

¹ Ю. М. Бусяк, д-р техн. наук² А. В. Ткачук, канд. техн. наук³ Н. А. Дёмина, канд техн. наук² Н. Б. Скрипченко¹ И. В. Мазур¹ ГП «ХКБМ им. А. А. Морозова», г. Харьков² Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
e-mail: tma@tmm-sapr.org³ Таврический государственный агротехнологический университет, г. Мелитополь,
e-mail: deminanatasha@yandex.ru**Ключові слова:** контактна взаємодія, метод граничних елементів, індентор, бронеперешкода

УДК 539.3

**ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЗАЩИЩЕННОСТИ
КОРПУСОВ
ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ
МАШИН: ПОСТАНОВКИ И
ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ**

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.

Введение

Как отмечается во многих 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 деформаций, скорости пластических деформаций, плотности материала и температуры; модель формирования разрушений в структуре материала. 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. Таким образом, получаемая система уравнений становится достаточно сложной и громоздкой. При этом напрямую применить ее для проведения многовариантных исследований в ходе обоснования проектных параметров бронекорпусов легкобронированных машин нецелесообразно. Кроме того, возникает также ряд частных задач, которые не требуют моделирования процесса бронепробивания во всей полноте, а только проведения анализа качественного влияния того или иного параметра на характер распределения конкретной величины в пространстве или времени.

В связи с этим возникает актуальная проблема создания новых подходов к исследованию бронестойкости корпусов военных гусеничных и колесных машин и к обеспечению на этой основе повышения защищенности от действия кинетических боеприпасов. Это составляет цель данной работы.

Математическая модель для анализа процессов бронепробития

Процесс взаимодействия индентора (кинетического боеприпаса) с бронепреградой является высокоскоростным нелинейным физико-механическим процессом, сопровождающимся частичным или сквозным разрушением бронепанели. Следуя работам [3–5], можно записать формально достаточно полную математическую модель взаимодействия ударника с преградой. Она содержит уравнения сохранения массы, количества движения, энергии, а также критерии разрушения материалов взаимодействующих тел. На этой основе в работах [3–6] при помощи метода конечных элементов (МКЭ) ставится и решается комплекс задач численного исследования процесса проникновения снаряда в преграду. В то же время этот способ решения задачи достаточно ресурсозатратен (с точки зрения вычислительных ресурсов).

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



Рис. 1. 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

внедрения боеприпаса в твердую преграду. Альтернативной постановкой данной задачи является использование эмпирических формул, среди которых наибольшее распространение получили формулы Забудского–Майевского, Березанская, АНИОН и Жакоб-де-Марра, модель Ламберта [1, 7, 8]. Данные модели оценки бронепробиваемости проверены на большом объеме экспериментальных данных по обстрелу преграды из гомогенной брони средней и высокой твердости оперенными бронебойно-подкалиберными снарядами.

Таким образом, использование упрощенных эмпирических моделей и соотношений дает возможность ставить задачи многовариантного анализа результата процесса встречи снаряда с преградой при варьировании типа снаряда, свойств материала его оболочки и сердечника, а также свойств материала бронепреграды, углов и скоростей встречи снаряда с преградой и т.п. Соответственно, путем обратного расчета траекторией полета можно вычислить ту область пространства, из которой поражается та или иная бронепанель тем или иным снарядом. Данный подход, предложенный, в частности, в работе [6], дает возможность ставить и обратную задачу: увеличение зоны бронестойкости на основе критерия непробития бронекорпуса как совокупности множества панелей, соединенных в единое целое.

В то же время отмеченные выше постановки представляют в некоторой степени крайности с точки зрения «адекватность (точность) – оперативность». В силу этого и первая, и вторая постановки имеют существенные недостатки при практическом применении, когда требуются высокоэффективные и оперативные решения задач обоснования проектно-технологических решений бронекорпусов. Естественно, что при этом компромиссные варианты не могут быть построены на механическом соединении этих двух постановок. Требуются новые постановки.

В частности, для некоторых типов задач требуется проведение качественного анализа изменения распределения контактного давления в сопряжении «ударник – преграда» в зависимости от формы головной части снаряда и свойств материала его поверхностного слоя (оболочки). Следуя работе [6], можно принять, что если при этом физико-механические свойства материалов отличаются незначительно, то взаимодействующие тела можно моделировать упругими телами на начальных этапах взаимодействия.

Как отмечается в работе [6], в первом приближении начальный этап встречи и контактного взаимодействия снаряда с бронепанелью можно представить в виде контакта двух полупространств. В работе [9] 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.

Следуя работе [9], для контактирующих тел (рис. 1) можно записать для случая статического контакта следующую систему соотношений:

$$\begin{cases} u_{z_1}(x, y) + u_{z_2}(x, y) + h(x, y) = \delta_1 + \delta_2, S_1(x, y) \text{ и } S_2(x, y) - \text{в контакте;} \\ u_{z_1}(x, y) + u_{z_2}(x, y) + h(x, y) > \delta_1 + \delta_2, S_1(x, y) \text{ и } S_2(x, y) - \text{вне зоны контакта.} \end{cases} \quad (1)$$

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 (1) получаем

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

Здесь $\nu_i, E_i, i = 1, 2$ – 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 [9], являются неизвестными и искомыми.

В работе [9] 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. 1). Следуя [6, 9] и подставляя данное представление p_n в соотношения (2) и удовлетворяя системе (1) в узловых точках построенной сетки граничных элементов, получим

$$\begin{cases} \sum_m C_{nm} p_m + h_n - \delta = 0, & \text{узел } J_n - \text{в контакте;} \\ \sum_m C_{nm} p_m + h_n - \delta > 0, & \text{узел } J_n - \text{вне зоны контакта.} \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\delta = \delta_1 + \delta_2$ – суммарное сближение; $h_n = h(x_n, y_n)$ – узловое значение первоначального зазора, C_{nm} – 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. 1).

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

$$p_m \geq 0, m = 1, \dots, N, \text{ узел } J_m - \text{в контакте, } p_m = 0, J_m - \text{вне зоны контакта.} \quad (4)$$

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

$$\sum_m \sqrt{3} c^2 p_m / 2 = P. \quad (5)$$



Рис. 2. Модель шероховатого сложнопрофильного упругого тела с линейным упругим слоем

Система представленных соотношений составляет основу для отыскания гранично-элементарной 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 [9] предложено также расширение соотношений (3)–(5) на случай упругого сложнопрофильного тела (СПТ) с промежуточным слоем, моделирующим ту или иную модификацию поверхности контактирующих тел (рис. 2).

При этом между перемещениями точек u_z^Σ поверхности S' , участвующих в описании условий контактного взаимодей-

вия, 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 [10, 11] $u_z^\wedge = \lambda^\wedge p$, где λ^\wedge – 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 выступают величины $C_{nm}^\Sigma = C_{nm} + \lambda \delta_{nm}$. Другими словами, вместо матрицы влияния C появляется матрица $C_{nm}^\Sigma = C_{nm}(1 + \lambda \delta_{nm})$.

Таким образом, в работе [9] на единой основе предложены подходы, модели и разрешающие соотношения для анализа распределения контактных давлений в сопряжении сложнопрофильных гладких и тел с поверхностным упругим слоем (прокладки, оболочки, наплавки, напыления и т. п.).

Преимуществами данной методологии перед известными аналитическими и численными методами [12–16], в частности, МКЭ и моделью Герца, является широкий спектр решаемых задач и высокая оперативность расчетов при сохранении приемлемой точности результатов. По сравнению же с пакетом CONTACT [17] 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 [9] 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 [9] инструмент анализа оперирует с численными моделями, то для установления указанных влияний требуется проведение серии численных расчетов.

Постановка тестовой задачи

С использованием предложенной ранее [9] математической модели в среде MatLab [18] 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. 1). При этом варьируемыми входными данными являются: усилие P ; свойства материалов E_i , ν_i ; форма поверхностей (z_1, z_2) , диктующая в итоге распределение зазора h ; податливость винклера основания λ .

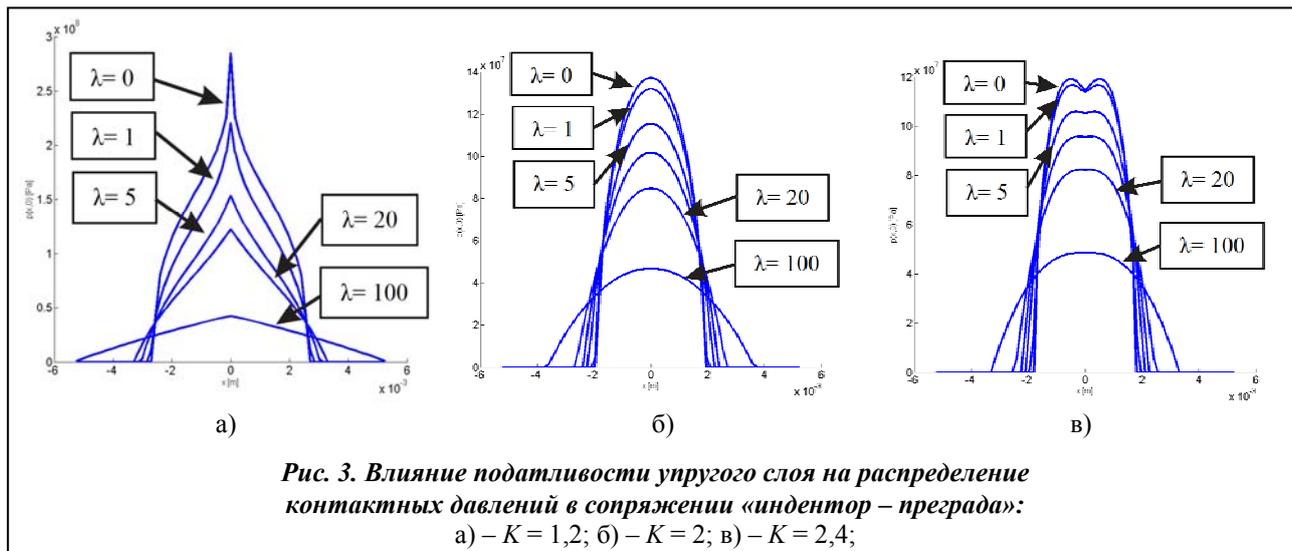
В данной работе ставится задача анализа влияния вида распределения зазора h и податливости винклера основания λ на контактные площадки S и давления p . Так, распределение зазора представляется в частном виде $h = U \cdot [(x^2 + y^2)^{K/2}] / a^K$, где a – радиус задаваемой фиксированной площадки, заведомо покрывающей S при заданных P , E , ν ; 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.

Результаты решения тестовой 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. 3, 4.

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



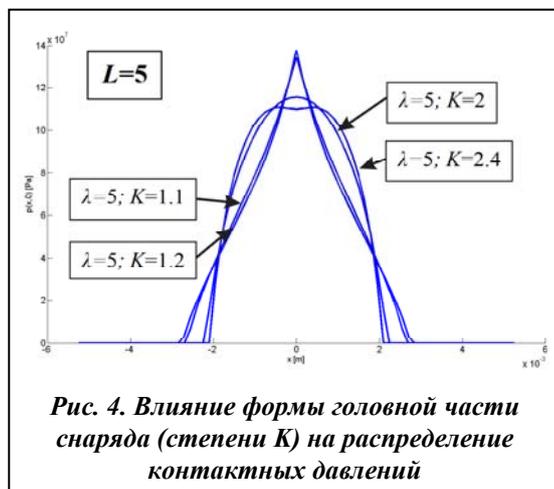
упругий слой, тем меньшим является максимальное контактное давление, а площадь контакта – большей. Еще одной характерной особенностью распределения контактных давлений при $K > 2$ является наличие локального минимума в средней части зоны контакта. Этот минимум более ярко выражен при малых λ и менее – при больших.

Естественно, что 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 найдла отражение новая частная постановка задачи о проектно-технологическом обеспечении бронезащищенности корпусов легкобронированных машин от действия кинетических боеприпасов. Она базируется на гранично-элементной постановке контактной задачи о взаимодействии индентора с преградой. Установлены некоторые качественные особенности распределения контактных давлений при варьировании формы головной части кинетического снаряда и податливости его оболочки.

В дальнейшем планируется развить данную постановку задачи, определить границы ее применимости, а также соединить ее в едином цикле проектных исследований с конечноэлементным моделированием, а также с применением эмпирических соотношений. В итоге будет получен инструмент обеспечения бронезащищенности на основе многоэтапного исследования реакции бронекорпусов на действие кинетических боеприпасов. При этом на различных этапах будут использоваться модели, отличающиеся по степени адекватности (точности) и оперативности, в то же время связанные между собой в едином цикле исследований.



Литература

1. Чепков, И. Б. Модель процесса проникновения составного удлиненного поражающего элемента в экранированную преграду / И. Б. Чепков, С. А. Лавриков // Пробл. прочности. – 2003. – № 2. – С. 46–55.
2. Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: Пер. с англ. / К. Васидзу. – М.: Мир. – 1987. – 542 с.
3. Муйземнек, А. Ю. Математическое моделирование процесса удара и взрыва в программе LS-DYNA: Учеб. пособие / А. Ю. Муйземнек, А. А. Богач // – Пенза: Информ.-издат. центр Пензен. ун-та. – 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 // Вестн. НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Динамика и прочность машин. – 2005. – № 47. – С. 42–50.
6. *Общие* подходы к оценке и обеспечению защищенности бронекорпусов легких по массе машин / Ю. М. Бусьяк, Н. Н. Ткачук, А. Ю. Васильев и др. // Вестн. НТУ «ХПИ». Тем. вып. Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 154–163.
7. *Дорофеев, А. Н.* Авиационные боеприпасы / А. Н. Дорофеев, А. П. Морозов, Р. С. Саркисян. – М.: Воен.-воздуш. инж. акад. им. Н. Е. Жуковского, 1978. – 446 с.
8. *Ионов, В. Н.* Прочность боеприпаса при взаимодействии с преградой / В. Н. Ионов. – М.: Машиностроение, 1979. – 423 с.
9. *Анализ* контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 1. Постановка задачи. 2. Кинематическая модель контакта гладких тел / Н. Н. Ткачук, И. Я. Мовшович, Н. А. Ткачук и др. // Кузнеч.-штампов. пр-во. Обработка материалов давлением – 2014. – № 3. – С. 3–10.
10. *Решетов, Д. Н.* Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
11. *Демкин, Н. Б.* Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 228 с.
12. *Джонсон, К.* Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
13. *Hertz, H.* Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // J. Reine Angew. Math. – 1881. – Vol. 92. – S. 156–171.
14. *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 Appl. Mech. and Eng. – 1985. – Vol. 50. – P. 163–180.
15. *Галин, Л. А.* Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л. А. Галин. – М.: Наука, 1980. – 303 с.
16. *Александров, В. М.* Аналитические методы в контактных задачах теории упругости / В. М. Александров, М. И. Чебаков // – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
17. www.kalkersoftware.org.

Поступила в редакцию 21.01.15

¹ **И. В. Лазарев**

² **В. Г. Шевченко**, канд. техн. наук

¹ Публичное акционерное общество «Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт трансформаторостроения», г. Запорожье, e-mail: oemi@vit.zp.ua

² Запорожский национальный технический университет, e-mail: kafedra_mex@zntu.edu.ua

Ключові слова: *електропружність, полого сферична оболонка, нестационарні коливання, інтегральне перетворення Лапласа.*

Введение

Электродинамическая стойкость трансформаторов в значительной мере зависит от сил прессовки обмоток. В трансформаторах с активной частью наиболее распространенной конструкции, в которой ярмовые балки используются для прессовки как обмоток, так и магнитопровода существенным фактором, влияющим на силы прессовки являются силы сухого трения между ярмовыми балками и ярмом. В работе [1] рассмотрен процесс изменения усилий в элементах крепления ярмо-

УДК 621.314.21.045.001.5

ОСЕВЫЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОСЛЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Розглянуто трансформатори стрижневого типу, в яких пресування обмоток і торцевих ярем магнітної системи здійснюється за допомогою одних і тих же ярмових балок. З урахуванням сил тертя між ярмовими балками і ярмом визначено зусилля в елементах активної частини після коротких замикань. На числових прикладах вивчено вплив на зусилля в обмотках осевих сил короткого замикання.

© И. В. Лазарев, В. Г. Шевченко, 2015