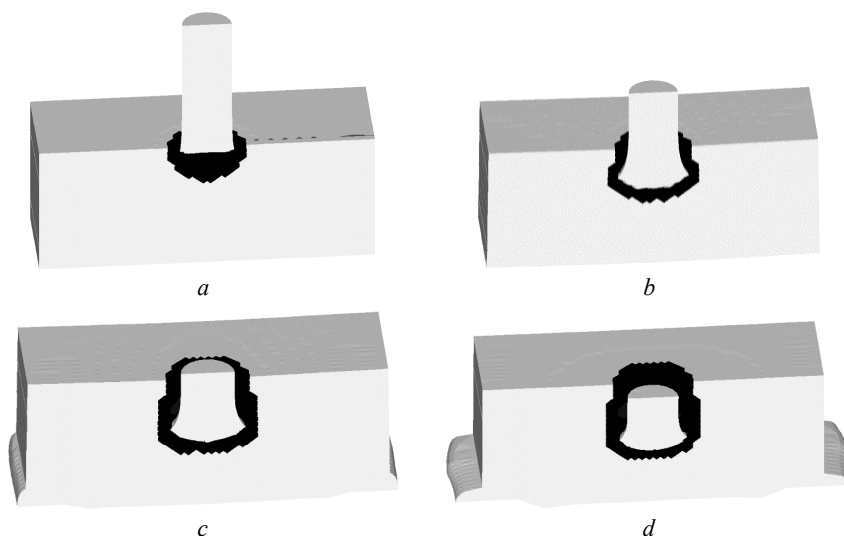


Рис. 1. Хронограмма проникания ударника в мишень первого типа:
 $a - t = 2$ мкс; $b - t = 20$ мкс; $c - t = 40$ мкс; $d - t = 64$ мкс

Fig. 1. Chronogram of the impactor penetration into a first-type target:
 $t = (a) 2, (b) 20, (c) 40, \text{ and } (d) 64 \mu\text{s}$

Как уже указывалось выше, физико-математическая модель не позволяет рассчитывать волны разрушения в стекле. От поверхности кратера в прозрачной броню в ударножесткий материал могут распространяться трещины, приводящие к дополнительному разрушению в материале, поэтому материал прозрачной брони может быть разрушен гораздо сильнее. Трещины под ударником могут достичь лицевой поверхности слоя поликарбоната, образуя фрагменты разрушенного стекла. Однако в целом при данной скорости удара мишень из прозрачной брони не пробита.

На рис. 2 представлены картины проникания ударников в рассмотренные выше мишени из прозрачной брони трех типов на момент их остановки.

При взаимодействии с мишенью второго типа (*b*) ударник пробил слой ALONa и остановился в стеклянном слое. Глубина его проникания в мишень составила 12.51 мм. В процессе проникания в мишень длина ударника уменьшилась до величины 10.98 мм, а остаточная масса до 6.0 г.

При замене слоя из ALONa на слой из шпинели (*c*) глубина кратера составила 12.78 мм. Масса остатка ударника 6.0 г, а его длина 10.89 мм.

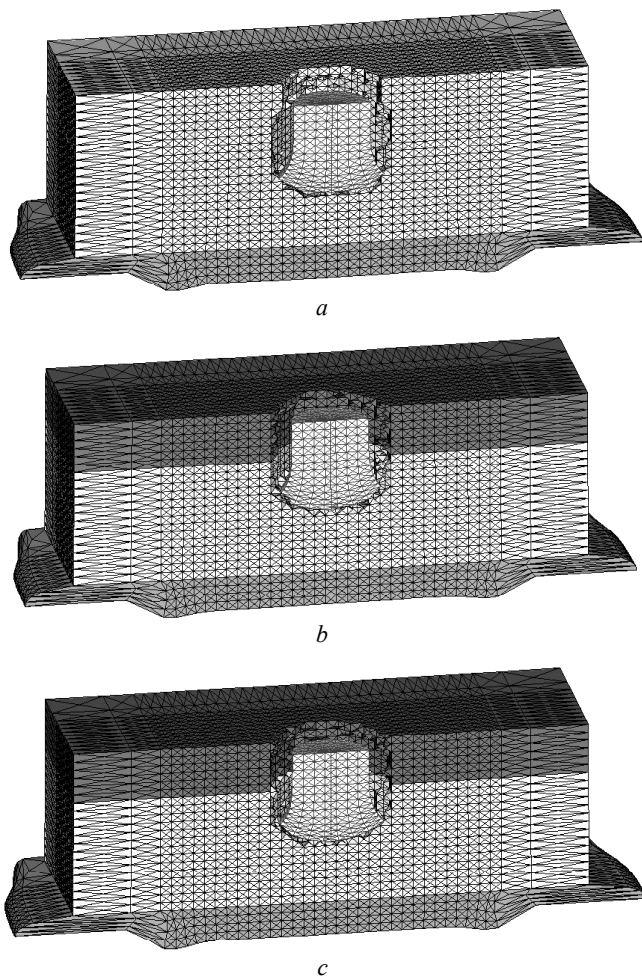


Рис. 2. Хронограмма проникания ударников в мишени трех типов:
a – мишень первого типа; *b* – мишень второго типа; *c* – мишень третьего типа
Fig. 2. Chronogram of the impactor penetration into three types of targets:
the (a) first, (b) second, and (c) third type of targets

Выводы

Из расчетов следует, что при замене шестимиллиметрового слоя стекла на слой из ALONa глубина кратера уменьшилась на 11 %, а при замене на слой из шпинели глубина кратера уменьшилась до 9 %. Таким образом из расчетов следует, что самый стойкий к удару материал ALON, совсем немного уступает ему шпинель.

Цель данной работы – показать возможность предоставленной модели поведения конструкционных материалов в условиях высокоскоростного удара. Совместное проведение лабораторного эксперимента и математического моделирования с одной стороны позволило глубже понять протекающие процессы в прозрачной броне, с другой – уточнить параметры модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент США № 4520116.
2. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М: Янус-К, 1996. 408 с.
3. Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Трунин Р.Ф., Фортвов В.Е. Экспериментальные данные по ударной сжимаемости и адиабатическому расширению конденсированных веществ при высоких плотностях энергии. Черноголовка, 1996. 385 с.
4. Трунин Р.Ф. Исследование экстремальных состояний конденсированных веществ методом ударных волн. Уравнения Гюгонно. Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2006. 286 с.
5. Barker L.M., Hollenbach R.E. Shock-wave studies of PMMA, fused silica, and sapphire // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 4208–4226.
6. Савиных А.С., Канель Г.И., Разоренов С.В. Прочность сапфира при откольном разрушении // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 7. С. 8–15.
7. Белов Н.Н., Демидов В.Н., Ефремов Л.В. и др. Компьютерное моделирование динамики высокоскоростного удара и сопутствующих физических явлений // Изв. вузов. Физика. 1992. Т. 35. № 8. С. 5–49.
8. Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Толкачев В.Ф., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т. Особенности ударно-волнового деформирования пористой керамики Al₂O₃ // ДАН. 1999. Т. 368. № 4. С. 474–481.
9. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Табаченко А.Н. и др. Математическое моделирование процессов деформирования и разрушения металлокерамики в условиях динамического нагружения // Изв. вузов. Физика. 2002. № 8. С. 54–59.
10. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Northampton; Томск: STT, 2005. 356 с.
11. Белов Н.Н., Кабанцев О.В., Копаница Д.Г., Югов Н.Т. Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций. Томск: STT, 2008. 292 с.
12. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3) / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010611042. М., 2010.
13. Гениев Г.А., Киссюк В.Н. К вопросу обобщения теории прочности бетона // Бетон и железобетон. 1965. № 2. С. 16–29.
14. https://ru.wikipedia.org/wiki/Оксинитрид_алюминия
15. Сенина М.О., Лемешев Д.О. Способы синтеза порошков алюмомагниевого шпинели для получения оптически прозрачной керамики (обзор) // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 7. С. 101–103.
16. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Шпинель>
17. Анисичкин В.Ф. К расчету ударных адиабат химических соединений // ФГВ. 1980. № 5. С. 151–153.

Статья поступила 24.05.2020 г.

Belov N.N., Yugov N.T., Sammel A.Yu., Stepanov E.Yu. (2020) STUDY OF THE TRANSPARENT ARMOR STRENGTH UNDER A HIGH-SPEED IMPACT OF A CYLINDRICAL IMPACTOR BY COMPUTER MODELING METHOD. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 67. pp. 69–77

DOI 10.17223/19988621/67/7

Keywords: transparent armor, high-speed interaction, mathematical modeling.

When manufacturing transparent multilayer armor of high threat level, the reinforced silicate glass and transparent ceramics with protecting back films are usually used. The hardness of the front layer of the shield should be much higher than that of the impactor. A promising option is

the use of a single leucosapphire crystal. However, due to its high cost and the impossibility of providing large-sized samples, the transparent polycrystalline materials are developed. One of the most advanced materials is ALON, which is close to leucosapphire in strength characteristics.

The aim of this work is to develop a mathematical model to calculate the impact interaction of fragmentation elements with transparent armor. The numerical study is carried out using proprietary software systems.

Calculations of the high-speed impact of the steel cylindrical impactor are implemented for three types of shields made of transparent armor. The first two-layer target is made of 20 mm thick tempered glass and a 4 mm thick polycarbonate layer. The second and third targets are three-layered. The front layer of the second target is made of ALON, and the spinel is used for the third one. The second and third layers in these targets are made of tempered glass and polycarbonate, respectively. The calculated results show that ALON is the most impact-resistant material, while spinel is a little less resistant.

Financial support. This study was supported by the Tomsk State University Competitiveness Improvement Program (No. 8.2.09.2018 L).

Nikolay N. BELOV (Doctor of Physics and Mathematics, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: n.n.belov@mail.ru

Nikolay T. YUGOV (Doctor of Physics and Mathematics, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: n.t.yugov@mail.ru

Anton Yu. SAMMEL (Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: anton_sammel@mail.ru

Evgeniy Yu. STEPANOV (Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: stepanov_eu@mail.ru

REFERENCES

1. Gentilman R.L., Maguire E.A., Dolhert L.E. *Transparent Aluminum Oxynitride and Method of Manufacture*. US Patent 4520116.
2. Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. (1996) *Udarno-volnovyye yavleniya v kondensirovannykh sredakh* [Shock-wave phenomena in condensed media]. Moscow: Janus-K.
3. Zhernokletov M.V., Zubarev V.N., Trunin R.F., Fortov V.E. (1996) *Eksperimentalnye dannye po udarnoy szhimaemosti i adiabaticheskomu rasshireniyu kondensirovannykh veshchestv pri vysokikh plotnostyakh energii* [Experimental data on shock compressibility and adiabatic expansion of condensed media at high energy densities]. Chernogolovka.
4. Trunin R.F. (2006) *Issledovanie ekstremalnykh sostoyaniy kondensirovannykh veshchestv metodom udarnykh voln. Uravneniya Gyugonio* [Study of extreme conditions of condensed media by the shock wave method. The Hugoniot equations]. Sarov: Russian Federal Nuclear Centre – All-Soviet Union Research Institute of Experimental Physics.
5. Barker L.M., Hollenbach R.E. (1970) Shock-wave studies of PMMA, fused silica, and sapphire. *Journal of Applied Physics*. 41. pp 4208–4226. DOI: 10.1063/1.1658439.
6. Savinykh A.S., Kanel G.I., Razorenov S.V. (2011) Prochnost' sapfira pri otkol'nom razrushenii [Strength of sapphire at spall fracture]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics Letters*. 37(7). pp. 8–15.
7. Belov N.N., Demidov V.N., Efremov L.V. et al. (1992) Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki vysokoskorostnogo udara i soputstvuyushchikh fizicheskikh yavleniy [Computer simulation of the high-speed impact dynamics and related physical phenomena]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 35(8). pp 5–49.

8. Afanas'eva S.A., Belov N.N., Tolkachev V.F., Khabibulin M.V., Yugov N.T. (1999) Osobennosti udarno-volnovogo deformirovaniya poristoy keramiki Al_2O_3 [Features of shock-wave deformation of porous Al_2O_3 ceramics]. *Doklady Akademii Nauk*. 368(4). pp 474–481.
9. Belov N.N., Yugov N.T., Tabachenko A.N. et al. (2002) Matematicheskoe modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya metallokeramiki v usloviyakh dinamicheskogo nagruzheniya [Mathematical modeling of deformation and fracture of the cermet in terms of dynamic loading]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 8. pp. 54–59.
10. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Yugov A.A. (2005) Dinamika vysokoskorostnogo udara i sopustvuyushchie fizicheskie yavleniya [Dynamics of high-speed impact and related physical phenomena]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. pp. 356.
11. Belov N.N., Kabantsev O.V., Kopanitsa D.G., Yugov N.T. (2008) *Raschetno-eksperimental'nyy metod analiza dinamicheskoy prochnosti elementov zhelezobetonnykh konstruksiy* [Calculation and experimental method for the analysis of the dynamic strength of elements of reinforced concrete structures]. Tomsk: STT.
12. Yugov N.T., Belov N.N., Yugov A.A. (2010) *Raschet adiabaticheskikh nestatsionarnykh techeniy v trekhmernoй postanovke (RANET-3)* [Calculation of adiabatic unsteady flows in a three-dimensional formulation (RANET-3)]. RF Patent 2010611042.
13. Geniev G.A., Kissyuk V.N. (1965) K voprosu obobshcheniya teorii prochnosti betona [On the generalization of the theory of concrete strength]. *Beton i zhelezobeton*. 2. pp. 16–29.
14. Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxynitride.
15. Senina M.O., Lemeshev D.O. (2016) Sposoby sinteza poroshkov alyumomagnievoy shpineli dlya polucheniya opticheski prozrachnoy keramiki (obzor) [Methods of synthesizing of magnesium-aluminum spinel powders to produce optically transparent ceramics (review)]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 30(7). pp. 101–103.
16. Access mode: <https://en.wikipedia.org/wiki/Spinel>.
17. Anisichkin V.F. (1980) K raschetu udarnykh adiabat khimicheskikh soedineniy [To the calculation of shock adiabats of chemical compounds]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion and Shock Waves*. 5. pp. 151–153.

Received: May 24, 2020