

06

Особенности разрушения ударников из пористого сплава на основе вольфрама с упрочняющим наполнителем при взаимодействии с бронепреградами

© А.Н. Ищенко, С.А. Афанасьева,[¶] Н.Н. Белов, В.В. Буркин, С.В. Галсанов, В.З. Касимов, В.А. Кудрявцев, Я.Д. Липатникова, 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 4 июня 2019 г.

В окончательной редакции 4 июня 2019 г.

Принято к публикации 24 сентября 2019 г.

Проведены расчетно-экспериментальные исследования процесса разрушения композиционных ударников из пористого сплава вольфрам+никель+железо+кобальт с 10 wt.% содержанием карбида титана вольфрама при высокоскоростном соударении со стальными преградами. При баллистических испытаниях в широком диапазоне скоростей имеет место существенное превышение глубины проникания данных ударников в стальные преграды по сравнению с массогабаритным аналогом из сплава вольфрам+никель+железо с 90% содержанием вольфрама. На основании анализа морфологии кратера и структуры фрагментов ударника после внедрения в преграду сделано предположение о реализации режима „самозатачивания“ ударника посредством локализации пластической деформации, что приводит к снижению эффективной площади взаимодействия и увеличению глубины внедрения. Проведена модификация математической модели пористого идеального упруго-пластического тела со сложной структурой для описания разрушения с возможностью учета механизма адиабатического сдвига в процессе взаимодействия ударника и преграды.

Ключевые слова: композиционные материалы, ударник, преграда, проникание, эксперимент, математическое моделирование.

DOI: 10.21883/JTF.2020.03.48928.226-19

Введение

Важнейшим условием повышения проникающей способности кинетических металлических ударников в металлические преграды наряду с увеличением скорости соударения является использование для их изготовления материалов с более совершенным комплексом физико-механических свойств [1,2]. В качестве перспективного решения для сердечников броневой снарядов используются тяжелые вольфрамовые сплавы [3–6].

Однако, как отмечено в [3], эффективность бронепробития ударниками зависит не только от прочностных свойств материала, но и от механизма разрушения в процессе взаимодействия с преградой. Наряду с высокопрочными и высокоплотными сплавами на основе вольфрама, обладающими высокой проникающей способностью при ударном взаимодействии, определенный интерес представляют собой пористые композиционные материалы на этой же основе, легированные высокопрочными компонентами типа карбидов вольфрама. Исследование высокоскоростного проникания ударников из разработанного пористого сплава вольфрам+никель+железо+кобальт (ВНЖК), легированного двойным карбидом титана вольфрама TiWC, рассматривается в [7]. Кинетические ударники из данного пористого сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) показали

существенное превышение (до 30%) глубины проникания по сравнению с массогабаритным аналогом из сплава ВНЖ-90 при скорости удара порядка 2800 m/s. Остаются не до конца изученными механизмы взаимодействия ударника и преграды, обеспечивающие столь высокие показатели. Существенным является различная форма кратеров поле соударения. От ударника из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) образовался заостренный в донной части кратер, как если бы ударник проникал в режиме „самозатачивания“, аналогично ударникам из сплава на основе обедненного урана [1]. От ударника из сплава ВНЖ-90 кратер затупленный.

Целью настоящей работы является продолжение исследований проникающей способности ударников из пористого сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) [7,8] и изучение особенностей механизма разрушения экспериментальных образцов материала (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) при высокоскоростном проникании в стальную преграду.

1. Результаты экспериментальных исследований

Для получения композиционного материала на основе ВНЖК с упрочняющим компонентом 10 wt.% кар-

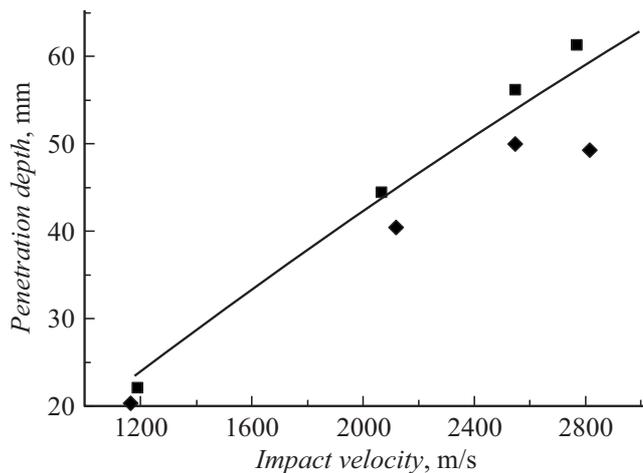


Рис. 1. Зависимость глубины проникания от скорости удара: ■ — ударник из материала (ВНЖК + 10 wt.% TiWC), ◆ — ударник из ВНЖ-90.

бида титана вольфрама (TiWC) использованы методы порошковой металлургии, которые включают получение исходной шихты с равномерным распределением всех компонентов, изготовление прессовки, и спекание в вакууме в интервале температур 1300–1450°C. В результате этих операций получен композиционный материал (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) со средней плотностью $\rho_0 = 13 \text{ g/cm}^3$. Теоретическая плотность данного материала составляет $\rho_{m0} = 16.23 \text{ g/cm}^3$. Остаточная пористость $\xi = (1 - \rho_0/\rho_{m0})100\%$ составляет 20%. Средние значения физико-механических характеристик при комнатной температуре следующие: предел прочности при растяжении 294 МПа, предел прочности при сжатии 1328 МПа, твердость 67.7 HRA, модуль Юнга 20661 МПа.

Экспериментальные исследования высокоскоростного соударения ударников из пористого сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) со стальной преградой в сравнении с ударниками из традиционного состава ВНЖ-90 проведены с применением баллистического комплекса на основе ствольной-реактивной технологии метания [9], позволяющего разгонять ударники массой 30–200 г в диапазоне скоростей до 3 км/с при постепенном нарастании нагрузки в канале ствола. Последнее обеспечивает неразрушающий режим ускорения метаемого тела.

Для сравнительных испытаний изготовлены цилиндрические ударники массой $m = 30 \text{ г}$ и диаметром $d = 9 \text{ мм}$ из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) и традиционного сплава ВНЖ-90. На рис. 1 представлены данные о глубине проникания ударников h в стальную преграду толщиной 87 мм твердостью 83 HRA при различной скорости удара V_0 . Разность в проникающей способности ударников из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) и ВНЖ-90 при близких скоростях соударения составляет от 9 до 25%.

При высоких скоростях ударник срабатывался до мелких фрагментов. В опытах при $V_0 \sim 1000 \text{ м/с}$ удалось извлечь остатки ударников соответствующей массы m_{rem} (рис. 2).

Форма и вид головной части остатков ударников принципиально разные: заостренный от ударника из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC), „грибообразный“ от ударника из ВНЖ-90.

Для понимания механизма разрушения образцов из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) и преграды в процессе высокоскоростного соударения проведены исследования поверхностей разрушения с использованием растровой электронной микроскопии. На рис. 3 представлены характерные углы плоскостей локализации сдвиговой пластической деформации ударника из композита (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) и характерная структура поверхности разрушения. Срабатывание ударника идет по определенным плоскостям, по краям формируются локальные области, в которых способность материала к пластической деформации возрастает. Часть образца начинает сползать от центральной части к периметру в процессе проникания, благодаря локализации сдвиговой пластической деформации и образованию плоскостей скольжения, что отчетливо видно на рис. 3, а, которые возникают под углом примерно 30–60° относительно нормали ударника. На гребнях ударника со сколовшейся стороны отчетливо видны следы пластического сдвига в виде полос, образованных смежными плоскостями скольжения (рис. 3, б).

Кроме этого, наблюдаются развитая система микро- и макротрещин (рис. 4), которая играет существенную роль в процессе деформации, фрагментации и разрушения данного материала. Возникающие трещины проходят как по границам зерен (рис. 4, а), так и через тело зерен (рис. 4, б), в результате чего на изломе наблюдаются отдельные фрагментированные зерна и зерна в виде межзеренных фасеток, которые образуются при разрушении по одной грани зерна (субзерна) с ямочным или другим специфическим рельефом, элементы структуры разрушения варьируют от 1 до 10 $\mu\text{м}$.

Материал преграды для исследования представлен разрезом кратера во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 5). На рис. 5, б видны трещины, образующиеся в преграде. Поверхность кратера бугристая с явными признаками фрагментации и последующим выносом этих фрагментов из кратера (рис. 5, с). Следует отметить корреляцию между значениями углов образующихся трещин как в ударнике, так и в преграде.

Процесс высокоскоростного внедрения образца в преграду, сопровождаемый ростом давления, происходит в адиабатическом режиме. В таких условиях деформация быстро локализуется в полосах адиабатического сдвига и последующего сдвигового разрушения. Локализация пластического сдвига является следствием резких структурных изменений в материале и может

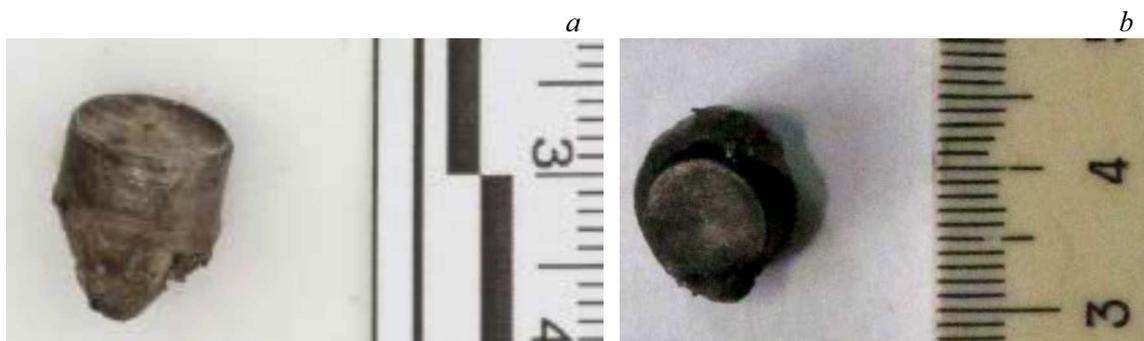


Рис. 2. Вид остатка ударника: *a* — (ВНЖК + 10 wt.% TiWC), $m_{rem} = 7.08$ g; *b* — ВНЖ-90, $m_{rem} = 11.16$ g.

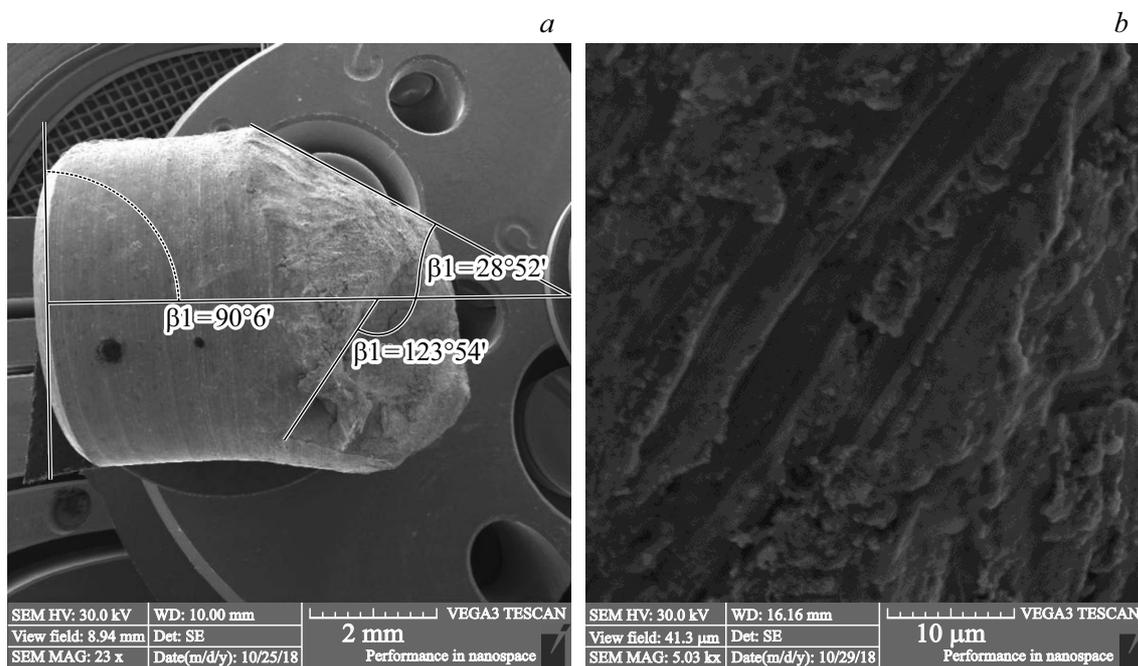


Рис. 3. Вид остатка ударника и поверхности разрушения.

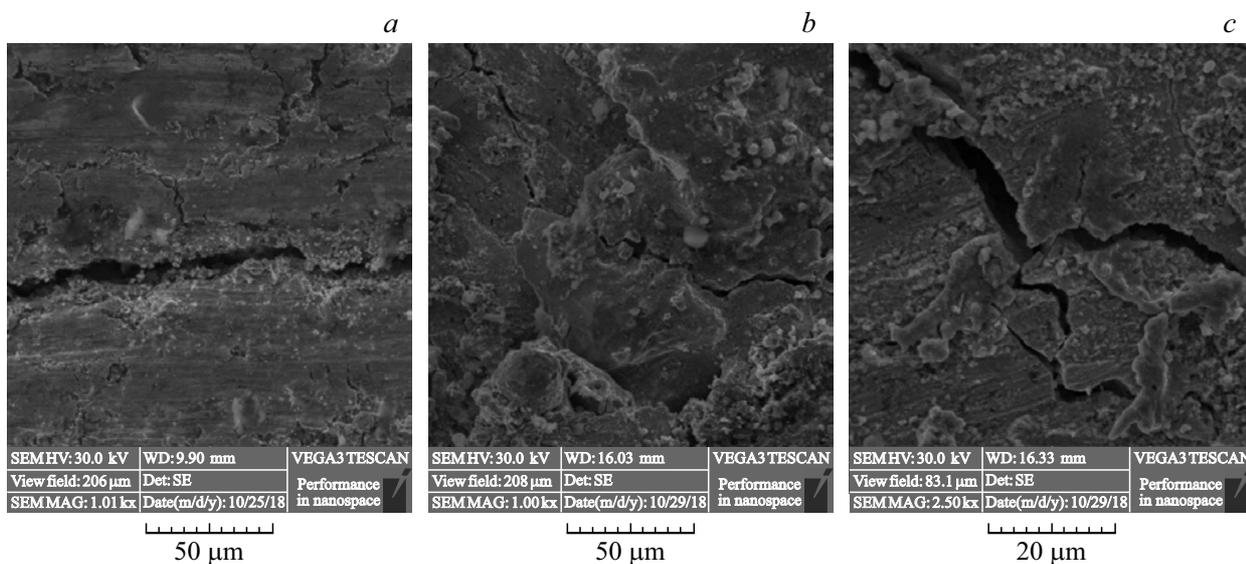


Рис. 4. Поверхность разрушения ударника с развитой системой микро- и макротрещин.

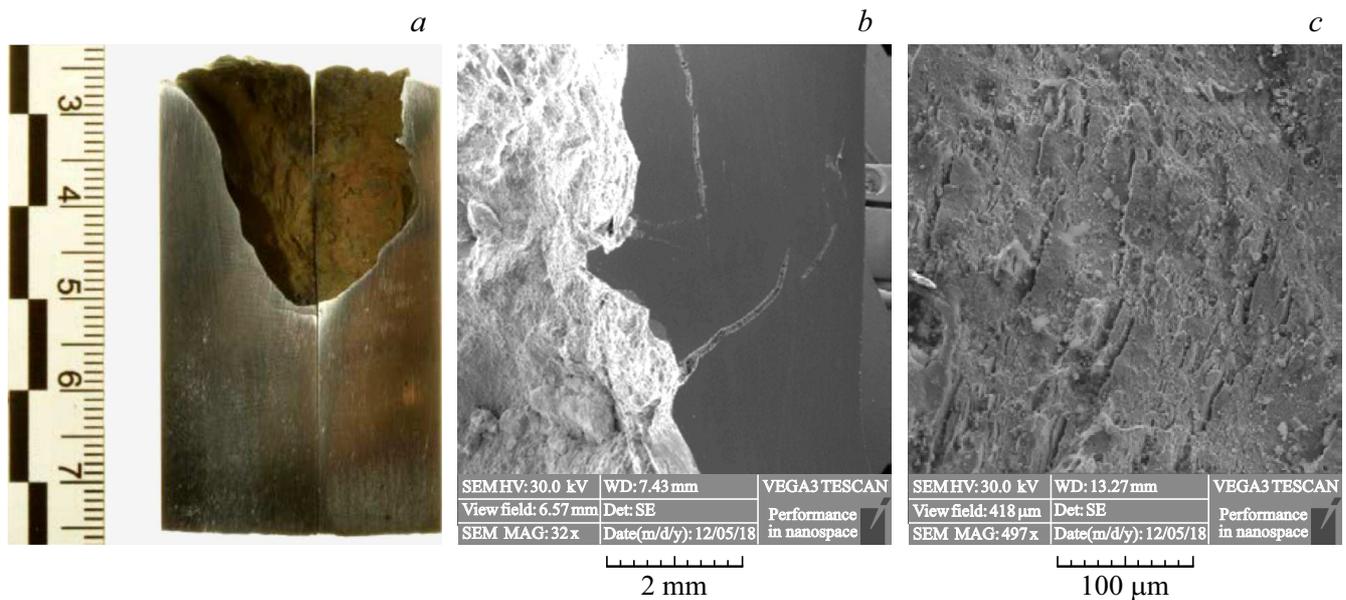


Рис. 5. Вид кратера в разрезе (а) и характерные микроструктуры: b — поверхности разрушения в толще преграды, с — поверхности разрушения в кратере.

сопровождаться целым рядом превращений (полиморфными превращениями, фрагментацией, ориентационной и ротационной неустойчивостью и т.д.). Фрагментация структуры является естественной предпосылкой для зарождения и роста микротрещин. Микротрещины возникают в местах структурных несовершенств: участков с повышенной плотностью дислокаций, границ блоков и т.п. Такой механизм позволяет проникающему ударнику быстро „сбрасывать“ деформированный материал. Таким образом, физической основой самозатачивания является локализация адиабатического сдвига. Как показано в [10], она происходит, если скорость деформационного упрочнения образца меньше, чем скорость размягчения от перехода работы в тепло. Для реализации явления нужна достаточно высокая скорость ударника, высокая плотность матрицы материала и подходящее структурно-фазовое состояние. Полосы адиабатического сдвига являются следствием термического разупрочнения в локальных областях деформируемых образцов. Термическое разупрочнение происходит за счет работы пластической деформации в тепло, которое из-за высоких скоростей деформации не успевает распространяться в окружающей области [11]. Кинетическая энергия должна передаваться за время, соизмеримое со временем распространения ударной волны, что и реализуется в исследуемом диапазоне скоростей соударения.

В [7] объяснено более глубокое проникание ударника из пористого сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) по сравнению с равным по массе и диаметру монолитным ударником из сплава ВНЖ-90. Наряду с этим, можно констатировать тот факт, что явление

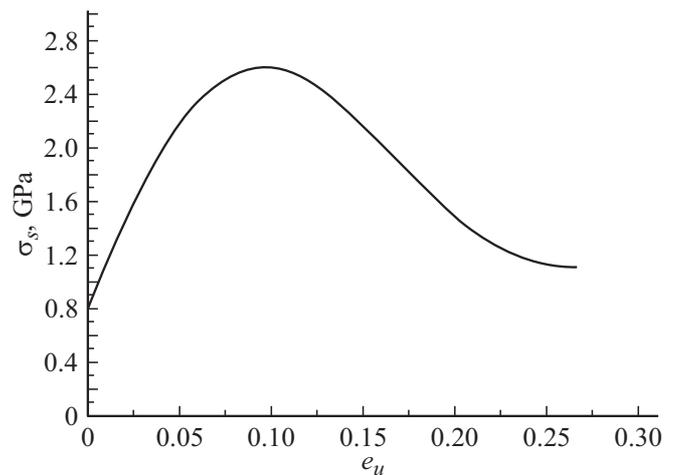


Рис. 6. Зависимость предела текучести от интенсивности пластической деформации.

„самозатачивания“ проникающего ударника благодаря локализации пластической деформации в полосах адиабатического сдвига приводит к снижению сопротивления при взаимодействии с преградой и, как следствие, увеличению глубины проникания.

2. Математическое моделирование

Для математического моделирования пластического поведения материала (ВНЖК + 10 wt.% TiWC), учитывая его структурное разупрочнение, в рам-

Параметры математической модели исследуемых материалов

Материал	ρ_{m0} , g/cm ³	c_{m0} , cm/ μ s	S_{m0}	γ_{m0}	μ_{m0} , GPa	σ_{ms} , GPa	a_s , GPa	α_{00}	ξ^*	e_u^*	c_v , J/(kg·K)
ВНЖК + 10 wt.% TiWC	16.23	0.42	1.167	1.61	144.73	1.464	0.916	1.0008	0.3	1.0	179.16
Сталь	7.85	0.457	1.49	2.26	82.0	1.0	0.66	1.0006	0.03	1.0	468

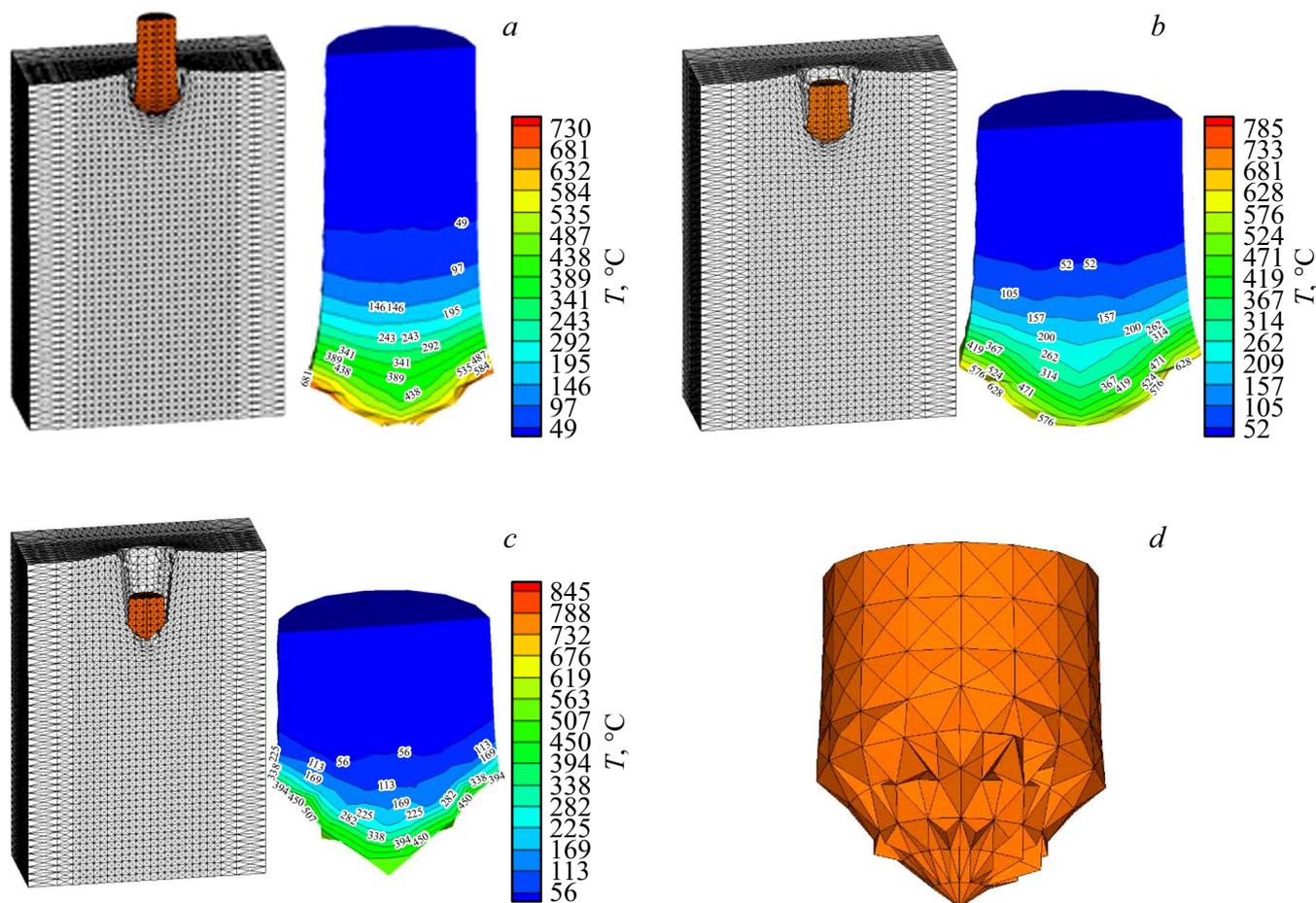


Рис. 7. Хронограмма проникания ударника из сплава (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) и распределение температуры ($^{\circ}$ С) в нем после соударения при $V_0 = 1185$ м/с, t : $a - 20$, $b - 40$, $c - 76$ μ s, $d -$ вид остатка ударника.

ках механики сплошной среды используется математическая модель пористого идеального упругопластического тела [8,12], модифицированная для описания разрушения с возможностью учета адиабатического сдвига в процессе взаимодействия ударника и преграды [13,14]. Материал ударника в процессе деформирования вначале упрочняется, а затем следует стадия структурного разупрочнения, что описывается немонотонной зависимостью напряжение–деформация (рис. 6).

Для оценки температуры при взаимодействии многокомпонентных сред в математической модели используется зависимость T от удельного объема v и удельной

внутренней энергии ε :

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

где $\mu = \alpha / \rho_{m0} v - 1$, $\alpha = v / v_m$, ρ_{m0} , v_m — начальная плотность и удельный объем материала матрицы.

Параметры математической модели пористого композиционного материала (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) и стали приведены в таблице, где обозначено ρ_{m0} , c_{m0} , S_{m0} , γ_{m0} , v_{m0} , σ_{ms} — плотность, объемная скорость звука, коэффициент наклона ударной адиабаты, коэффициент Грюнайзена, модуль сдвига и динамический предел те-

кучести материала матрицы соответственно, a_s , α_{00} , ξ^* , e_u^* — константы модели разрушения материала.

Расчеты проведены с помощью программного комплекса [15].

Результаты математического моделирования, повторяющие условия выстрела при $V_0 = 1185$ m/s, приведены на рис. 7. Расчет проведен до полной остановки процесса внедрения.

Расчетная глубина кратера составляет $h = 21.62$ mm (расхождение с экспериментом $\Delta = 3.6\%$), масса остатка ударника $m_{\text{rem}} = 7.96$ g ($\Delta = 11\%$).

При взаимодействии ударника с преградой происходит его срабатывание. В головной части происходит „самозатачивание“. Расчетная форма остатка ударника совпадает с данными эксперимента (рис. 7, *d*, рис. 2, *a*). Фрагменты разрушенного материала выносятся вверх из кратера, дополнительно расширяя его стенки за счет абразивного эффекта. При данной скорости удара в ударнике достигается тот уровень температуры, который способствует разупрочнению материала при пластической деформации и адиабатическому сдвигу. На рис. 1 приведена расчетная кривая зависимости глубины кратера от скорости удара, полученная для ударника из материала (ВНЖК + 10 wt.% TiWC). Наблюдается удовлетворительное согласование с экспериментальными данными.

Заключение

Проведены баллистические испытания ударников из пористого композиционного материала (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) в сравнении с массогабаритным аналогом из традиционного состава ВНЖ-90 при проникании в стальную преграду в широком диапазоне скоростей удара.

Наблюдаемое превышение глубины проникания ударников из композита (ВНЖК + 10 wt.% TiWC) по сравнению с ударником из ВНЖ-90 [7] объясняется, в том числе режимом „самозатачивания“ ударника при взаимодействии с преградой, благодаря адиабатическому сдвигу, реализующемуся при деформировании и разрушении материала в исследуемом диапазоне скоростей соударения.

Усовершенствована методика математического моделирования разрушения ударников из пористого сплава на основе вольфрама с упрочняющим наполнителем при взаимодействии с бронепреградами с возможностью учета адиабатического сдвига в процессе взаимодействия с преградой.

Благодарности

В настоящей 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] Черняк Г.Б., Поварова К.Б. Вольфрам в боеприпасах. Научное издание. Под ред. И.Н. Торгуна. М.: ФГУП „ЦНИИХМ“, 2014. 360 с.
- [2] Герасимов А.В., Глазырин В.П., Зелепугин С.А., Коняев А.А., Орлов Ю.Н., Пашков С.В., Толкачев В.Ф., Христенко Ю.Ф. Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / Под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 568 с.
- [3] 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. [Povarova K.B., Alymov M.I., Drozdov A.A., Evstratov E.V., Gavrilin O.S., Kachnov A.I., Salko A.E. // Russian Metallurgy (Metally). 2007. Vol. 2007. N 6. P. 499–505.]
- [4] Поварова К.Б., Алымов М.И., Дроздов А.А. // Вопросы материаловедения. 2008. № 2 (54). С. 94–99.
- [5] Брагов А.М., Чувильдеев В.Н., Милёхин Н.В., Филиппов А.Р., Константинов А.Ю., Сахаров Н.В. // Физическая мезомеханика. 2018. № 2 (21). С. 96–102. DOI: 10.24411/1683-805X-2018-12010/
- [6] Толкачев В.Ф., Зелепугин С.А., Козлов В.С. // Вестник Тамбовского ун-та. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. Вып. 3. С. 1354–1357. ISSN 1810-0198. DOI: 1020310/1810-0198-2016-21-3-1354-1357
- [7] Ищенко А.Н., Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Буркин В.В., Рogaев 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. DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44945.16755 [Ishchenko A.N., Afanas'eva S.A., Belov N.N., Burkin V.V., Rogayev K.S., Sammel' A.Y., Skosyrskii A.B., Tabachenko A.N., Yugov N.T. // Tech. Phys. Lett. 2017. Vol. 43. N 9. P. 796–799.]
- [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] Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Агафонов С.В., Рogaев К.С. Экспериментальный баллистический комплекс. Патент на изобретение № 2591132 от 20 июня 2016.
- [10] Наймарк О.Б., Соковинова М.А. // Математическое моделирование систем и процессов. 1995. № 3. С. 71–76.
- [11] Буракова С.Н., Гордолов Ю.А. // ДАН. 2007. Т. 417. № 6. С. 756–759.
- [12] 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.

- [13] Старенченко В.А., Валуйская Л.А., Фахрутдинова Я.Д., Соловьева Ю.А., Белов Н.Н. // Изв. Вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 2. С. 76–87.
- [14] Липатникова Я.Д., Белов Н.Н., Югов Н.Т., Старенченко В.А. // Изв. Вузов. Физика. 2018. Т. 61. № 3. С. 133–139.
- [15] 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.