

06

Влияние начальной температуры на процесс проникания ударников из пористого сплава на основе вольфрама с упрочняющим наполнителем в стальную преграду

© А.Н. Ищенко, С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, В.В. Буркин, В.З. Касимов, Л.С. Марцунова, К.С. Рогаев, А.Ю. Саммель, А.Б. Скосырский, Н.Т. Югов

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета,
634050 Томск, Россия
e-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 марта 2019 г.

В окончательной редакции 16 декабря 2019 г.

Принято к публикации 16 декабря 2019 г.

Продолжена серия исследований, направленных на изучение особенностей и выявление общих закономерностей проникающей способности ударников из композиционного материала на основе пористого сплава вольфрам + никель + железо + кобальт с добавлением высокотвердых тугоплавких частиц карбида титана вольфрама при различных начальных условиях. В частности, изучено влияние начальной температуры ударника в интервале от -50 до 50°C на процесс проникания в стальную преграду экспериментальным и расчетным способом. Выявлено отсутствие заметного влияния начальной температуры ударника в данном интервале на глубину проникания в преграду при скоростях удара до 2500 m/s . Наблюдается превышение проникающей способности на 20% по сравнению с монолитным массогабаритным аналогом из сплава ВНЖ-90.

Ключевые слова: композиционный материал, ударник, глубина проникания, температура, экспериментальное, математическое моделирование.

DOI: 10.21883/JTF.2020.05.49183.102-19

Введение

В последнее время наблюдаются возрастающие интересы к разработке перспективных материалов и исследованию их физико-механических и функциональных свойств для условий высокоскоростного удара. Целенаправленные исследования тяжелых вольфрамовых сплавов для сердечников перспективных бронестойких снарядов [1–4] направлены на получение высокоплотных образцов путем консолидации порошковых композиций в различных технологических режимах и применения специальных термомеханических обработок. Как отмечено [1], эффективность бронепробития ударниками зависит не только от их прочностных характеристик, но и от механизма разрушения в процессе взаимодействия с преградой. Исследования высокоскоростного проникания ударников из композиционного материала на основе сплава вольфрам + никель + железо + кобальт (ВНЖК) с высокотвердыми легирующими добавками типа карбидов вольфрама, не отличающихся максимальными прочностными свойствами, рассматриваются в [5]. Композиционные ударники из пористого сплава ВНЖК + $10\text{ wt.}\%$ карбида титана вольфрама (TiWC) показали существенное превышение глубины проникания по сравнению с массогабаритным аналогом из монолитного сплава ВНЖ-90 при скорости удара порядка 2800 m/s .

Продолжением этих исследований является рассмотренное в настоящей работе влияние начальной температуры ударника из пористого сплава (ВНЖК + $10\text{ wt.}\%$ TiWC) в интервале -50 до 50°C на процесс проникания в стальную преграду экспериментальными и расчетными способами.

Экспериментальные исследования глубины проникания проведены на лабораторном баллистическом стенде [6]. Математическое моделирование проведено в рамках модели пористой упругопластической среды [7], модифицированной для описания поведения материалов на основе сплава ВНЖК с высокотвердыми легирующими добавками [8] с возможностью оценки температуры в процессе взаимодействия. Расчеты проведены с помощью программного комплекса [9].

Расчет температуры при высокоскоростном соударении

Для оценки температуры при взаимодействии многокомпонентных сред (в нашем случае сплавы (ВНЖК + $10\text{ wt.}\%$ TiWC)) в математической модели [7] в качестве уравнения состояния используется уравнение Ми–Грюнайзена. При линейной зависимости скорости ударной волны от массовой скорости u на ударной адиабате, $D = c_{m0} + S_{m0}u$, которая выполняется для многих конструкционных материалов, уравнение состояния

имеет вид [10]:

$$p(v, \varepsilon) = (A\mu + B\mu^2 + C\mu^3 + \gamma_{m0}\rho_{m0}\varepsilon)/\alpha, \quad (1)$$

где v — удельный объем пористой среды, ε — удельная внутренняя энергия, ρ_{m0} — начальная плотность материала матрицы, γ_{m0} — коэффициент Грюнайзена материала матрицы, $\alpha = v/v_m$, v_m — удельный объем материала матрицы, $\mu = \alpha/\rho_{m0}v - 1$,

$$A = B_{m0} = \rho_{m0}c_{m0}^2$$

— модуль объемного сжатия,

$$B = B_{m0}[(1 - \gamma_{m0}/2) + 2(S_{m0} - 1)],$$

$$C = B_{m0}[2(1 - \gamma_{m0}/2)(S_{m0}u - 1) + 3(S_{m0} - 1)^2].$$

Если в качестве опорной кривой для уравнения (1) взять изэнтропу, проходящую через начальное состояние ($p_m = 0$, $T = T_0$, $v_m = v_{m0}$, $\varepsilon(v_{m0}, T_0) = 0$), то холодная составляющая энергии выражается как

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{00} + \varepsilon_{01}\eta + \varepsilon_{02}\eta^2 + \varepsilon_{03}\eta^3 + \varepsilon_{04}\eta^4,$$

где

$$\eta = 1 - \rho_{m0}v/\alpha, \quad \varepsilon_{00} = -T_0c_v, \quad \varepsilon_{01} = \varepsilon_{00}\gamma_{m0},$$

$$\varepsilon_{02} = 1/2(c_{m0}^2 + \gamma_{m0}^2\varepsilon_{00}), \quad \varepsilon_{03} = 1/6(4S_{m0}c_{m0}^2 + \gamma_{m0}^3\varepsilon_{00}),$$

$$\varepsilon_{04} = 1/2(-2\gamma_{m0}S_{m0}c_{m0}^2 + 18S_{m0}^2c_{m0}^2 + \gamma_{m0}^4\varepsilon_{00}),$$

c_v — удельная теплоемкость материала, T_0 — начальная температура [K].

Тогда можно определить температуру в твердом теле из соотношения

$$T(v, \varepsilon) = [\varepsilon - \varepsilon_{00} - \varepsilon_{01}\mu + (\varepsilon_{02} - \varepsilon_{01})\mu^2 - (\varepsilon_{01} - 2\varepsilon_{02} + \varepsilon_{03})\mu^3 - (3\varepsilon_{02} - 3\varepsilon_{03} + \varepsilon_{04} - \varepsilon_{01})\mu^4]/c_v.$$

Удельная теплоемкость химического соединения при нормальных условиях определяется как $c_v = 3nR/NaMm_H$, где R — универсальная газовая постоянная, n — число атомов в соединении, Na — число Авогадро, M — молярный вес, m_H — масса атома водорода. Удельная теплоемкость многокомпонентной системы определяется как $c_v = \sum c_{vi}m_i$, где c_{vi} , m_i — удельная теплоемкость и массовая доля i -ой компоненты соответственно.

На основании данных [11–13] определены удельные теплоемкости исследуемых материалов при различных начальных температурах (табл. 1).

Параметры математической модели пористого сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) и стали приведены в табл. 2, где обозначено: ρ_{m0} , c_{m0} , S_{m0} , γ_{m0} , μ_{m0} , σ_{ms} — плотность, объемная скорость звука, коэффициент наклона ударной адиабаты, коэффициент Грюнайзена, модуль сдвига и динамический предел текучести материала матрицы соответственно, a_s , α_{00} , ξ^* , e_u^* — константы модели разрушения материала.

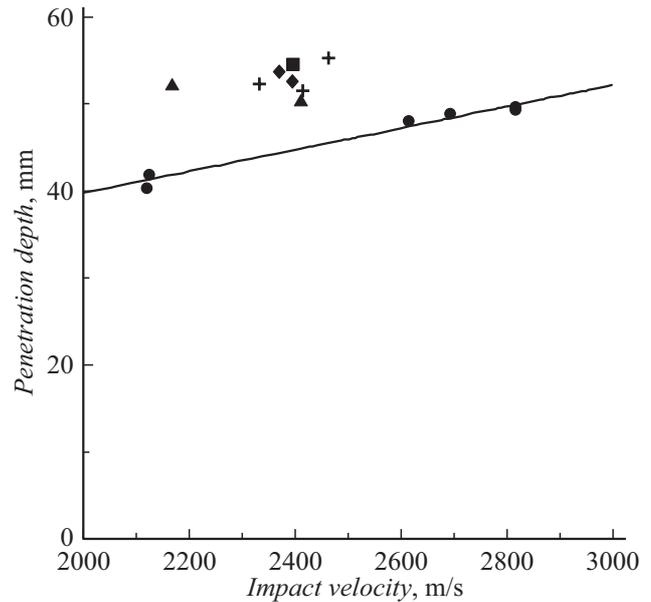


Рис. 1. Глубина проникания ударников из сплава ВНЖК + 10 wt.% TiWC в стальную преграду: T_0 , °C: + — 50, ♦ — 20, ■ — 30, ▲ — 50, ● — ВНЖ-90 при $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Результаты экспериментально-теоретических исследований

Для баллистических испытаний методом высокотемпературного спекания были изготовлены цилиндрические ударники из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) массой $m = 30$ g и диаметром $d = 9$ mm. Исходная плотность порошковых компонент: ВНЖК составляет 16.25 g/cm³, TiWC — 10.91 g/cm³. Теоретическая плотность сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) составляет $\rho_{m0} = 16.23$ g/cm³. В процессе консолидации порошковых компонент при ВТС сохраняется остаточная пористость, в связи с чем ударники могут иметь различную начальную плотность ρ_0 . В табл. 3 приведены средние значения физико-механических характеристик образцов материала. Объем пустот в образцах материала $\xi = (1 - \rho_0/\rho_{m0}) \cdot 100$ в среднем равен 20%.

С целью исследования влияния начальной температуры на процесс высокоскоростного проникания ударников из пористого сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) в стальную преграду толщиной 87 mm проведены баллистические испытания при начальной температуре ударников T_0 в интервале от -50 до 50°C при скоростях удара V_0 в диапазоне 2100–2500 m/s. На рис. 1 приведены результаты эксперимента. Там же для сравнения приведена зависимость глубины проникания массогабаритного аналога из монолитного сплава ВНЖ-90.

Результаты эксперимента демонстрируют отсутствие зависимости глубины проникания от начальной температуры испытываемых ударников в рассматриваемом диапазоне. При этих условиях наблюдается

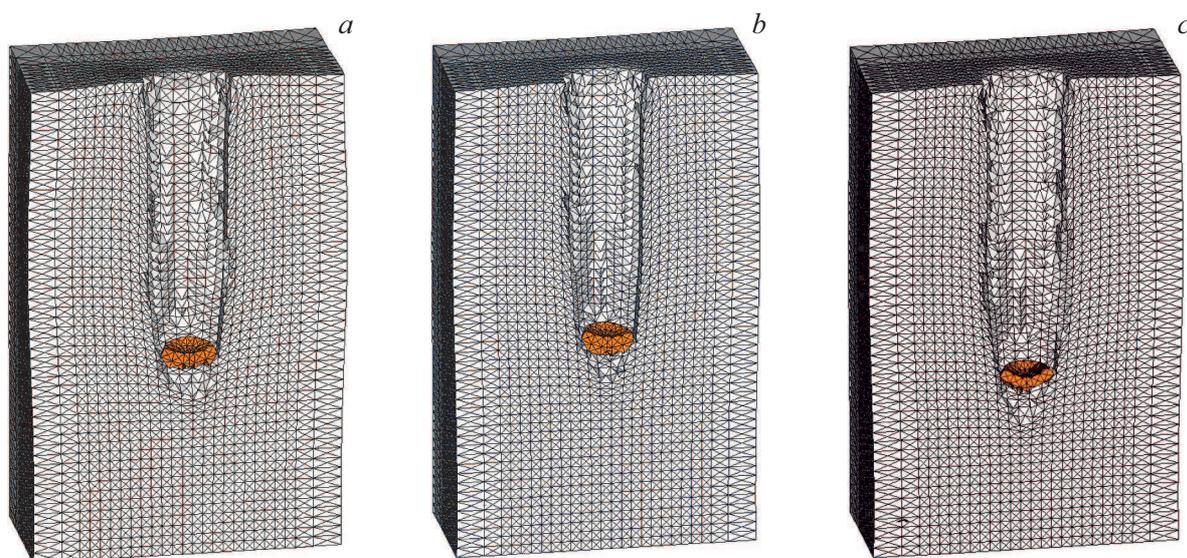


Рис. 2. Вид кратера и остатка ударника из сплава ВНЖК + 10 wt.% TiWC после соударения: *a* — опыт 1, $t = 86 \mu\text{s}$, *b* — опыт 2, $t = 90 \mu\text{s}$, *c* — опыт 3, $t = 90 \mu\text{s}$.

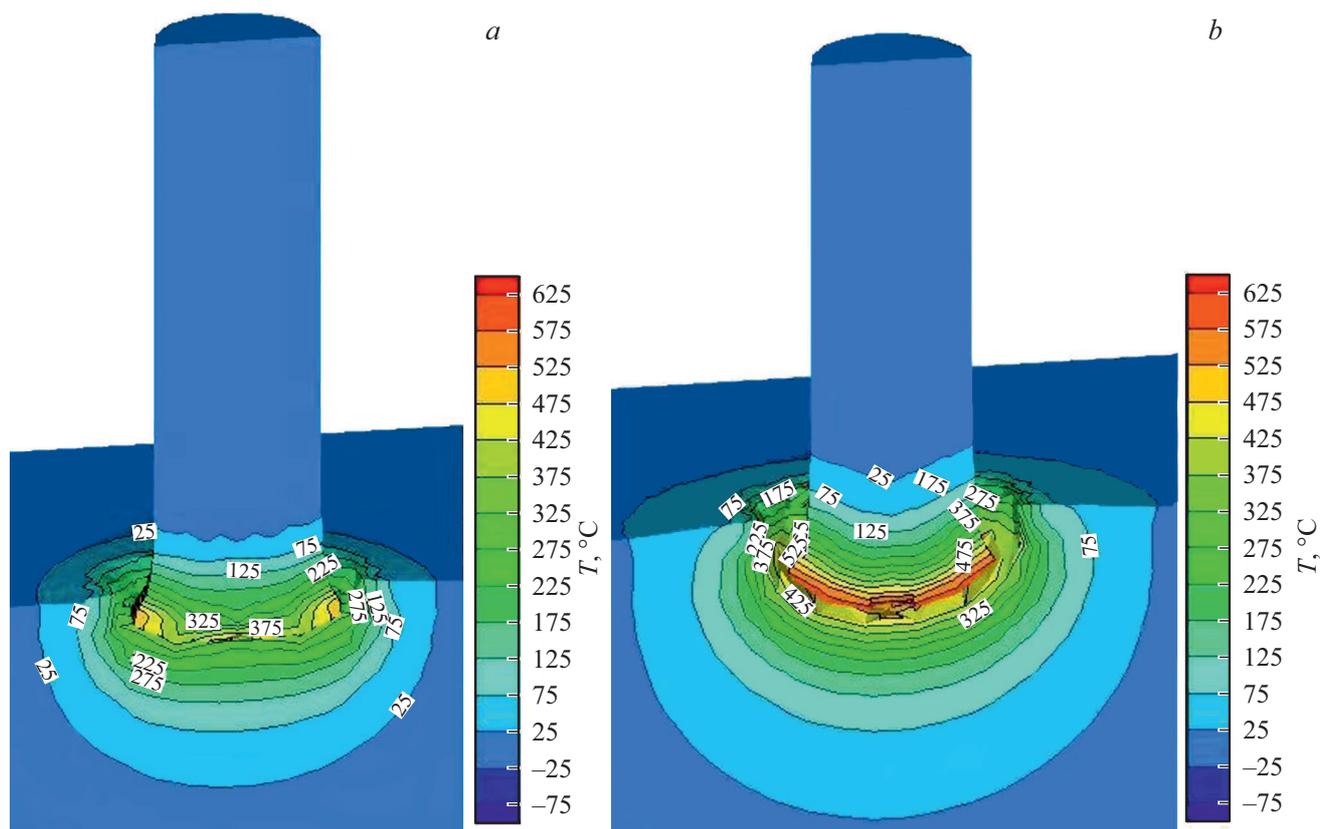


Рис. 3. Распределение температуры в зоне взаимодействия ударника из сплава ВНЖК + 10 wt.% TiWC со стальной преградой при $V_0 = 2395 \text{ m/s}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$: *a* — $t = 2$, *b* — $t = 4 \mu\text{s}$.

превышение глубины проникания ударников сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) в среднем на 20% по сравнению с массогабаритным аналогом из сплава ВНЖ-90, что подтверждает полученные ранее результаты [5,8].

Условия опытов при заданных начальной температуре ударников из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) и скорости удара V_0 повторены при математическом моделировании. В табл. 4 и на рис. 2 приведены

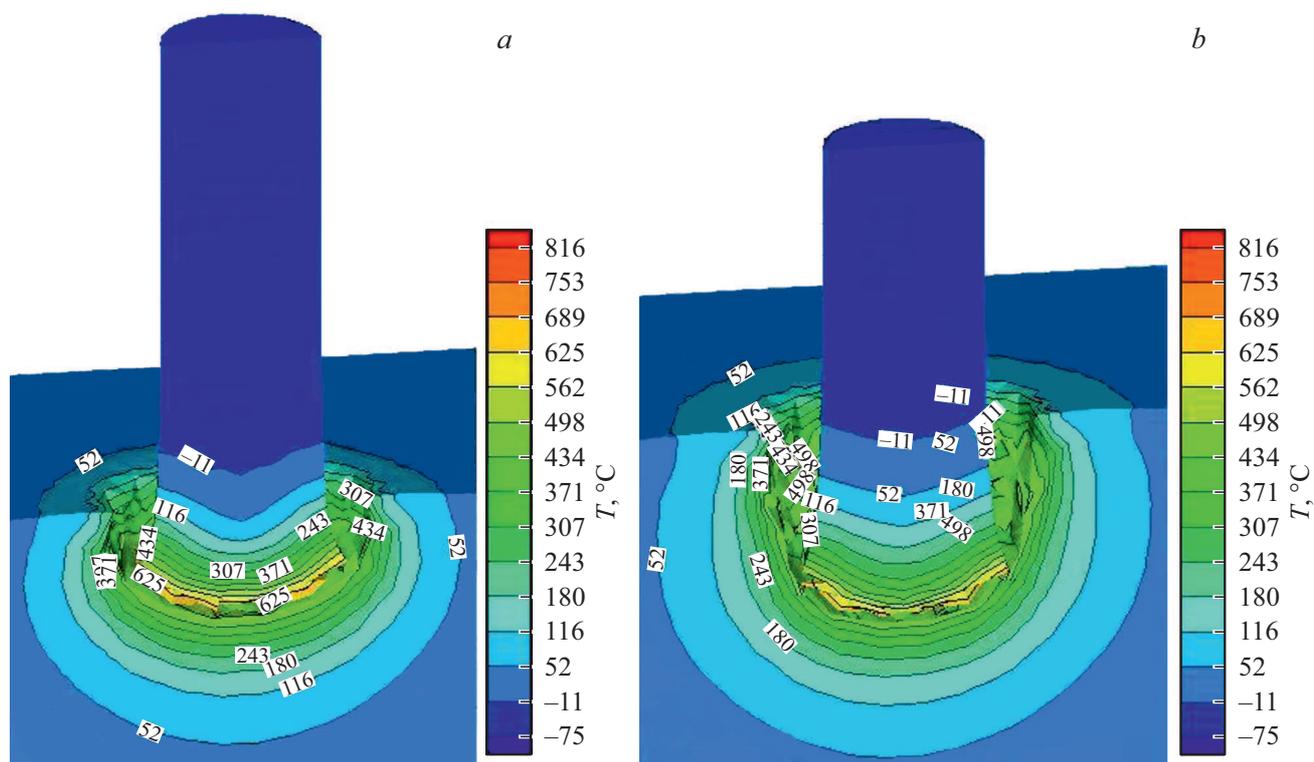


Рис. 4. Распределение температуры в зоне взаимодействия ударника из сплава ВНЖК + 10 wt.% TiWC со стальной преградой при $V_0 = 2167 \text{ m/s}$, $T_0 = -50^\circ\text{C}$: *a* — $t = 5$, *b* — $t = 10 \mu\text{s}$.

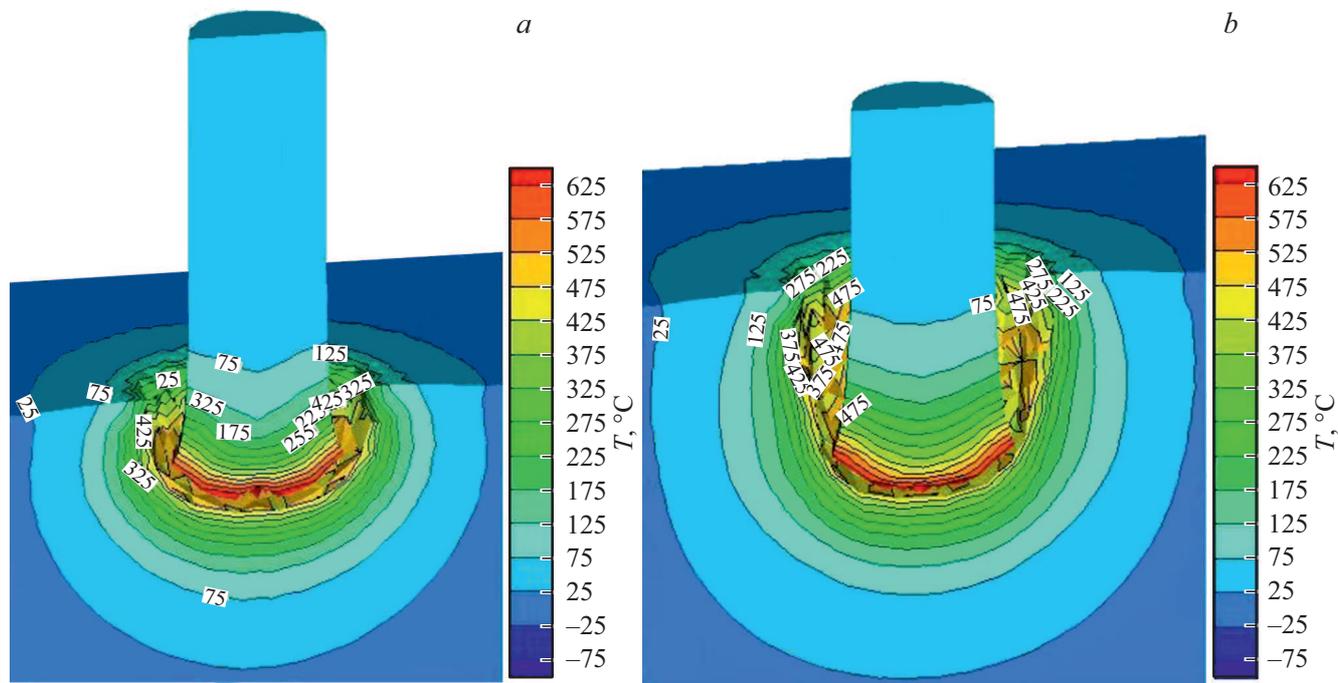


Рис. 5. Распределение температуры в зоне взаимодействия ударника из сплава ВНЖК + 10 wt.% TiWC со стальной преградой при $V_0 = 2463 \text{ m/s}$, $T_0 = 50^\circ\text{C}$: *a* — $t = 5$, *b* — $t = 10 \mu\text{s}$.

результаты расчетов на момент времени t окончания процесса проникания. Расхождение результатов расчета

с экспериментом Δ по глубине кратера h в среднем составляет 3%.

Таблица 1. Удельная теплоемкость исследуемых материалов

Материал	$T_0, ^\circ\text{C}$	$c_v, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$c_v, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$c_v, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
ВНЖК + 10 wt.% TiWC	-50	158.5	20	179.16	50	180.44
Сталь	-50	360	20	468	50	459

Таблица 2. Параметры математической модели исследуемых материалов

Материал	$\rho_{m0}, \text{g}/\text{cm}^3$	$c_{m0}, \text{cm}/\mu\text{s}$	S_{m0}	γ_{m0}	μ_{m0}, GPa	σ_{ms}, GPa	a_s, GPa	α_{00}	ξ^*	e_u^*
ВНЖК + 10 wt.% TiWC	16.23	0.42	1.167	1.61	144.73	1.464	0.966	1.0008	0.3	1.0
Сталь	7.85	0.457	1.49	2.26	82.0	1.0	0.66	1.0006	0.03	1.0

Таблица 3. Физико-механические характеристики образцов из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC)

Начальная плотность, g/cm^3	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Твердость, HRA	Модуль Юнга E , МПа
13	294	1328	67.7	20661

Таблица 4. Результаты математического моделирования

Опыт	$\rho_0, \text{g}/\text{cm}^3$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$V_0, \text{m}/\text{s}$	h, mm	$\Delta, \%$
1	12.91	20	2395	53.28	2.3
2	13.14	-50	2167	51.36	1.4
3	13.44	50	2463	55.33	5.0

На рис. 3–5 приведены фрагменты зоны взаимодействия ударника и преграды в начальной стадии в виде уровней температуры [°C]. Во всех вариантах расчета наибольшая температура сосредоточена в зоне контакта ударника и преграды и практически на порядок превышает начальные значения, причем во время взаимодействия зона высоких температур быстро распространяется вслед за ударными волнами по ударнику и преграде, что нивелирует влияние начального состояния. Таким образом, в рассматриваемом диапазоне начальная температура ударника практически не влияет на глубину проникания ударника в преграду при рассмотренных скоростях соударения.

Заключение

Выполнены расчетно-экспериментальные исследования проникания ударника из пористого сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) в стальную преграду при начальных температурах ударника в диапазоне от -50 до 50°C при скоростях соударения 2100–2500 m/s.

Усовершенствована методика математического моделирования [7,8] для расчета поля температур при взаимодействии ударника из многокомпонентного материала, каким является сплав (ВНЖК + 10 wt.% TiWC), с преградой.

Установлено отсутствие влияния начальной температуры ударника из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) на глубину проникания в стальную преграду в рассматриваемом диапазоне исходных параметров.

Наблюдается превышение проникающей способности ударников из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) в стальную преграду по сравнению с массогабаритным аналогом из сплава ВНЖ-90.

Благодарности

В работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Поварова К.Б., Алымов М.И., Гаврилин О.С., Дроздов А.А., Евстратов Е.В., Качнов А.И., Салько А.Е. // *Металлы*. 2007. № 6. С. 65–72.
- [2] Поварова К.Б., Алымов М.И., Дроздов А.А. // *Вопросы материаловедения*. 2008. № 2 (54). С. 94–99.
- [3] Черняк Г.Б., Поварова К.Б. *Вольфрам в боеприпасах*. Научное издание. / Под ред. И.Н. Торгуна. М.: ЦНИИХМ, 2014. 360 с.
- [4] Брагов А.М., Чувильдеев В.Н., Милехин Н.В., Филиппов А.Р., Константинов А.Ю., Сахаров Н.В. // *Физическая мезомеханика*. 2018. № 2 (21). С. 96–102.

- [5] *Ищенко А.Н., Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Буркин В.В., Рогаев К.С., Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Табаченко А.Н., Югов Н.Т.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 17. С. 41–47.
- [6] *Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Агафонов С.В., Рогаев К.С.* Экспериментальный баллистический комплекс. Патент на изобретение № 2591132 от 20.06.2016.
- [7] *Белов Н.Н., Демидов В.Н., Ефремова Л.В., Жуков А.В., Николаев А.П., Симоненко В.Г., Трушков В.Г., Хабибуллин М.В., Шиповский И.Е., Шуталев В.Б.* // Изв. вузов. Физика. 1992. № 8. С. 5–48.
- [8] *Ищенко А.Н., Акиншин Р.Н., Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Борисенков И.Л., Буркин В.В., Табаченко А.Н., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т.* // Изв. вузов. Физика. 2018. Т. 61. № 6. С. 49–55.
- [9] *Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А.* Расчет адиабатических нестандартных 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.
- [10] *Gust W.H.* // Y. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 5. P. 3566–3575.
- [11] *Зиновьев В.Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. Изд-во Металлургия, 1989. 200 с.
- [12] *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник Изд-во Атомиздат, 1968. 721 с.
- [13] *Ларионов Л.Н., Юрченко Ю.Ф.* Тепловые свойства металлов и сплавов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 439 с.