

УДК 623.093

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-3-41-54

Численное исследование влияния угла контакта пули 7,62 мм «АРМ2» и бронелистов кабин броневедомобилей из стальных сплавов на степень проникновения пули

Н. Шаш, В.Н. Зузов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Numerical Simulation of the Impact of the Contact Angle between a 7.62 mm ARM2 Bullet and Steel Alloy Armored Plates of Armored Vehicle Cabins on the Degree of Bullet Penetration

N. Shash, V.N. Zuzov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: zuzvaleru@rambler.ru, nebrasshash@mail.ru



Исследовано влияние угла контакта пули и пластин, выполненных из трех видов стальных сплавов разной толщины, на степень проникновения пули методом конечных элементов в программном комплексе LS-DYNA применительно к кабинам броневедомобилей. Рассмотрен процесс пробития пулей 7,62 мм «АРМ2» (с жестким стальным сердечником) и только ее сердечником стальных пластин из сплавов Armoх 560Т, Hardox 400 и Weldox 700Е при скорости удара пули 830 м/с и разных значениях угла контакта (30...90°) и толщины пластины (3...8 мм). Основные результаты расчетов включают в себя значения остаточных скорости и кинетической энергии пули и ее сердечника после пробития пластины, а также прогнозирование механизма ее разрушения. Полученные данные позволят обеспечить кабинам броневедомобилей степень защиты по европейскому стандарту EN 1063 (высший уровень BR7) с минимальной толщиной пластины.

Ключевые слова: броневые стали, пуля «АРМ2», угол контакта пули, EN 1063, LS-DYNA, конечно-элементная модель



This paper investigates the impact of the contact angle between the bullet and the plates made of three types of steel alloys of different thickness on the degree of bullet penetration. The finite element method (FEM) in the LS-DYNA software package is used for investigating the impact on the cabins of armored vehicles. The authors examine the process of penetrating steel plates of Armoх560Т, Hardox 400 and Weldox 700Е alloys by a 7.62 mm ARM2 bullet (with a hard steel core) and only by the bullet core, with the bullet velocity of 830 m/s and various contact angles (30–90°) and plate thickness (3–8 mm). The main calculation results include the residual velocity and the residual kinetic energy of the bullet and the bullet core after the plate penetration, as well as predicting the mechanism of plate failure. Using the results obtained, it is possible to provide the degree of

protection according to the European standard EN 1063 (the highest BR7 level) with the minimum plate thickness.

Keywords: armored steel, APM2 bullet, bullet contact angle, EN 1063, LS-DYNA, finite element model

Большинство исследователей в сфере бронезащиты постоянно работают над улучшением ее характеристик, стараясь обеспечить надлежащую защиту бронированным объектам и максимально снизить их стоимость и массу. Это побудило их к поиску легких материалов, стойких к проникновению пули, в том числе алюминиевых сплавов, керамических и композитных материалов [1–4]. Однако их широкое применение сдерживается высокой стоимостью таких материалов и производства, что является основной причиной массового использования броневых сталей.

В связи с этим рассмотрены бронелисты (пластины) из известных стальных сплавов, используемых для бронезащиты кабин броневых автомобилей широкого назначения (в том числе инкассаторских), установленные под разными углами к траектории движения для уменьшения толщины броневых сталей. Следует отметить, что публикаций, в которых описано влияние угла между пулей и стальной пластиной (СП), немного. В частности, механическое поведение и деформация СП при контакте с пулей под углом описаны в книге [5], а влияние угла между пулей и листами из алюминиевых и керамических сплавов на сопротивление прониканию пули — в статьях [6, 7].

В данной работе исследован процесс пробития пулей 7,62 мм «APM2» (с жестким стальным сердечником) и непосредственно ее сердечником пластин из стальных сплавов Armoх 560Т, Hardox 400 и Weldox 700Е при скорости удара пули 830 м/с и разных углах контакта и толщинах СП. Основные результаты расчетов включают в себя значения остаточных скорости и кинетической энергии пули и ее сердечника после пробития пластины и иллюстрации механизма ее разрушения.

Цель работы — исследование влияния угла контакта пули и пластины из трех стальных сплавов разной толщины на степень ее проникновения в СП методом конечных элементов в программном комплексе LS-DYNA на базе рациональных конечно-элементных моделей (КЭМ) пластины и пули, позволяющих получать результаты с приемлемой точностью и минимальным временем вычислений при использовании реша-

теля LS-DYNA, для уменьшения толщины пластины путем формирования угла контакта, исключаяющего проникновение пули в СП.

Таким образом, можно обеспечить высшую степень защиты BR7 европейского стандарта EN 1063 с минимальной толщиной пластины.

Численное моделирование. Аналитические уравнения. Аналитическое решение построено на использовании модифицированной модели Джонсона–Кука для моделирования мишени и пули (как наиболее подходящей к подобным задачам [8]). Эта модель определяет следующее соотношение для эквивалентного напряжения (напряжения по Мизесу) [8]:

$$\sigma_{\text{ЭК}} = (A + B\varepsilon_{\text{ЭК}}^n)(1 + \dot{\varepsilon}_{\text{ЭК}}^*)^C (1 - T^{*m}),$$

где A, B, n, C, m — константы, зависящие от материала; $\varepsilon_{\text{ЭК}}$ — эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}_{\text{ЭК}}^*$ — нормированная эквивалентная скорость пластической деформации, $\dot{\varepsilon}_{\text{ЭК}}^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$ ($\dot{\varepsilon}_0$ — справочная скорость деформации, полученная в квазистатических испытаниях); T^* — гомологическая температура.

Для описания разрушения материала в программном пакете LS-DYNA, применяемого в качестве решателя, использован критерий, предложенный Кокрофтом и Латом [8],

$$W = \int_0^{\varepsilon_{\text{ЭК}}} \langle \sigma_1 \rangle d\varepsilon_{\text{ЭК}} \leq W_{cr},$$

где σ_1 — наибольшее главное напряжение, $\langle \sigma_1 \rangle = \sigma_1$ при $\sigma_1 \geq 0$ и $\langle \sigma_1 \rangle = 0$ при $\sigma_1 < 0$; W_{cr} — общая пластическая работа при разрушении.

Значения параметров материалов стальных сплавов и пули, относящиеся к модифицированной модели Джонсона–Кука, взяты из публикаций [9, 10].

Конечно-элементная модель. На рис. 1 показаны исследованные КЭМ пули и пробиваемой пластины при угле контакта $\alpha = 30, 45, 60, 70, 80, 90^\circ$.

Расчеты процесса проникания пули 7,62 мм «APM2» и ее сердечника в СП из броневых сплавов Armoх 560Т, Hardox 400 и Weldox 700Е проведены при скорости удара пули 830 м/с и разных значениях толщины СП ($h = 3, 4, 5, 6, 7$ и 8 мм).

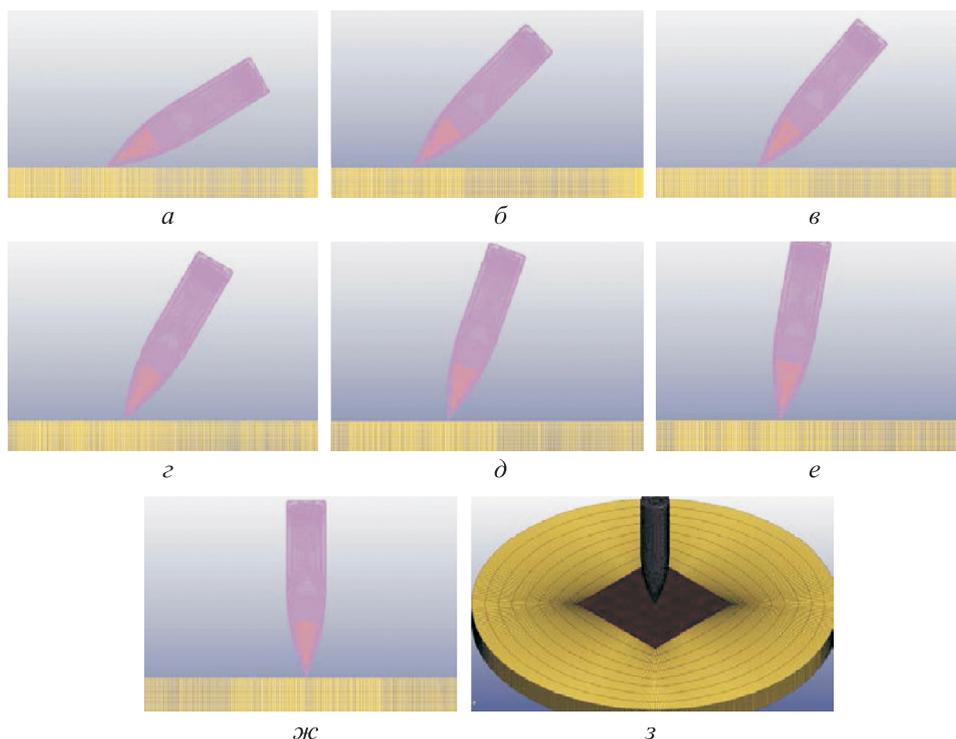


Рис. 1. КЭМ пули и пробиваемой пластины:
 а — вариант 1, $\alpha = 30^\circ$; б — вариант 2, $\alpha = 45^\circ$; в — вариант 3, $\alpha = 50^\circ$; г — вариант 4, $\alpha = 60^\circ$; д — вариант 5, $\alpha = 70^\circ$;
 е — вариант 6, $\alpha = 80^\circ$; ж — вариант 7, $\alpha = 90^\circ$; з — трехмерное представление КЭМ

Результаты исследований. Выполнено 18 численных расчетов для каждого варианта (см. рис. 1).

Вариант 1: угол контакта 30° . При толщине СП 3 мм пуля не пробивала пластину из сплава Arмох 560Т, а скользнула по ней без существенной потери кинетической энергии и значительной деформации в области встречи (рис. 2, а) с перемещением СП по оси Z (пер-

пендикулярной ее плоскости) около 6,2 мм (рис. 2, г). То же относится и к СП из сплава Hardox 400 (рис. 2, б) с перемещением по оси Z около 7,5 мм. В пластину из сплава Weldox 700Е пуля проникла в продольном направлении (рис. 2, в).

При толщине СП 4, 5, 6, 7 и 8 мм пуля скользнула по пластинам из всех сплавов. При толщине СП 6 мм сердечник пули проник

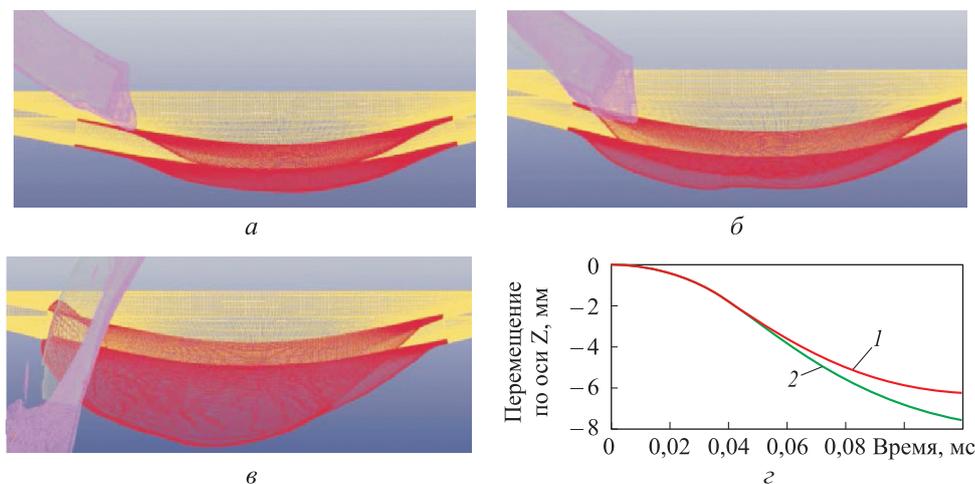


Рис. 2. Результаты моделирования взаимодействия пули и СП толщиной 3 мм при угле контакта 30° :
 а-в — картины проникания пули в СП из сплавов Arмох 560Т, Hardox 400 и Weldox 700Е соответственно;
 г — кривые перемещения СП из сплавов Arмох 560Т (1) и Hardox 400 (2) по оси Z

в пластину из сплава Weldox 700E больше, чем в СП из сплавов Arмох 560Т и Hardox 400 (рис. 3, а–в). Таким образом, потеря (изменение) кинетической энергии (выраженная в значениях остаточной кинетической энергии $E_{ост}$) сердечника пули при проникновении в СП из сплава Weldox 700E больше, чем из сплавов Arмох 560Т и Hardox 400 (рис. 3, г).

Вариант 2: угол контакта 45° . При толщине СП 3 мм пуля и ее сердечник пробили пластины из всех сплавов, причем для пули

наибольшие деформации отмечены в сплаве Weldox 700E.

При толщине СП 4 мм пуля скользнула по пластинам из сплавов Arмох 560Т и Hardox 400 (рис. 4, а, б) и пробил СП из сплава Weldox 700E (рис. 4, в). При $h = 5$ мм пуля также скользнула по СП из сплавов Arмох 560Т и Hardox 400. Что касается пластины из сплава Weldox 700E, то небольшая часть оболочки пули пробил ее.

При толщине СП 4 и 5 мм сердечник пули скользнул по пластинам из сплавов Arмох 560Т

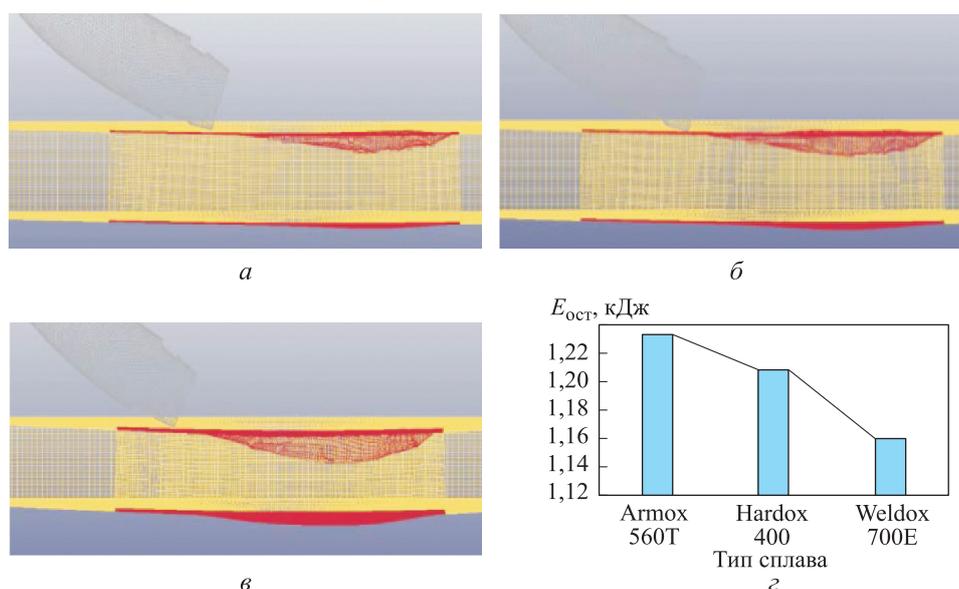


Рис. 3. Результаты моделирования взаимодействия сердечника пули и СП толщиной 6 мм при угле контакта 30° :

а–в — картины проникания сердечника пули в СП из сплавов Arмох 560Т, Hardox 400 и Weldox 700E соответственно; г — потеря кинетической энергии сердечника пули

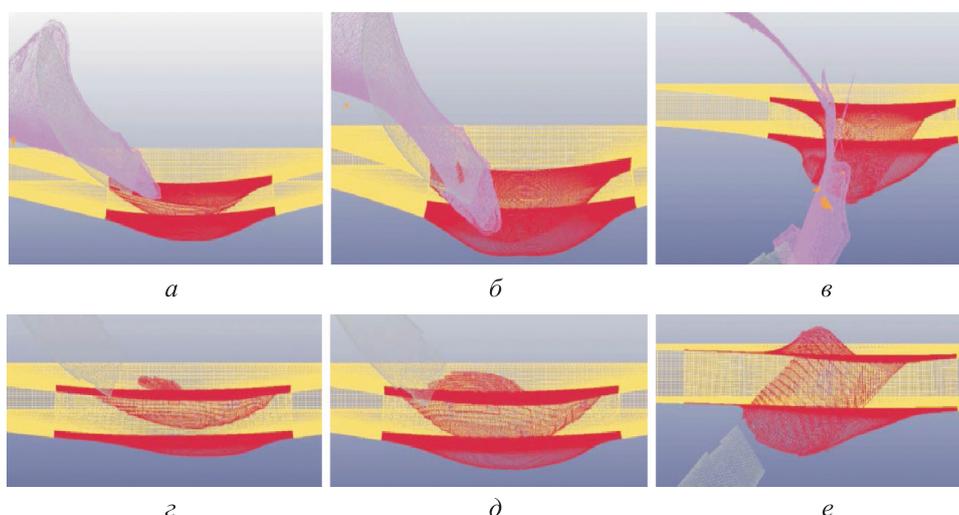


Рис. 4. Картины проникания пули (а–в) и ее сердечника (г–е) в СП из разных сплавов толщиной 4 мм под углом 45° :

а и г — Arмох 560Т; б и д — Hardox 400; в и е — Weldox 700E

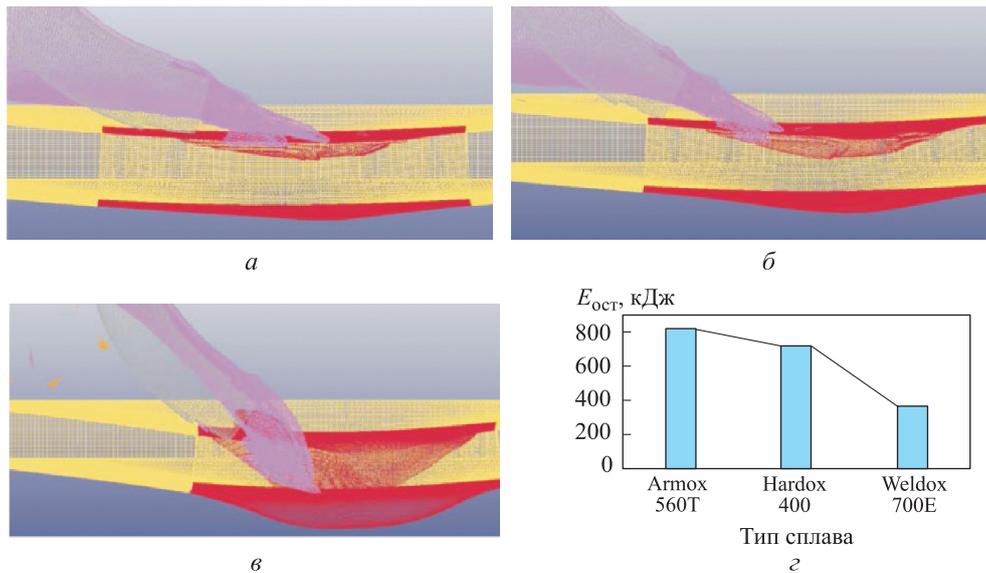


Рис. 5. Результаты моделирования взаимодействия пули и СП толщиной 6 мм при угле контакта 45°: а–в — картины проникания пули в СП из сплавов Armoх 560Т, Hardox 400 и Weldom 700E соответственно; з — потеря кинетической энергии пули

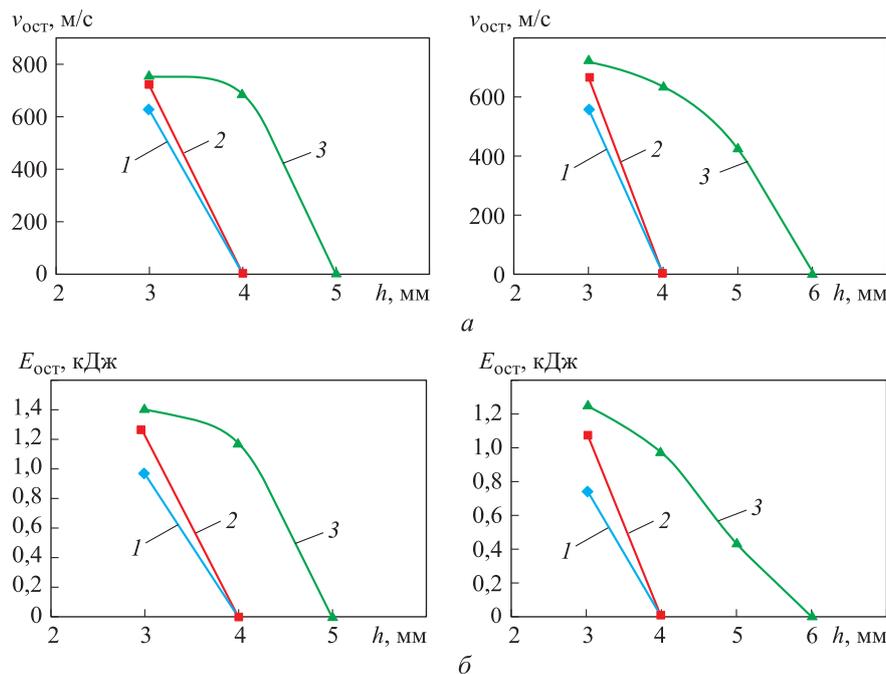


Рис. 6. Зависимости остаточных скорости $v_{ост}$ (а) и кинетической энергии $E_{ост}$ (б) пули (слева) и ее сердечника (справа) от толщины h и типа сплава пластины при угле контакта 45°: 1 — Armoх 560Т; 2 — Hardox 400; 3 — Weldom 700E

и Hardox 400 (рис. 4, з, д) и пробил СП из сплава Weldom 700E (рис. 4, е). При этом степень проникновения в СП из сплава Hardox 400 больше, чем в СП из сплава Armoх 560Т.

При толщине СП 6, 7 и 8 мм пуля и ее сердечник скользнули по пластинам из всех сплавов. Однако степень проникновения пули в СП из сплава Weldom 700E больше, чем в СП из

сплавов Armoх 560Т и Hardox 400 (рис. 5, а–в). На рис. 5, з показана потеря кинетической энергии пули при толщине пластины 6 мм для разных сплавов.

При моделировании предполагалось, что остаточные кинетическая энергия и скорость пули являются нулевыми, если она не пробита преграды. На рис. 6 показаны зависимости этих

остаточных параметров пули и ее сердечника от толщины и типа сплава пластины при угле контакта 45° .

Вариант 3: угол контакта 50° . При толщине СП 3 мм пуля и ее сердечник пробил СП из всех сплавов. Причем отверстие от пули в пластине больше, чем диаметр пули. В СП из сплава Weldox 700E образовалось почти в 2 раза большее отверстие от пули, чем в СП из других сплавов.

При толщине СП 4 мм пуля скользнула по пластине из сплава Arмох 560Т и пробил СП

из сплавов Hardox 400 и Weldox 700E. Сердечник пули пробил пластины из всех сплавов.

При толщине СП, равной 5 мм, пуля скользнула по пластинам из сплавов Arмох 560Т и Hardox 400 (рис. 7, а, б) и пробил насквозь СП из сплава Weldox 700E (рис. 7, в).

Сердечник пули скользнул по пластине из сплава Arмох 560Т (рис. 7, з), остался в СП из сплава Hardox 400 (рис. 7, д) и пробил СП из сплава Weldox 700E (рис. 7, е).

При толщине СП 6 мм пуля скользнула по пластинам из сплавов Arмох 560Т и Hardox 400

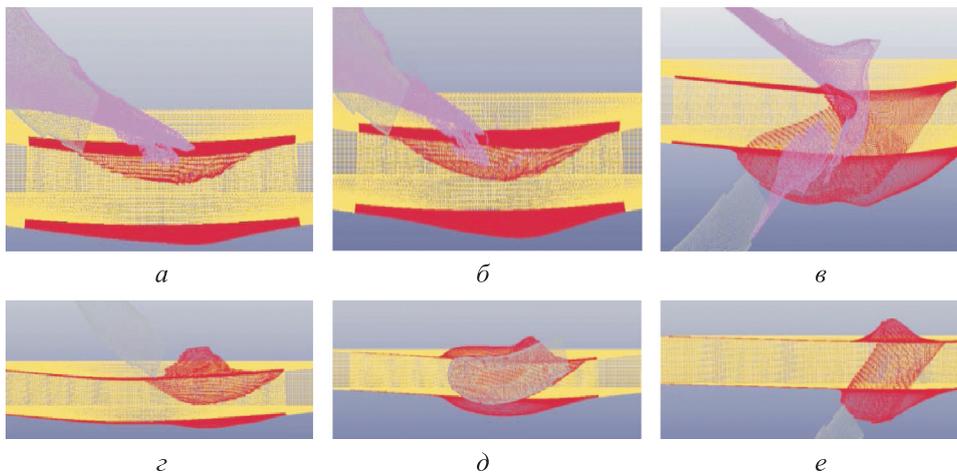


Рис. 7. Картины проникания пули (а–в) и ее сердечника (з–е) в пластины из разных сплавов толщиной 5 мм под углом 50° : а и з — Arмох 560Т; б и д — Hardox 400; в и е — Weldox 700E

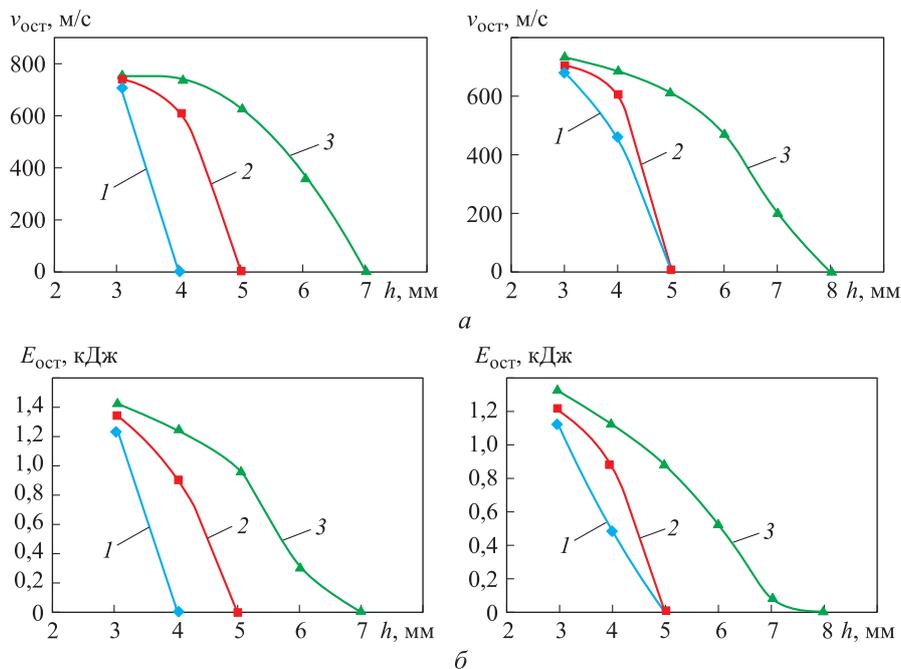


Рис. 8. Зависимости остаточной скорости $v_{ост}$ (а) и кинетической энергии $E_{ост}$ (б) пули (слева) и ее сердечника (справа) от толщины h и типа сплава пластины при угле контакта 50° : 1 — Arмох 560Т; 2 — Hardox 400; 3 — Weldox 700E

и пробил насквозь СП из сплава Weldox 700E. Сердечник пули скользнул по пластинам толщиной 6 и 7 мм из сплавов Arмох 560Т и Hardox 400 и пробил пластину из сплава Weldox 700E.

При толщине СП 7 и 8 мм пуля также скользнула по пластинам из сплавов Arмох 560Т

и Hardox 400. Что касается пластины из сплава Weldox 700E, то пуля скользнула по ней, но уже с проникновением (около 96 %). При толщине СП 8 мм сердечник пули остался в пластине из сплава Weldox 700E. Зависимости остаточных скорости и кинетической энергии пули и ее сердечника от толщины и типа сплава

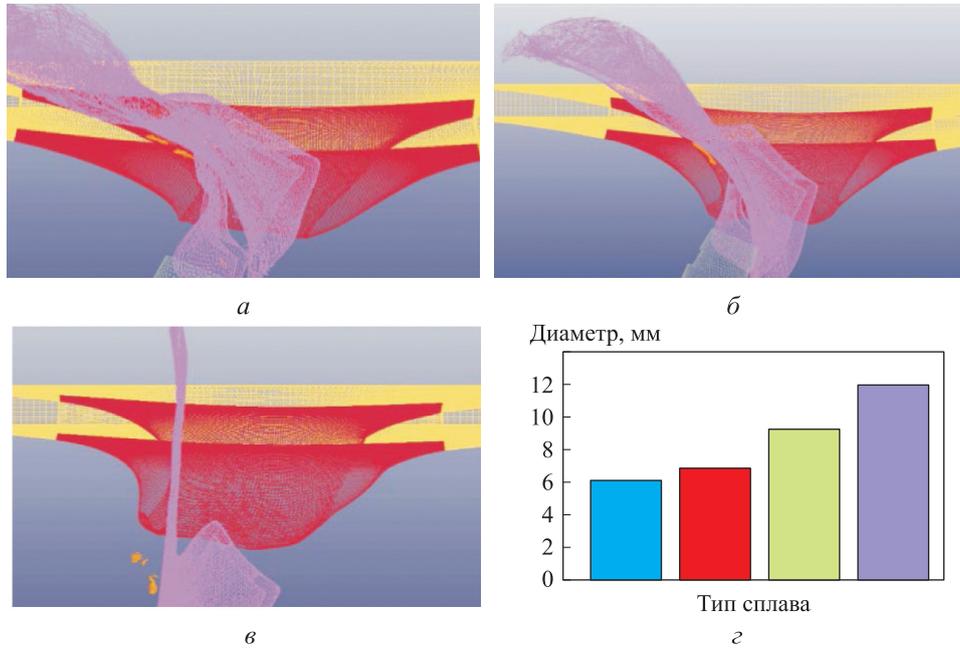


Рис. 9. Результаты моделирования взаимодействия пули и СП толщиной 3 мм при угле контакта 60°: а-в — картина проникания пули в СП из сплавов Arмох 560Т, Hardox 400 и Weldox 700E соответственно; г — значения диаметров стального сердечника пули (■) и отверстий в СП из сплавов Arмох 560Т (■), Hardox 400 (■) и Weldox 700E (■)

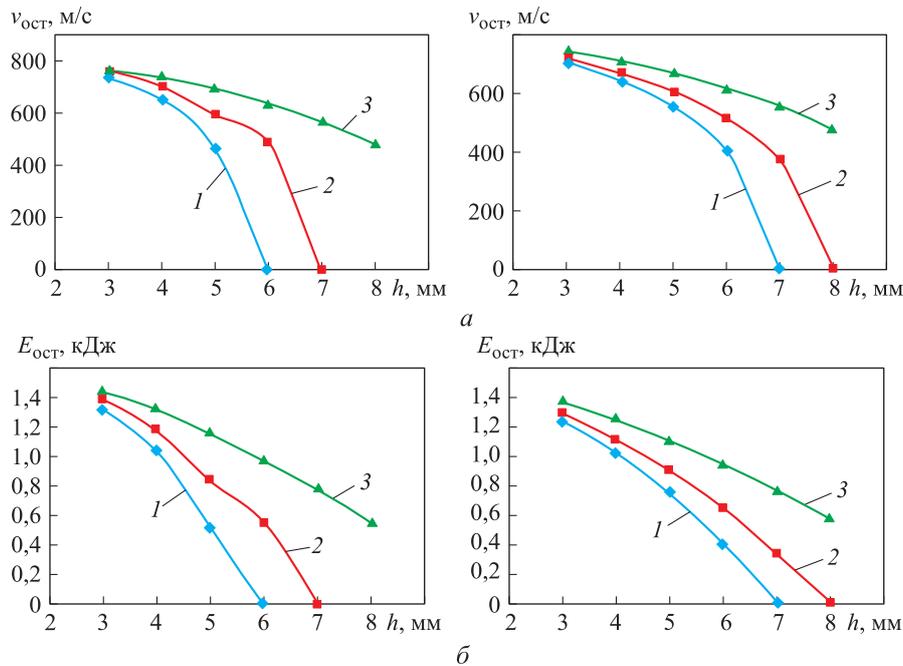


Рис. 10. Зависимости остаточных скорости $v_{ост}$ (а) и кинетической энергии $E_{ост}$ (б) пули (слева) и ее сердечника (справа) от толщины h и типа сплава пластины при угле контакта 60°: 1 — Arмох 560Т; 2 — Hardox 400; 3 — Weldox 700E

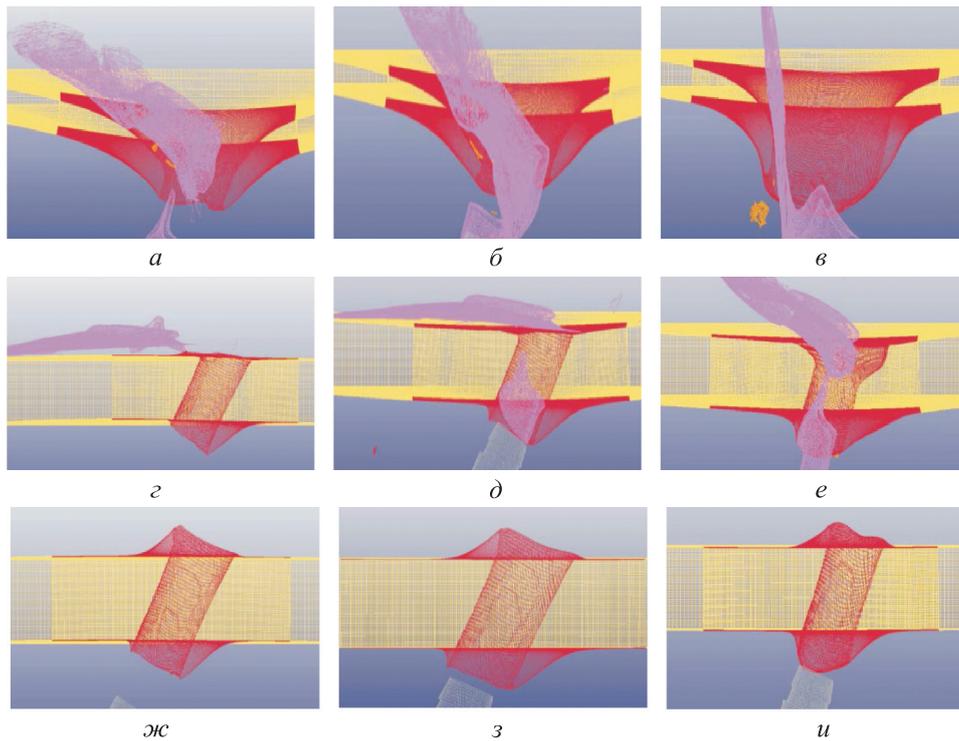


Рис. 11. Картины проникания пули в СП толщиной 3 (а-в) и 7 мм (г-е) и сердечника пули в СП толщиной 8 мм (ж-и) при угле контакта 70°:
а, г, ж — Armoх 560Т; б, д, з — Hardox 400; в, е, и — Weldom 700E

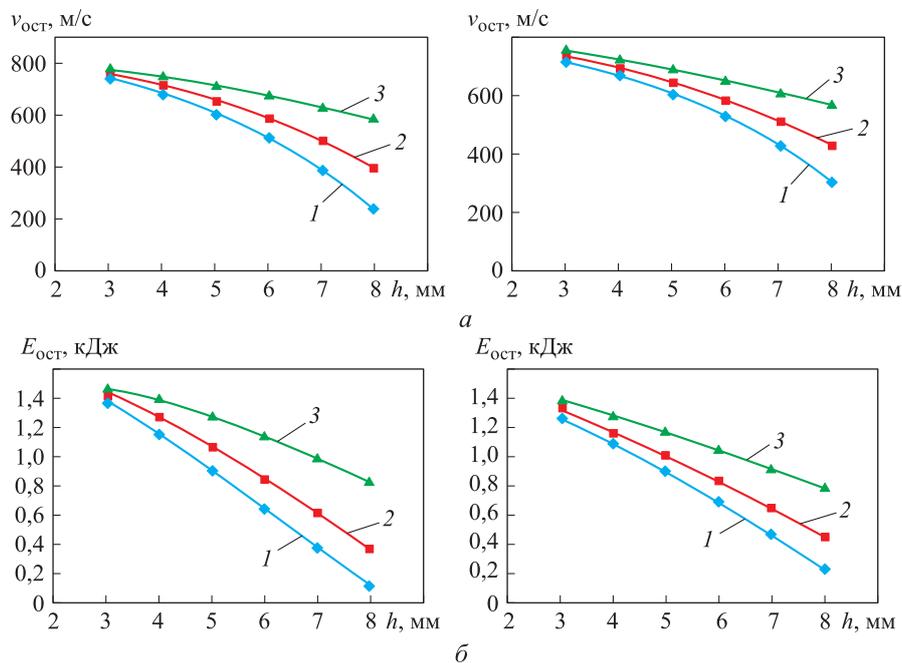


Рис. 12. Зависимости остаточных скорости $v_{\text{ост}}$ (а) и кинетической энергии $E_{\text{ост}}$ (б) пули (слева) и ее сердечника (справа) от толщины h и типа сплава пластины при угле контакта 70°:
1 — Armoх 560Т; 2 — Hardox 400; 3 — Weldom 700E

ва пластины при угле контакта 50° приведены на рис. 8.

Вариант 4: угол контакта 60°. При толщине СП 3, 4 и 5 мм пуля пробила пластины из

всех сплавов. Как видно из рис. 9, отверстие от пули в СП толщиной 3 мм больше, чем диаметр сердечника пули. При толщине СП 6 мм пуля скользнула по пластине из сплава Armoх 560Т

и пробила СП из сплавов Hardox 400 и Weldox 700E.

При толщине СП 7 и 8 мм пуля скользнула по пластинам из сплавов Arмоx 560Т и Hardox 400

и пробила СП из сплава Weldox 700E. При толщине СП 3, 4, 5 и 6 мм сердечник пули пробил пластины из всех сплавов, а при толщине СП 7 мм он остался в пластине Arмоx 560Т и

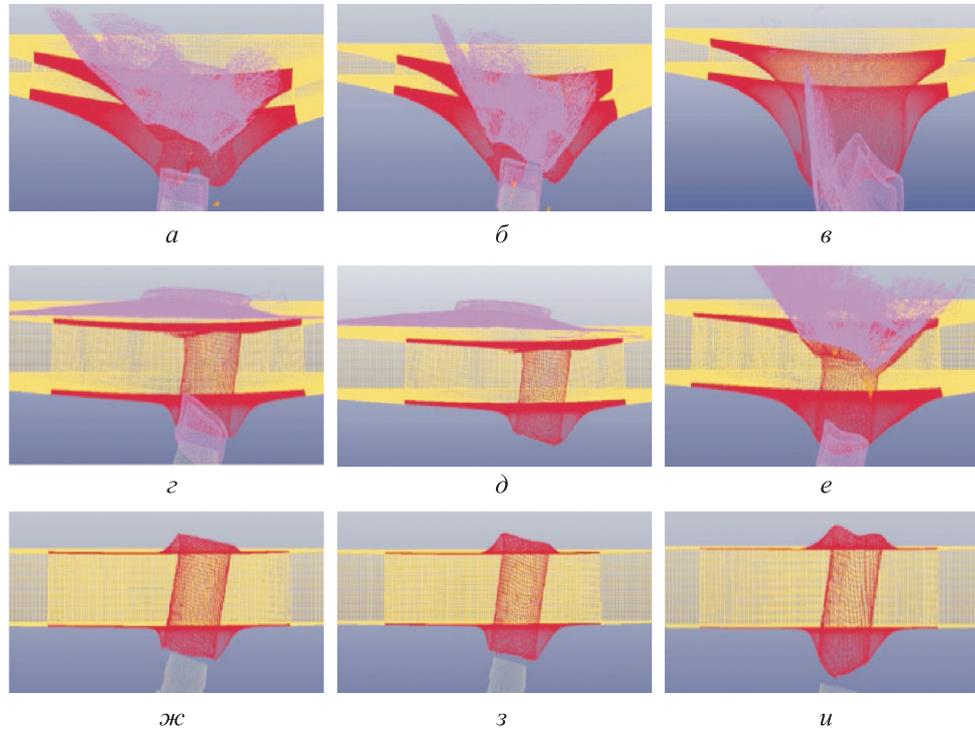


Рис. 13. Картины проникания пули в СП толщиной 3 (а-в) и 6 мм (г-е) и сердечника пули в СП толщиной 7 мм (ж-и) при угле контакта 80°:

а, г, ж — Arмоx 560Т; б, д, з — Hardox 400; в, е, и — Weldox 700E

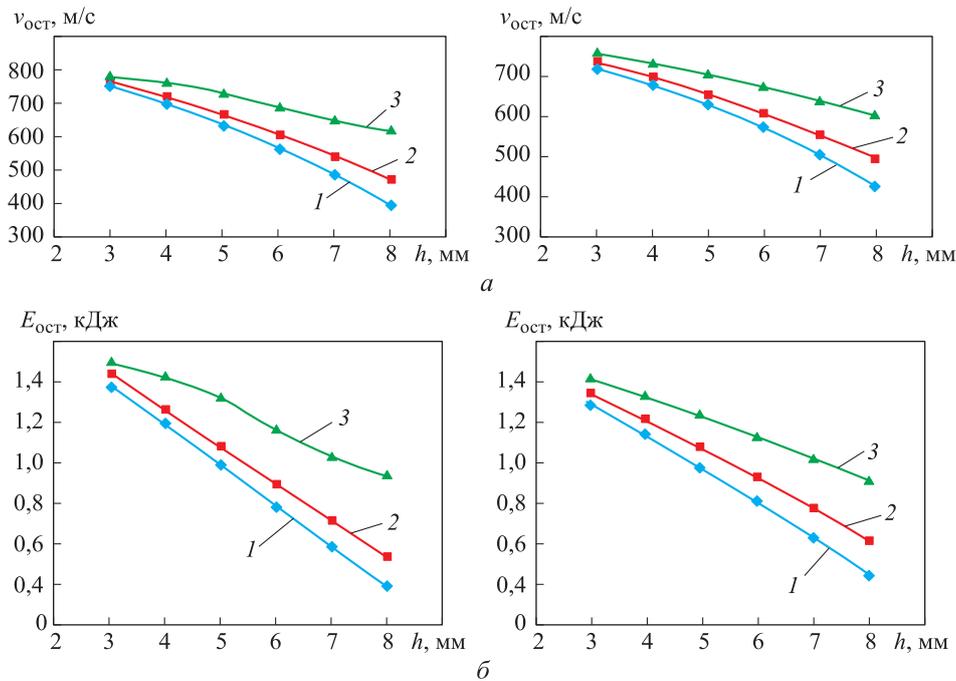


Рис. 14. Зависимости остаточных скорости $v_{ост}$ (а) и кинетической энергии $E_{ост}$ (б) пули (слева) и ее сердечника (справа) от толщины h и типа сплава пластины при угле контакта 80°: 1 — Arмоx 560Т; 2 — Hardox 400; 3 — Weldox 700E

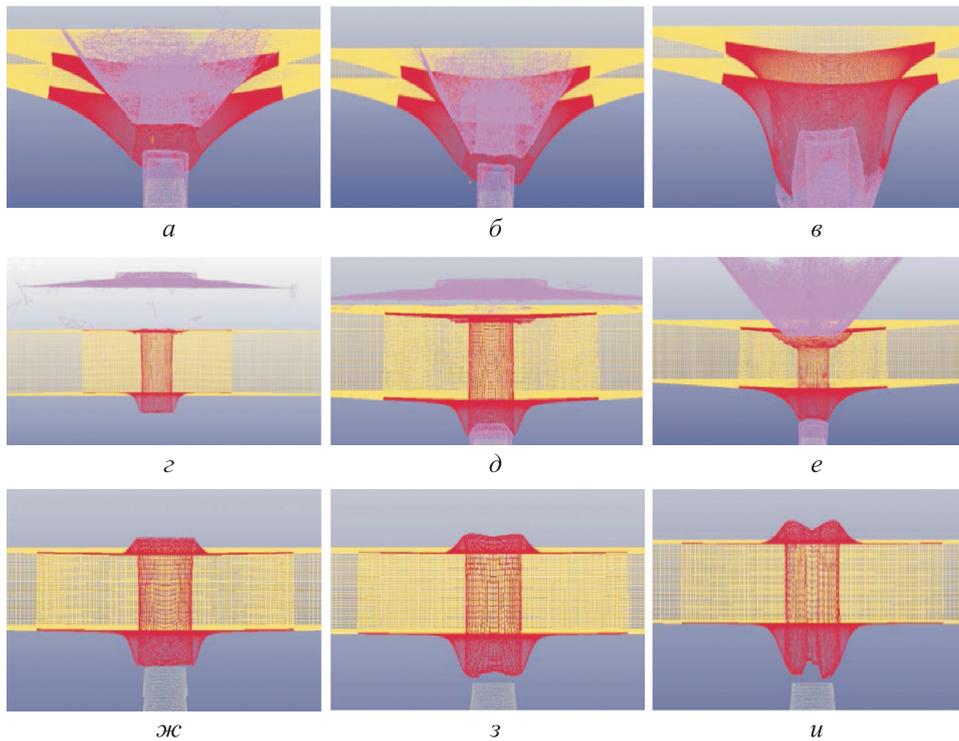


Рис. 15. Картины проникания пули в СП толщиной 3 (а–в) и 8 мм (г–е) и сердечника пули в СП толщиной 6 мм (ж–и) при угле контакта 90°:
а, г, ж — Armoх 560Т; б, д, з — Hardox 400; в, е, и — Weldox 700E

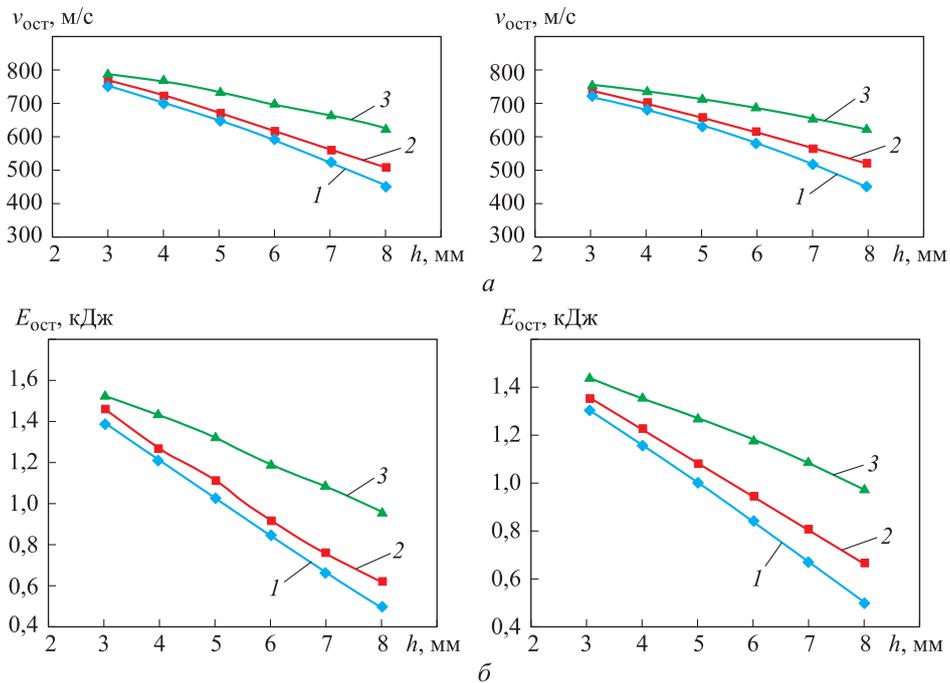


Рис. 16. Зависимости остаточных скорости $v_{ост}$ (а) и кинетической энергии $E_{ост}$ (б) пули (слева) и ее сердечника (справа) от толщины h и типа сплава пластины при угле контакта 90°:
1 — Armoх 560Т; 2 — Hardox 400; 3 — Weldox 700E

пробил СП из сплавов Hardox 400 и Weldox 700E. При толщине СП 8 мм сердечник пули остался в пластинах из сплавов Armoх 560Т и Hardox 400 и пробил СП Weldox 700E.

Зависимости остаточных скорости и кинетической энергии пули и ее сердечника от толщины и типа сплава пластины при угле контакта 60° показаны на рис. 10.

Вариант 5: угол контакта 70°. При толщине СП 3, 4, 5, 6, 7 и 8 мм пули и ее сердечник пробивали пластины из всех сплавов. На рис. 11 показаны картины проникания пули в СП толщиной 3 и 7 мм и сердечника пули в СП толщиной 8 мм.

Зависимости остаточных скорости и кинетической энергии пули и ее сердечника от толщины и типа сплава пластины при угле контакта 70° приведены на рис. 12.

Вариант 6: угол контакта 80°. При толщине СП 3, 4, 5, 6, 7 и 8 мм пули и ее сердечник пробивали пластины из всех сплавов. Картины проникания пули в СП толщиной 3 и 6 мм и

сердечника пули в СП толщиной 7 мм показаны на рис. 13.

Зависимости остаточных скорости и кинетической энергии пули и ее сердечника от толщины и типа сплава пластины при угле контакта 80° приведены на рис. 14.

Вариант 7: угол контакта 90°. При толщине СП 3, 4, 5, 6, 7 и 8 мм пули и ее сердечник пробивали пластины из всех сплавов. На рис. 15 показаны картины проникания пули в СП толщиной 3 и 8 мм и сердечника пули в СП толщиной 6 мм.

Зависимости остаточных скорости и кинетической энергии пули и ее сердечника от тол-

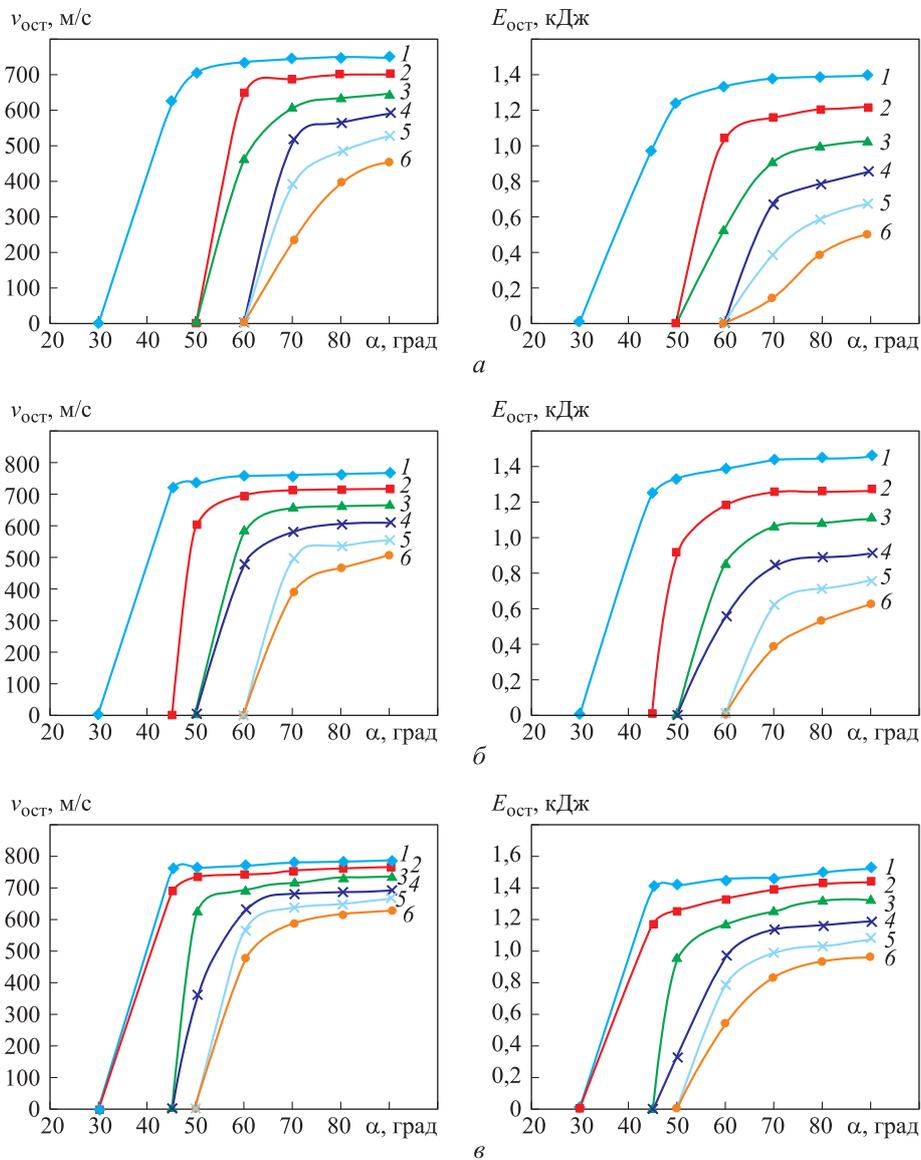


Рис. 17. Зависимости остаточных скорости $v_{ост}$ (слева) и кинетической энергии $E_{ост}$ (справа) пули от угла контакта α с СП из сплавов Arмох 560Т (а), Hardox 400 (б) и Weldox 700E (в) разной толщины: 1 — $h = 3$ мм; 2 — $h = 4$ мм; 3 — $h = 5$ мм; 4 — $h = 6$ мм; 5 — $h = 7$ мм; 6 — $h = 8$ мм

щины и типа сплава пластины при угле контакта 90° приведены на рис. 16.

Анализ результатов. На рис. 17 показаны зависимости остаточных скорости и кинетической энергии пули от угла контакта α и толщины h СП из сплавов Arмох 560Т, Hardох 400 и Weldох 700Е. Отметим, что при $h = 3$ мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 4$ и 5 мм и $\alpha < 50^\circ$, при $h = 6, 7$ и 8 мм и $\alpha < 60^\circ$ пуля не пробил пластины из сплава Arмох 560Т, а лишь скользнула по ней. При $h = 3$ мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 4$ мм и $\alpha < 45^\circ$, при $h = 5$ и 6 мм и $\alpha < 50^\circ$, при $h = 7$ и 8 мм и $\alpha < 60^\circ$ пуля также не пробил СП из сплава Hardох 400. При $h = 3$ и 4 мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 5$ и 6 мм и $\alpha < 45^\circ$, а также при $h = 7$ и 8 мм и

$\alpha < 50^\circ$ пуля лишь скользнула по пластине из сплава Weldох 700Е.

На рис. 18 приведены зависимости остаточных скорости и кинетической энергии сердечника пули от толщины и угла контакта с пластинами из сплавов Arмох 560Т, Hardох 400 и Weldох 700Е. Отметим, что сердечник пули не пробил пластину из сплава Arмох 560Т при $h = 3$ мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 4$ мм и $\alpha < 45^\circ$, при $h = 5$ и 6 мм и $\alpha < 50^\circ$, при $h = 7$ и 8 мм и $\alpha < 60^\circ$. При $h = 3$ мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 4$ мм и $\alpha < 45^\circ$, при $h = 5, 6$ и 7 мм и $\alpha < 50^\circ$, при $h = 8$ мм и $\alpha < 60^\circ$ сердечник пули также не пробил СП из сплавов Hardох 400. При $h = 3, 4$ и 5 мм и $\alpha < 30^\circ$, при $h = 6$ и 7 мм и $\alpha < 45^\circ$, при $h = 8$ мм и $\alpha < 50^\circ$ сердечник пули лишь скользнул по СП из сплава Weldох 700Е.

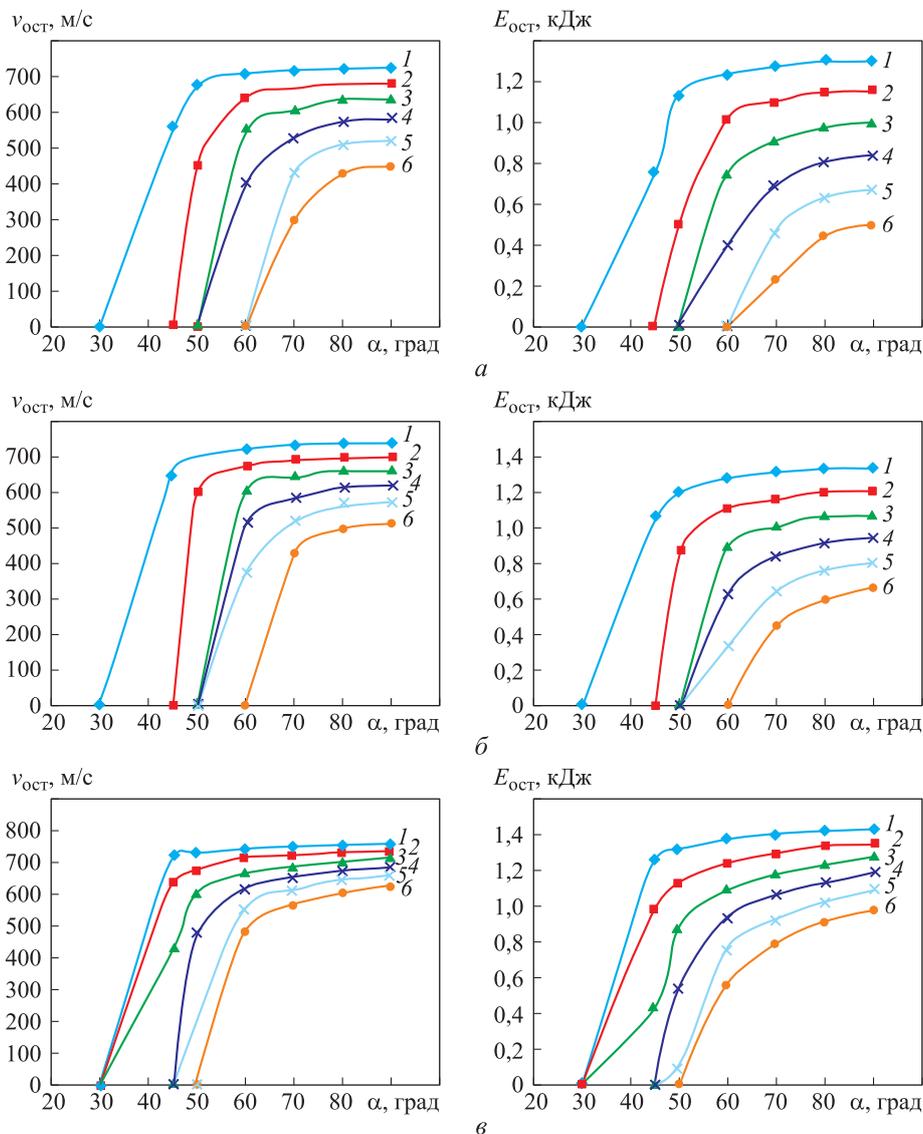


Рис. 18. Зависимости остаточных скорости (слева) и кинетической энергии (справа) сердечника пули от угла контакта α с СП из сплавов Arмох 560Т (а), Hardох 400 (б) и Weldох 700Е (в) разной толщины: 1 — $h = 3$ мм; 2 — $h = 4$ мм; 3 — $h = 5$ мм; 4 — $h = 6$ мм; 5 — $h = 7$ мм; 6 — $h = 8$ мм

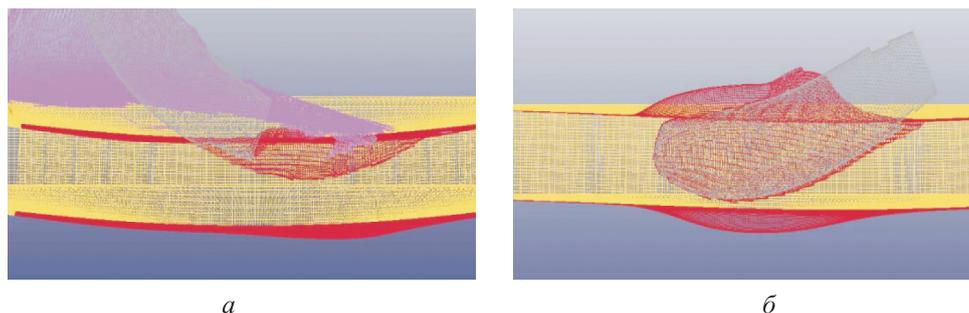


Рис. 19. Картины проникания пули (а) и ее сердечника (б) в пластину из сплава Armoх 560Т толщиной 6 мм под углом 56°

На рис. 19 показаны картины проникания пули и ее сердечника в пластину из сплава Armoх 560Т толщиной 6 мм под углом 56°, из которых видно, что СП не пробита.

Выводы

1. При толщине пластины 3 и 4 мм из сплавов Armoх 560Т, Hardox 400 и Weldox 700E влияние угла контакта пули или ее сердечника на сопротивление прониканию очень мало, если $\alpha > 50^\circ$. При толщине СП 5, 6, 7 мм и угле контакта $\alpha > 70^\circ$ это влияние также невелико.

2. Эффект от уменьшения угла контакта на сопротивление прониканию пули или ее сер-

дечника в пластину значительно повышается при толщине СП более 7 мм.

3. Для обеспечения уровня защиты BR7 можно рекомендовать использовать однослойные пластины из сплава Hardox 400 толщиной 8 мм при угле $\alpha \leq 60^\circ$, а также из сплава Armoх 560Т при толщине СП $h = 8$ мм и угле контакта $\alpha \leq 62^\circ$, $h = 7$ мм и $\alpha \leq 60^\circ$ или $h = 6$ мм и $\alpha \leq 56^\circ$ (см. рис. 19).

4. Броневые стали со свойствами, как у сплава Weldox 700E, не рекомендуется применять для обеспечения уровня защиты BR7 при угле контакта $\alpha > 50^\circ$ из-за необходимости задания относительно большой толщины бронелистов.

Литература

- [1] Шаш Н., Зузов В.Н. Численное моделирование проникания пуль стрелкового оружия в пластины из алюминиевых сплавов с использованием модифицированной модели Джонсона–Кука. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2017, № 1, с. 1–19. URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/860980.html> (дата обращения 10 ноября 2017).
- [2] Chereches T., Lixandru P., Dragnea D. Dynamical testing of composite structures made by high entropy alloys, armour steels, ceramic and polymeric materials. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2014, vol. VI, no. 1, pp. 35–39.
- [3] Kyziol L. Shooting resistance of non-metallic materials. *Polish Maritime Research*, 2007, vol. 14, pp. 68–73.
- [4] Grujicic M., Pandurangan B., Koudela K.L., Cheeseman B.A. A computational analysis of the ballistic performance of light-weight hybrid composite armors. *Applied surface science*, 2006, vol. 253, no. 2, pp. 730–745.
- [5] Гладышев С.А., Григорян В.А. *Броневые стали*. Москва, Интернет Инжиниринг, 2010. 336 с.
- [6] Børvik T., Olovsson L., Dey S., Langseth M. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, is. 7, pp. 577–589, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001.
- [7] Fawaz Z., Zheng W., Behdinin K. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armors. *Composite Structures*, 2004, vol. 63, pp. 387–395.
- [8] Шаш Н., Зузов В.Н. Влияние параметров алюминиевых сплавов на сопротивление прониканию пуль 7,62 «Шар НАТО» и «АРМ2». *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2016, № 11, с. 15–27. URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/850281.html> (дата обращения 15 ноября 2017).
- [9] Зузов В.Н., Шаш Н. Анализ противоположной стойкости броневых сталей иностранного производства. *Наука и Образование: научное издание*, 2017, № 5, с. 21–41. URL: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/1156/1084> (дата обращения 15 ноября 2017).

- [10] Børvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, is. 7, pp. 948–964, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003.

References

- [1] Shash N., Zuzov V.N. Chislennoe modelirovanie pronikaniia pul' strelkovogo oruzhiia v plasty iz aluminievyykh splavov s ispol'zovaniem modifitsirovannoi modeli Dzhonsona–Kuka [Modified Johnson–Cook Model-based Numerical Simulation of Small Arms Bullets Penetration in the Aluminum Alloy Plates]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2017, no. 1, pp. 1–19. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/860980.html> (accessed 10 November 2017).
- [2] Chereches T., Lixandru P., Dragnea D. Dynamical testing of composite structures made by high entropy alloys, armour steels, ceramic and polymeric materials. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 35–39.
- [3] Kyziol L. Shooting resistance of non-metallic materials. *Polish Maritime Research*, 2007, vol. 14, pp. 68–73.
- [4] Grujicic M., Pandurangan B., Koudela K.L., Cheeseman B.A. A computational analysis of the ballistic performance of light-weight hybrid composite armors. *Applied surface science*, 2006, vol. 253, no. 2, pp. 730–745.
- [5] Gladyshev S.A., Grigorian V.A. *Bronevye stali* [Armored steel]. Moscow, Intermet Inzhiniring publ., 2010. 336 p.
- [6] Børvik T., Olovsson L., Dey S., Langseth M. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, is. 7, pp. 577–589, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001.
- [7] Fawaz Z., Zheng W., Behdinan K. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armors. *Composite Structures*, 2004, vol. 63, pp. 387–395.
- [8] Shash N., Zuzov V.N. Vliianie parametrov aluminievyykh splavov na soprotivlenie pronikaniiu pul' 7.62 «Shar NATO» i «APM2» [Impact of Aluminum Alloy Parameters on Penetration Resistance of the Bullets 7.62 «Ball NATO» and «ARM2»]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2016, no. 11, pp. 15–27. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/850281.html> (accessed 15 November 2017).
- [9] Zuzov V.N., Shash N. Analiz protivopul'noi stoikosti bronevyykh staley inostrannogo proizvodstva [Analysis of Anti-Bullet Resistance of Armored Steels of Foreign Manufacture]. *Nauka i Obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication]. 2017, no. 5, pp. 21–41. Available at: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/1156/1084> (accessed 15 November 2017).
- [10] Børvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, is. 7, pp. 948–964, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003.

Статья поступила в редакцию 12.12.2017

Информация об авторах

ЗУЗОВ Валерий Николаевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: zuzvaleru@rambler.ru).

ШАШ Небрас (Москва) — аспирант кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: nebrasshash@mail.ru).

Information about the authors

ZUZOV Valeriy Nikolaevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: zuzvaleru@rambler.ru).

SHASH Nebras (Moscow) — Postgraduate, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: nebrasshash@mail.ru).