УДК 623.438: 539.3

Бусяк Ю.М., Ткачук Н.Н., Васильев А.Ю., Литвиненко А.В., Мазур И.В., Даньшин Ю.А., Шаталов О.Е.

ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИЩЕННОСТИ БРОНЕКОРПУСОВ ЛЕГКИХ ПО МАССЕ МАШИН

Введение. Как отмечалось в работах, для анализа процессов бронепробивания используется множество различных методов и подходов. Одна группа методов ориентирована на исследование самого процесса соударения ударника (снаряда) с защитной плитой или полупространством. При этом записывается полная система уравнений [1, 2]: уравнение состояния; модель для описания зависимости предела текучести от достигнутого уровня пластических деформации, скорости пластических деформаций, плотности материала и температуры; модель формирования разрушений в структуре материала; модель, учитывающая влияние разрушений на предел текучести и модуль сдвига.

Данная система уравнений в принципе аналогична системе уравнений для упруго-пластического деформирования [2], однако, поскольку скорости процессов в данном случае гораздо выше, а основным физическим процессом является нарушение сплошности материала, сама структура соотношений гораздо сложнее, причем добавляется новый вид нелинейности – структурная.

Математическая модель для анализа процессов бронепробития. При использовании Лагранжева подхода получаем систему уравнений, приведенную далее. В основе подхода лежат уравнения сохранения массы, количества движения и внутренней энергии, а также замыкающее эту систему определяющее соотношение. Рассмотрим особенности пространственно-временной дискретизации при решении перечисленных уравнений, следуя [3–5]:

- уравнение сохранения массы

$$\dot{\rho} + \rho \,\mathrm{div}\{v\} = 0 \tag{1),}$$

где ρ – плотность, а $\{v\}$ – вектор скорости точек среды;

- уравнение сохранения количества движения

$$\rho\{\ddot{x}\} = \mathrm{div}[\sigma], \tag{2}$$

где $\{\ddot{x}\}$ – ускорение, а $[\sigma]$ – тензор напряжений Коши;

- уравнение сохранения энергии

$$\rho\dot{u} = [\sigma]:[D] + \rho r - \nabla \cdot \{q\}, \tag{3}$$

где $\dot{u}$ – скорость изменения внутренней энергии, $[D]$ – тензор деформации скорости; r – интенсивность объемного теплового источника, $\{q\}$ – тепловой поток; ∇ – оператор Гамильтона, «·» – скалярное произведение, а «:» – двойное скалярное произведение.

Для решения задачи воспользуемся методами пространственной и временной дискретизации. В основе пространственной дискретизации лежит метод конечных элементов, в основе временной дискретизации – центральная дифференциальная схема интегрирования первого и второго порядка точности.

Пространственная дискретизация уравнения сохранения количества движения предполагает переход от решения дифференциального уравнения (2) к решению вариационной задачи с выбранными базисными функциями Ф:

$$\int_V \left(\rho\{\ddot{x}\} - \mathrm{div}[\sigma]\right)\cdot[\Phi]\,dv = 0, \tag{4}$$

с соответствующими граничными условиями в области V. С использованием известных процедур метода конечных элементов (МКЭ) решение уравнения (4) сводится к решению дифференциального уравнения

$$\left[M\right]\left\{\ddot{d}\right\}=\left\{F_i\right\}+\left\{F_e\right\}. \quad (5)$$

Здесь $\left\{\ddot{d}\right\}$ – вектор узловых ускорений, $\left[M\right]$ – матрица масс, а $\left\{F_i\right\}$, $\left\{F_e\right\}$ – векторы внутренних и внешних сил. Аналогично решение уравнения (3) сводится к решению дифференциального уравнения

$$\left[M^{\theta}\right]\left\{\dot{\theta}\right\}=\left\{F_i^{\theta}\right\}+\left\{F_e^{\theta}\right\}. \quad (6)$$

Здесь $\left\{\theta\right\}$ – температура, $\left[M^{\theta}\right]$ – матрица теплоемкостей, а $\left\{F_i^{\theta}\right\},\left\{F_e^{\theta}\right\}$ – векторы внутренних и внешних тепловых нагрузок.

Вектор внутренних сил

$$\left\{F_i\right\}=\int\limits_V\left[\sigma\right]:\left(\nabla\left[\Phi\right]\right)dv \quad (7)$$

получается в результате суммирования внутренних сил для всех элементов, входящих в рассматриваемую систему. Для одного элемента вектор внутренних сил определяется следующим выражением:

$$\left\{f_i^e\right\}=\int\limits_{V^e}\left\{B\right\}^T\left\{\overline{\sigma}\right\}dv. \quad (8)$$

Здесь $\left\{B\right\}$ – производная от функций формы конечного элемента; $\left\{\overline{\sigma}\right\}$ – вектор, составленный из шести компонентов тензора напряжений. Вектор внешних сил $\left\{F_e\right\}$, который входит в дифференциальное уравнение (5), учитывает распределенные по поверхности тела нагрузки; объемные силы, такие как силы тяжести, контактные силы, реакции связей и другие силы.

Узловые ускорения могут быть определены из уравнения (5) и записаны следующим образом:

$$\left\{\ddot{d}\right\}=\left[M\right]^{-1}\left(\left\{F_i\right\}+\left\{F_e\right\}\right). \quad (9)$$

Использование центральной дифференциальной схемы интегрирования по времени второго порядка точности позволяет определить значения ускорений, скоростей и перемещений. Скорость деформации определяется как

$$\Delta\left[\varepsilon\right]=\left[D\right]\Delta t, \quad (10)$$

где $\left[D\right]$ – тензор деформации скорости с компонентами

$$D_{ij}=\frac{1}{2}\left(\partial v_i/\partial x_j+\partial v_j/\partial x_i\right)+\left(\partial v_i/\partial x_j\cdot\partial v_j/\partial x_j\right).$$

Для дискретизации полученной системы соотношений применяются различные численные методы, в первую очередь, как отмечалось выше, – МКЭ. Получаемая сильно нелинейная задача для решения требует большой объем компьютерных ресурсов.

Также широкое применение находят различные эмпирические формулы для оценки интегральных характеристик бронепробиваемости: глубина внедрения как функция скорости встречи боеприпаса с преградой, предельная скорость для пробивания плиты как функция ее толщины и т. п. В [1, 2] отмечается, что из большого количества эмпирических формул, предназначенных для вычисления глубины внедрения боеприпаса в твердую преграду, наибольшее распространение получили формулы Забудского-Майевскою, Березанская, АНИОН и Жакоб-де-Марра [1, 6, 7]. Формула Забудского-Майевского имеет вид:

$$h=\frac{C}{2\lambda A'd\lg e}\lg\frac{1+dV_c^2}{1+dV^2}, \quad (11)$$

где $C=\frac{G}{d^2}10^{-3}$ – удельная нагрузка, $A'=\frac{\pi g A}{4}10^{-3}$, e = 2,71828; d – калибр снаряда; g – ускорение свободного падения.

Березанская формула имеет вид:

$$h = K_n \frac{G}{d^2} V_c \cos\psi_0 . \qquad (12)$$

Формула АНИОП (видоизмененная Березанская) –

$$h = A_1 K_n' \frac{G}{d^2} V_c \frac{\cos(n\psi_0)}{\sqrt{\cos\psi_0}} . \qquad (13)$$

Здесь A, b, K_n, K'_n – табулированные коэффициенты, учитывающие свойства среды преграды; λ, A_1, – коэффициенты, характеризующие форму головной части боеприпаса; G – масса боеприпаса; V_c, V – соответственно начальная и текущая скорости снаряда; ψ_0 – угол встречи боеприпаса с преградой; n – коэффициент, учитывающий изменение начального угла встречи боеприпаса с преградой (1,72< n <2,62).

Для оценки толщины пробиваемой броневой преграды па практике широко используется формула Жакоб-де-Марра, по которой можно определить скорость боеприпаса $V_c = \frac{d^{0,75} L_0^{0,7}}{G^{0,5}\cos\psi_0} K_{br}$, необходимую для пробивания брони заданной толщины. Здесь G_{br} – коэффициент бронепробиваемости (изменяется в пределах $1600 \le K_{b\varepsilon} \le 3000$ и устанавливается экспериментально); L_0 – толщина пробиваемой брони. Следует отметить, что приведенные выше формулы содержат большое количество коэффициентов, учитывающих особенности процесса взаимодействия снаряда с преградой, но не имеющих ясного физического смысла.

Модель Ламберта дает возможность определять остаточную скорость длинных стержней, взаимодействующих с однослойными мишенями, изготовленными из катаной гомогенной броневой стали, в зависимости от скорости соударения и характеристик системы "снаряд-преграда". В модели приняты следующие обозначения: M – масса снаряда (г), L – длина снаряда (см), D – калибр снаряда (см), T – толщина мишени (см), p – плотность материала мишени (г/см^3), Q – угол соударения (град), V_l – предельная баллистическая скорость (м/с), V_r – остаточная скорость снаряда (м/с), V_s – скорость соударения (м/с).

Основные уравнения, описывающие данную модель, имеют вид:

$$z = T \setminus D \sec^{0,75} Q, \quad f(z) = z + e^{-z} - 1 = \sum_{j=2}^{\infty} \frac{(-z)^j}{j!}, \quad M' = p\pi D^3 z / 4,$$

$$a = M / (M + M'/3), \quad p = 2 + z/3, \quad V_L = u(L/D)^{0,15} \sqrt{f(z)(D^3/M)};$$

$$V_r = \begin{cases} 0, 0 \le V_S \le V_L; \\ a(V_S^p - V_L^p)^{1/p}, Vs > V_L \end{cases},$$

где u = 4000 для мишеней, изготовленных из броневой (ρ = 7,85 г/см^3) стали, и u = 1750 – для преграды, изготовленной из алюминия (ρ = 2,74 г/см^3); p – параметр, зависящий от модели снаряда, толщины преграды T и функции z; a – параметр, зависящий от приближенной массы материала M' преграды к объему цилиндра, «вырезаемого» проекцией снаряди на нее до соударения.

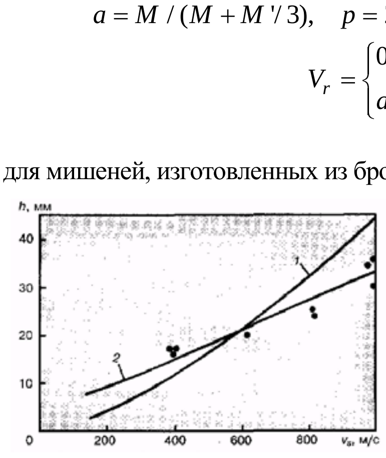

Рисунок 1 – Зависимость бронепробиваемости от скорости соударения (точки – экспериментальные данные): 1 – модель Жакоб-де-Марра; 2 - модель Ламберта

Приведенные выше модели оценки бронепробиваемости проверены на большом объеме экспериментальных данных по обстрелу преград из гомогенной брони средней и высокой твердости оперенными бронебойно-подкалиберными снарядами. Результаты оценки характеристик бронебойно-подкалиберного снаряда с использованием моделей Жакоб-де-Марра и Ламберта приведены на рис. 1. Как видно, модель Жакоб-де-Марра дает зачастую завышенные значения толщин бронепробивания, а Ламберта – заниженные. Однако, в данной работе речь идет именно о тенденциях изменения решений при варьировании проектно-технологических параметров. В этом смысле, стремясь улучшить показатели бронезащищенности, важно правильно отразить тенденции изменения решения. С учетом данного замечания справедливо утверждение, что для достижения результатов для этих задач можно использовать различные модели. Важно лишь, чтобы они аналогично отражали тенденции изменения решения. Та же аргументация относится и к случаю многослойных и разнесенных бронепреград.

В связи с этим предлагается в развитие подходов, предложенных в работах [1–7], привлечь в качестве базовой модели соотношения Жакоб-де-Марра, а на этой основе получить множество 3D диаграмм бронестойкости $S(p)$. Элементы этого множества диаграмм относятся к поверхностям S в пространстве, соответствующим зонам поражения теми или иными снарядами при заданных параметрах p. Принимая во внимание, что при варьировании Δp поверхность $S(p)$ трансформируется в поверхность $S(p+\Delta p)$, важно получить оценку изменения поверхности, а затем путем варьирования частью проектно-технологических параметров P_{var} минимизировать снижение характеристик бронезащиты:

$$V^{-}\big(S(p), S(p+\Delta p)\big) \to \min, \tag{14}$$

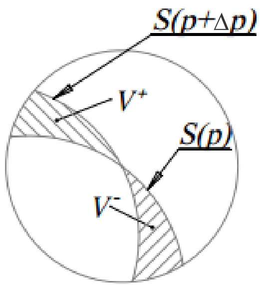

Рисунок 2 – Сечения диаграмм бронестойкости плоскостью объемов V^{-}, V^{+}

где V^{-} – объем пространства внутри поверхности $S(p)$, ограниченный поверхностью $S(p+\Delta p)$.

Можно поставить также обратную задачу

$$V^{+}\big(S(p), S(p+\Delta p)\big) \to \max, \tag{15}$$

где V^{+} – объем пространства вне поверхности $S(p)$, но внутри $S(p+\Delta p)$.

На рис. 2 представлено некоторое произвольное сечение 3D диаграммы. Естественное условие непрерывности

$$\lim_{\Delta p \to 0} \left| V^{+}(p, \Delta p) - V^{-}(p, \Delta p) \right| = 0 \tag{16}$$

дает предпосылки ставить и задачи (15), (16), и любые их комбинации $P^{*}_{\text{var}} : \left(\gamma^{+} V^{+} - \gamma^{-} V^{-}\right) \to \max$, где γ^{+}, γ^{-} – некоторые неотрицательные весовые коэффициенты $\left(\gamma^{+} + \gamma^{-}\right) = 1$.

Поскольку для бронекорпуса 3D диаграмма бронестойкости представляет собой объединение лепестков от всех бронепанелей, то при варьировании какого-либо из параметров P_{var} относительно номинального значения получается некоторый набор поверхностей S, соответствующий множеству наборов P_{var}. Этот набор можно назвать полидиаграммами $S(P_{\text{var}})$.

Если имеется некоторый допустимый разброс параметров P_{var}, вызванный особенностями технологических процессов изготовления (например, глубина обезуглероживания или обезлегирования и т.п.), то задача может ставиться в непревышении уменьшений характеристик бронезащищенности от номинальных при варьировании P_{var} в допустимом диапазоне $\left(\gamma_1 W^{+} - \gamma_2 W^{-}\right) \le \Delta, \Delta p \le \varepsilon$. Здесь W^{+}, W^{-} – объединение всех $V^{+}(P), V^{-}(P)$, Δ; ε – заданные величины отклонений.

Таким образом, независимо от типа моделей, используемых для оценки бронезащищенности, сформулирована задача проектно-технологического обеспечения заданного ее уровня. В то же время для оценочных расчетов зачастую необходимо проводить качественный анализ контактного взаимодействия снаряда как сложнопрофильного тела с бронепреградой при наличии модификации поверхностного слоя либо снаряда, либо бронепанели, либо и первого и второго. Речь идет о слоях, покрывающих сердечник, либо о слоях материала (стали), подвергнутым химико-термической обработке и, как следствие, – обезуглероживанию, обезлегированию, разупрочнению. Если при этом физико-механические свойства материалов отличаются незначительно, то взаимодействующие тела можно моделировать упругими телами.

Гранично-элементная формулировка задачи контактного взаимодействия. В первом приближении начальный этап встречи и контактного взаимодействия снаряда с бронепанелью можно представить в виде контакта двух полупространств. В работе [8] для анализа распределения контактных давлений в сопряжении сложнопрофильных тел, свойства податливости которых в нормальном направлении к поверхности контакта можно аппроксимировать свойствами полупространств, предложено использовать метод граничных интегральных уравнений (МГИУ). Там же представлены основные соотношения, полученные при дискретизации уравнений и неравенств МГИУ с привлечением подхода метода граничных элементов.

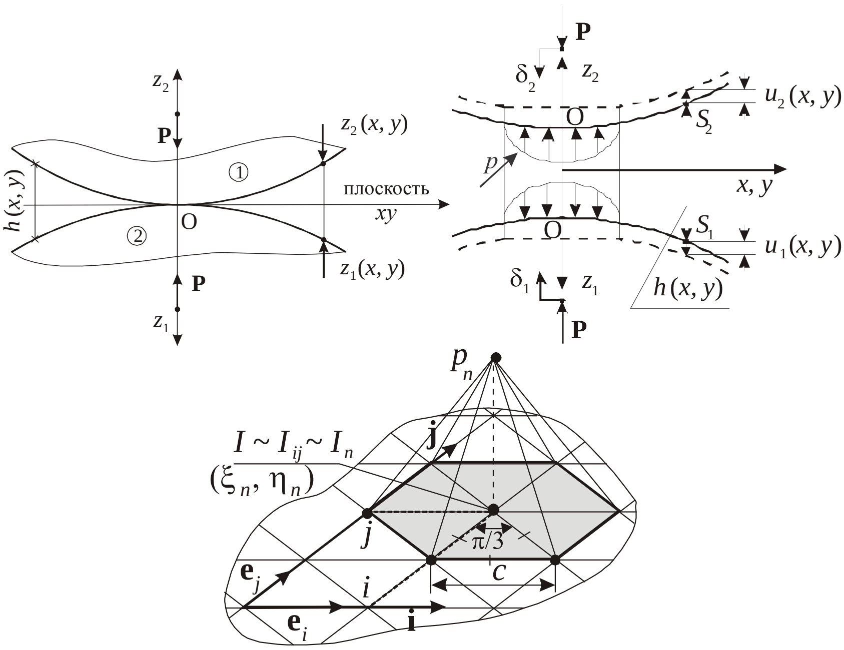

Рисунок 3 – Начальное расположение контактирующих (соприкасающихся при усилии P = 0) тел, актуальное их состояние (разнесенный вид поверхностей S_1, S_2) и вид базисных функций для аппроксимации контактного давления

Следуя работе [8], для контактирующих тел (рис. 3) можно записать для случая статического, упругого контакта следующую систему соотношений:

$$\begin{cases} u_{z_1}(x,y)+u_{z2}(x,y)+h(x,y)=\delta_1+\delta_2, S_1(x,y) \text{ и } S_2(x,y) - \text{в контакте;} \\ u_{z_1}(x,y)+u_{z2}(x,y)+h(x,y)>\delta_1+\delta_2, S_1(x,y) \text{ и } S_2(x,y) - \text{вне зоны контакта.} \end{cases} \tag{17}$$

Далее, используя известное интегральное соотношение, связывающее давления p_i и перемещения u_i, а также учитывая очевидное равенство $p_1(\xi,\eta)=p_2(\xi,\eta)$, из (17) получаем:

$$u=u_{z_1}(x,y)+u_{z_2}(x,y)=\left(\frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2}\right)\iint_S \frac{p(\xi,\eta)}{\rho}d\xi\,d\eta = \\ =\frac{1}{\pi E^*}\iint_S \frac{p(\xi,\eta)}{\rho}d\xi\,d\eta. \tag{18}$$

Здесь ν_i, E_i, $i=1,2$ – коэффициенты Пуассона и модули упругости материала каждого из контактирующих тел, $\rho=\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}$. Контактная площадка S и распределение давлений $p(\xi,\eta)$, присутствующие в правой части равенства, как указывается в [8], являются неизвестными и искомыми.

В работе [8] для дискретизации искомого контактного давления p использовано кусочно-линейное представление его распределения, которому отвечают непрерывные и гладкие поверхностные смещения, характерные для контакта сложнопрофильных тел. Искомая функция контактных давлений приближается суперпозицией массива пирамидальных элементарных распределений, вершины которых расположены в узлах регулярной сетки с шагом c, состоящей из равносторонних треугольников, и при этом полностью определяется дискретным набором узловых значений давлений p_n (см. рис. 3).

Подставляя данное представление p_n в соотношения (18) и удовлетворяя системе (17) в узловых точках построенной сетки граничных элементов, получим:

$$\begin{cases} \sum\limits_m C_{nm}\, p_m + h_n - \delta = 0, \text{узел } J_n - \text{в контакте;} \\ \sum\limits_m C_{nm}\, p_m + h_n - \delta > 0, \text{узел } J_n - \text{вне зоны контакта.} \end{cases} \tag{19}$$

Здесь $\delta = \delta_1 + \delta_2$ – суммарное сближение; $h_n = h(x_n, y_n)$ – узловые значения первоначального зазора, C_{mn} – коэффициенты влияния, определяющие перемещение в узле m сетки при действии локального линейно распределенного давления со значением = 1 в узле n и $p_\psi = 0$, где ψ – номера множества узлов, сопредельных узлу m (см. рис. 3).

Справедливы условия неотрицательности давлений внутри области контакта и обнуление таковых вне этой области:

$$p_m \geq 0,\ m = 1,\ldots,N \text{, узел } J_m \text{ – в контакте; } p_m = 0 \text{, } J_m \text{ – вне зоны контакта.} \tag{20}$$

Кроме того, справедливо интегральное равенство силы P прижатия совокупному воздействию единичных распределений контактных давлений:

$$\sum_m \sqrt{3}c^2 p_m / 2 = P\,. \tag{21}$$

Система представленных соотношений составляет основу для отыскания гранично-элементной аппроксимации искомого давления p и области контактирования S гладких упругих тел. Единственным ограничением здесь является близость направлений нормалей (с плавным их поворотом при обходе поверхности) контактирующих поверхностей S_1 ,S_2 тел 1 и 2, а также значительное превышение размерами последних характерных размеров площадки S.

В работе [8] предложено также расширение соотношений (19)–(21) на случай упругого тела с промежуточным слоем, моделирующим ту или иную модификацю поверхности контактирующих тел (рис. 4).

При этом между перемещениями точек u_z^Σ поверхности S', участвующих в описании условий контактного взаимодействия, перемещениями гладкого тела u'_z и упругого слоя $u_z^\wedge$, существует зависимость $u_z^\Sigma = u'_z + u_z^\wedge$. В качестве модели этого слоя использовано основание Винклера [9, 10]: $u_z^\wedge = \lambda p$, где λ – податливость слоя (или слоев), зависящая от свойств материала поверхностного слоя исследуемого тела. В результате такого представления все соотношения сохраняют свою структуру, однако в качестве коэффициентов матрицы влияния выступят величины $C_{nm}^\Sigma = C_{nm} + \lambda\delta_{nm}$. Другими словами, вместо матрицы влияния C появляется матрица $C^\Sigma = C + \lambda E$, где E – единичная матрица.

Таким образом, в работе [8] на единой основе предложены подходы, модели и разрешающие соотношения для анализа распределения контактных давлений в сопряжении сложнопрофильных гладких и шероховатых тел.

Преимуществами данной методологии перед известными аналитическими и численными методами [11–15], в частности, перед МКЭ и моделью Герца, является широкий спектр решаемых задач и высокая оперативность расчетов при сохранении приемлемой точности результатов. По сравнению же с пакетом CONTACT [16] предложенный подход имеет то преимущество, что предоставляет возможность естественным образом перейти к физически нелинейным моделям упругого слоя, имитирующего модификацию поверхностного слоя взаимодействующих тел системы "снаряд – бронепанель".

Имея в распоряжении предложенный в статье [8] инструмент расчетного моделирования, можно ставить и решать различные прикладные задачи для реальных систем «ударник-преграда». В то же время представляет первичный интерес анализ влияния отдельных факторов на характер распределения контактных давлений и размеры контактных площадок. Поскольку созданный и описанный ранее [8] инструмент анализа оперирует с численными моделями, то для установления указанных влияний требуется проведение серии численных расчетов.

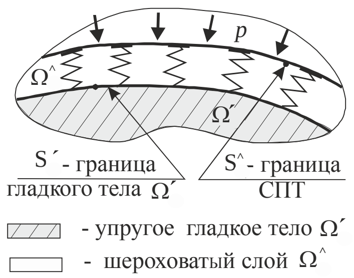

Рисунок 4 – Модель шероховатого сложнопрофильного упругого тела с линейным упругим

Постановка тестовой задачи. С использованием предложенной ранее [8] математической модели в среде MatLab [17] был создан программный модуль «SBEM», реализующий итерационную процедуру поиска контактных площадок и контактного давления p на треугольной сетке, расположенной на плоскости, касательной к поверхностям контактирующих тел 1 и 2 в начальный момент их соприкосновения (см. рис. 3). При этом варьируемыми входными данными являются: усилие P; свойства материалов E_i, υ_i; форма поверхностей (z_1, z_2), диктующая в итоге распределение зазора h; податливость винклерова основания λ.

В данной работе ставится задача определения влияния вида распределения зазора h и податливости винклерова основания λ на контактные площадки S и давления p. В частности, распределение зазора представляется в частном виде: $h = U\cdot\left[(x^2+y^2)^{K/2}\right]/a^K$, где a – радиус задаваемой фиксированной площадки, заведомо покрывающей S при заданных P, E, υ; U – размер подъема поверхности $h(x,y)$ в координатных сечениях x и y соответственно; K – показатель степени ($K > 1$), определяющий крутизну (плавность) сечений распределений $h(x,y)$ координатными плоскостями.

Данное выражение соответствует осесимметричному распределению зазора между контактирующими телами, т.е. зависящему от расстояния до центральной точки $r = \sqrt{x^2+y^2}$ (рассматривается прямой угол встречи снаряда с бронепреградой). Величина r определяет радиус-вектор точки в плоскости, касательной к соприкасающимся (при $P = 0$) телам.

Численная модель. Решение поставленной частной задачи осуществлялось при следующих параметрах: $E_{1,2} = 2.1\cdot10^{11}$ Па, $\upsilon_{1,2} = 0.3$, $P = 10^3$ Н, с = 2 м, $a = 2$ м. Для случая $K = 2$ (параболоид вращения), полученные распределения p и значение S отличаются, как показало решение тестовых задач, от полученных по модели Герца незначительно. Таким образом, получена исходная оценка погрешности численного моделирования. Далее эта модель была использована для последующих многовариантных расчетов. Учитывая большое количество получаемых данных, проиллюстрированы только некоторые результаты исследований.

Результаты решения осесимметричной задачи. Исследуется контакт двух тел вращения, зазор между которыми представляет собой степенную функцию радиус-вектора r с показателем степени K. Моделирование влияния упругих свойств слоя, имитирующего шероховатость, осуществлено путем варьирования параметра λ от нулевого до значения, намного превышающего глобальную податливость системы тел. Полученные характерные распределения контактных давлений представлены на рис. 5, 6.

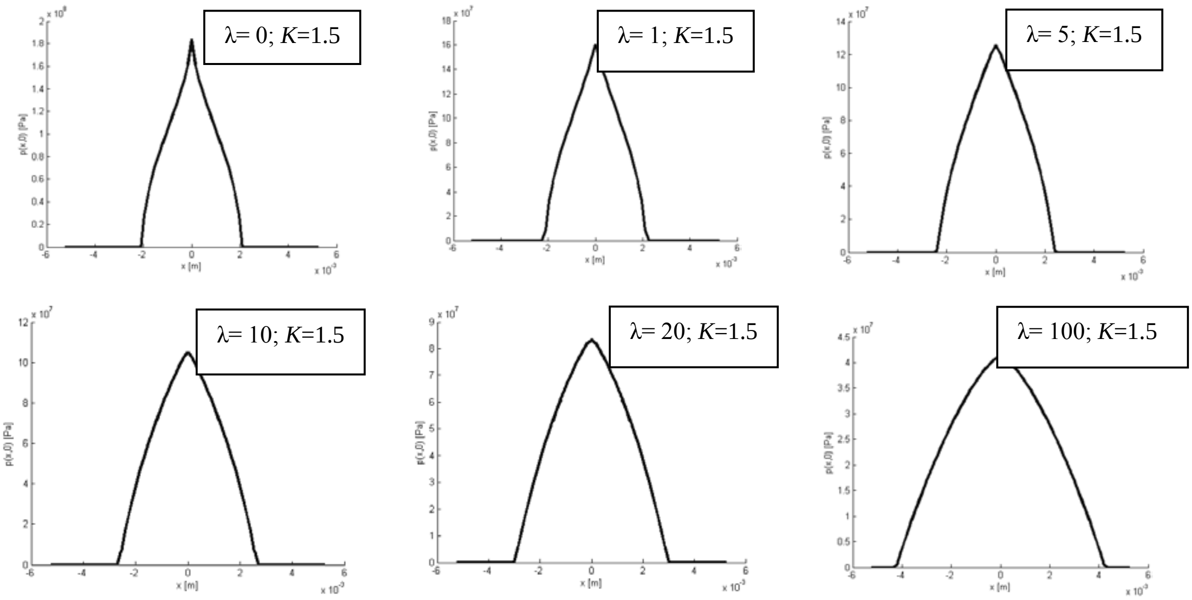

Рисунок 5 – Влияние податливости упругого слоя на распределение контактных давлений в сопряжении "индентор–преграда"

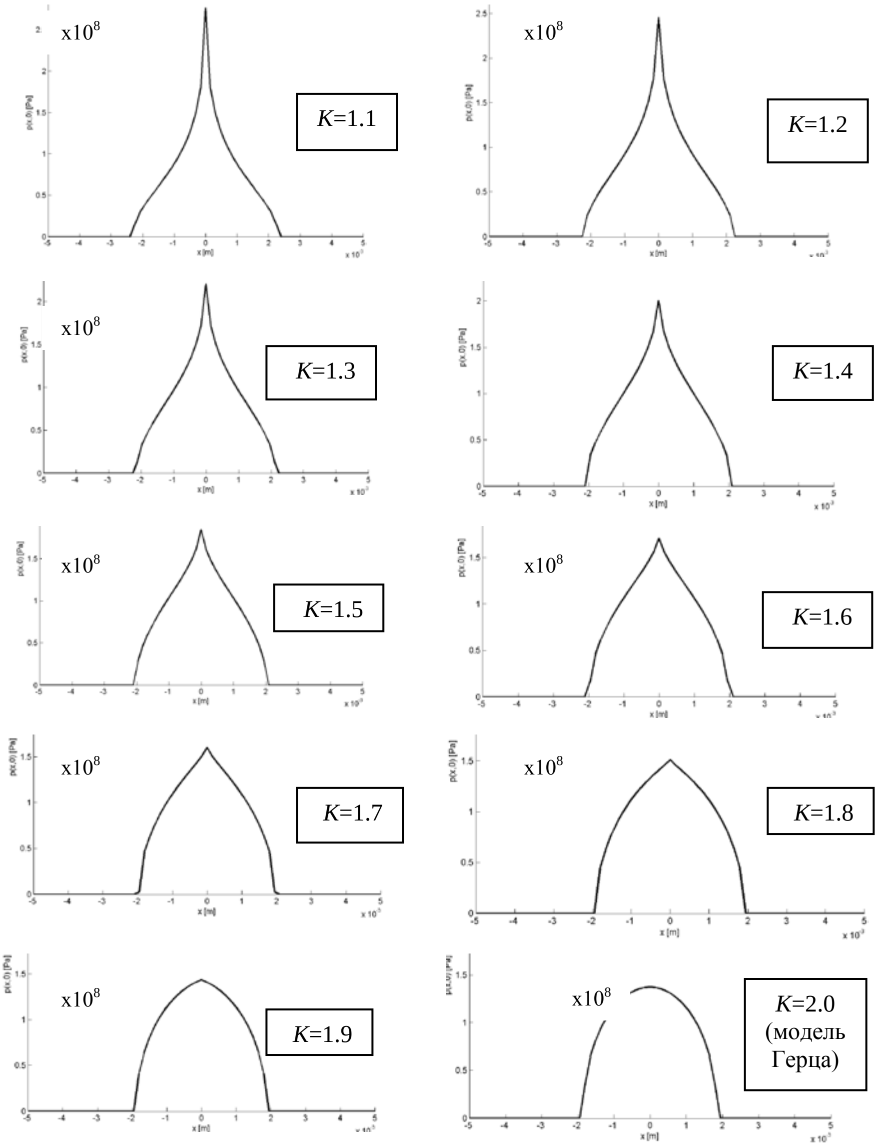

Рисунок 6 – Влияние формы головной части снаряда (степени *K)* на распределение контактных давлений

Анализ полученных картин распределений контактных давлений показывает, в каком направлении и в какой степени форма головной части снаряда (индентора) и свойства промежуточного слоя влияют на контактные давления. Видно, что чем меньше степень *K (*т.е. чем острее головная часть), тем выше максимальные контактные давления. С другой стороны, чем податливее промежуточный упругий слой, тем меньшим является максимальное контактное давление, а площадь контакта – большей.

Для более адекватного моделирования взаимодействия индентора (снаряда) с преградой (бронепанелью) требуется применение полной динамической постановки задачи с разрушением, что возможно в последующих исследованиях с привлечением метода конечных элементов.

Заключение. В работе нашла отражение общая постановка задачи о проектно-технологическом обеспечении бронезащищенности корпусов легкобронированных машин от действия кинетических боеприпасов. Представлены аналитические модели оценки условий бронепробития, а также гранично-элементная формулировка задач анализа этого процесса. Также поставлена в общем виде задача обоснования проектно-технологических параметров бронекорпусов по критерию обеспечения защищенности от действия кинетических боеприпасов.

В дальнейших исследованиях планируется использовать предложенные подходы, постановки и модели в процессе проектирования и технологической подготовки производства бронекорпусов перспективных легкобронированных машин.

Литература

1. Чепков И.Б. Модель процесса проникновения составного удлиненного поражающего элемента в экранированную преграду/ И.Б. Чепков, С.А. Лавриков // Проблемы прочности. – 2003. – №2. – С. 46–55.
2. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
3. Муйземнек А.Ю. Математическое моделирование процесса удара и взрыва в программе LS-DYNA: Учеб.пос. / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач – Пенза: Информационно издательский центр ПГУ, 2005.– 106 с.
4. Васильев А.Ю. Исследование процесса обтекания корпусов легкобронированных машин ударной волной / А.Ю. Васильев // Механіка та машинобудування. – 2009. – №1. – С. 96–107.
5. Васильев А.Ю. К вопросу о деформировании корпусов транспортных средств при действии ударных нагрузок / А. Ю. Васильев // Вестник НТУ “ХПИ”. Тем. вып.: Динамика и прочность машин. – 2005. – №47. – С. 42–50.
6. Дорофеев А.Н., Морозов А.П., Саркисян Р.С. Авиационные боеприпасы. – М.: Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1978. – 446 с.
7. Ионов В.Н. Прочность боеприпаса при взаимодействии с преградой. – М.: Машиностроение, 1979. – 423 с.
8. Ткачук Н.Н., Мовшович И.Я., Ткачук Н.А., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 1. Постановка задачи. 2. Кинематическая модель контакта гладких тел // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением – 2014. – № 3. – С. 3–10.
9. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986.– 336 с.
10. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 228 с.
11. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
12. Hertz H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // J. Reine Angew. Math.. – 1881. – Vol. 92. – S. 156–171.
13. Simo J.C. A perturbed Lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems // J.C. Simo, P. Wriggers, R.L. Taylor //Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1985. – Vol. 50. – P. 163–180.
14. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, 1980. – 303 с.
15. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
16. www.kalkersoftware.org.
17. www. mathworks.com.

Bibliography (transliterated)

1. Chepkov I.B. Model protsessa proniknoveniya sostavnogo udlinennogo porazhayuschego elementa v ekranirovannuyu pregradu. I.B. Chepkov, S.A. Lavrikov. Problemyi prochnosti. – 2003. – #2. – P. 46–55.
2. Vasidzu K. Variatsionnyie metodyi v teorii uprugosti i plastichnosti: Per. s angl. – M.: Mir, 1987. – 542 p.
3. Muyzemnek A.Yu. Matematicheskoe modelirovanie protsessa udara i vzryiva v programme LS-DYNA: Ucheb.pos. A.Yu. Muyzemnek, A.A. Bogach – Penza: Informatsionno izdatelskiy tsentr PGU, 2005.– 106 p.
4. Vasilev A.Yu. Issledovanie protsessa obtekaniya korpusov legkobronirovannyih mashin udarnoy volnoy. A.Yu. Vasilev. Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2009. – #1. – P. 96–107.
5. Vasilev A.Yu. K voprosu o deformirovanii korpusov transportnyih sredstv pri deystvii udarnyih nagruzok. A. Yu. Vasilev. Vestnik NTU “HPI”. Tem. vyip.: Dinamika i prochnost mashin. – 2005. – #47. – P. 42–50.
6. Dorofeev A.N., Morozov A.P., Sarkisyan R.S. Aviatsionnyie boepripasyi. – M.: Izd-vo VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1978. – 446 p.

7. Ionov V.N. Prochnost boepripasa pri vzaimodeystvii s pregradoy. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 423 p.
8. Tkachuk N.N., Movshovich I.Ya., Tkachuk N.A., Skripchenko N.B., Litvinenko A.V. Analiz kontaktnogo vzaimodeystviya gladkih i sherohovatyih tel metodom granichnyih elementov: modeli i razreshayuschie sootnosheniya. 1. Postanovka zadachi. 2. Kinematicheskaya model kontakta gladkih tel. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem – 2014. – # 3. – P. 3–10.
9. Reshetov D.N., Portman V.T. Tochnost metallorezhuschih stankov. – M.: Mashinostroenie, 1986.– 336 p.
10. Demkin N.B. Kontaktirovanie sherohovatyih poverhnostey. – M.: Nauka, 1970. – 228 p.
11. Dzhonson K. Mehanika kontaktnogo vzaimodeystviya. – M.: Mir, 1989. – 510 p.
12. Hertz H. Über die Berührung fester elastischer Körper. H. Hertz. J. Reine Angew. Math.. – 1881. – Vol. 92. – P. 156–171.
13. Simo J.C. A perturbed Lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems. J.C. Simo, P. Wriggers, R.L. Taylor. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1985. – Vol. 50. – P. 163–180.
14. Galin L.A. Kontaktnyie zadachi teorii uprugosti i vyazkouprugosti. – M.: Nauka, 1980. – 303 p.
15. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. Analiticheskie metodyi v kontaktnyih zadachah teorii uprugosti. – M.: Fizmatlit, 2004. – 304 p.
16. www.kalkersoftware.org.
17. www. mathworks.com.

УДК 623.438: 539.3

Бусяк Ю.М., Ткачук М.М., Васильєв А.Ю., Литвиненко О.В., Мазур І.В., Даньшин Ю.О., Шаталов О.Є.

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИЩЕНОСТІ БРОНЕКОРПУСІВ ЛЕГКИХ ЗА МАСОЮ МАШИН

Стаття містить загальну постановку задачі забезпечення бронезахищеності корпусів легкоброньованих машин. Описані загальні підходи до її розв'язання. Крім того, сформульована задача проектно-технологічного забезпечення бронестійкості.

Busyak Y.M., Tkachuk M.M., Vasiliev A.Y., Litvinenko A.V., Mazur I.V.,
Danshin Y.A., Shatalov O.Y.

GENERAL APPROACHES FOR ESTIMATING AND ENSURING THE PROTECTABILITY OF LIGHT-WEIGHT VEHICLES HULLS

This paper contains a general statement of problem to ensure armoring protectability for lightly armored vehicles hulls. The general approaches are described to its solution. In addition, the problem of design and technological support for armoring durability is formulated.