

УДК 539.3

ПРОНИКАНИЕ ЖЕСТКИХ УДАРНИКОВ В СЛОИСТЫЕ ПЛАСТИНЫ И НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ГЛОБАЛЬНОЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ^{*)}

© 2012 г. Н.В. Баничук, С.Ю. Иванова, Е.В. Макеев

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

banichuk@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 28.06.2012

Рассмотрены задачи оптимального проектирования кусочно-однородных слоистых пластин, состоящих из слоев с различными механическими свойствами и подверженных прониканию в них абсолютно жестких ударников. Число материалов предполагается конечным, и, следовательно, множество рассматриваемых допустимых переменных проектирования считается состоящим из дискретных величин. В качестве ударников рассматриваются различные осесимметричные тела, обладающие цилиндрической, конической и затупленной конической формами носовой части. С использованием эволюционного метода поиска глобального экстремума (генетический алгоритм) решены задачи оптимизации слоистой структуры пластинок, обладающих максимальной баллистической предельной скоростью входа и минимальной массой.

Ключевые слова: многоцелевая оптимизация, проникание в деформируемую среду, слоистые структуры.

Введение

Задачи внедрения жестких ударников в деформируемые среды при сверхзвуковых скоростях входа и задачи оптимального проектирования слоистых защитных конструкций представляют значительный прикладной и теоретический интерес. обстоятельный обзор работ по механике внедрения ударников в твердые тела представлен Бэкманом и Гольдсмитом [1], а также Гольдсмитом [2]. В работах Бивина, Викторова, Коваленко [3] и Бивина, Колесникова, Флитмана [4] метод динамического внедрения был развит применительно к проблеме определения механических свойств среды. Эффекты кавитации и влияние формы головной части ударников при проникании в деформируемые тела изучались Хиллом [5]. Вопросы кавитации при вертикальном входе ударников в упругопластические среды исследовались Бивиним [6]. Некоторые экспериментальные аспекты рассматриваемых проблем описаны в книге [7]. Лабораторные эксперименты по внедрению в геологические структуры со скоростью соударения, не превышающей 2,1 км/с, описаны Форрестолом,

^{*)} Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №11-08-00030а), Программой фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН №12 и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-2611.2012.1).

Ли, Дженрет [8]. Экспериментальные и теоретические результаты по проблеме проникания в слоистые материалы содержатся в работе Бивина [9].

Некоторые основные задачи оптимизации формы жестких ударников, внедряющихся в деформируемые среды, были сформулированы и решены в рамках как классического вариационного анализа, так и численных методов в работах Бен-Дора, Дубинского, Эльперина [10–14], Баничука, Ивановой [15], Баничука, Рагнелды, Серры [16], Остапенко, Романенко, Якуниной [17] и Остапенко, Якуниной [18]. Многоцелевым задачам оптимизации формы ударника, движущегося в деформируемой среде, посвящена работа Баничука, Ивановой, Рагнелды, Серры [19]. Некоторые задачи оптимизации однородных конструкций покрытий и слоистых конструкций, подверженных внедрению в них жестких ударников (в случае нормального удара), были изучены Аптуковым [20], Аптуковым и Поздеевым [21], Аптуковым и др. [22–24].

В [20, 22] были рассмотрены цилиндрические и конические ударники и определено оптимальное распределение механических характеристик в неоднородной пластине на основе использования принципа максимума Понтрягина. В [23] решались дискретные задачи оптимизации слоистых пластин, состоящих из нескольких слоев из различных материалов. Данные исследования были подытожены в монографии [24]. Заметим, что в [21, 22] задача оптимизации слоистой конструкции исследовалась с использованием линейного соотношения между динамической твердостью H_d и плотностью материала ρ : $H_d = C_1\rho + C_2$ (C_1, C_2 – материальные константы). Было установлено, что оптимальное решение характеризуется кусочно-постоянным распределением материальных свойств.

Каниболотский и Уржумцев опубликовали книгу [25], посвященную анализу и проектированию слоистых конструкций, в которую были включены также результаты, касающиеся оптимизации покрытий, подверженных удару.

Алехин и Уржумцев [26] посвятили свои исследования оптимизации слоистых механических систем, включая проблемы проникания ударников в сплошные среды. В книге [27] Бен-Дор, Дубинский и Эльперин исследовали задачи оптимизации формы жестких ударников, проникающих в пластические, бетонные и некоторые композитные среды, а также задачи исследования баллистических свойств защитных конструкций. Третий раздел этой книги посвящен оптимизации многослойных покрытий. В недавно изданной монографии [28] Баженовым и Котовым представлены важные теоретические результаты и данные численного моделирования по проблеме динамического контактного взаимодействия жестких тел и деформируемых сред. В частности, исследованы вопросы динамической идентификации механических свойств рассматриваемых сред.

Пробивание слоистой структуры абсолютно жестким осесимметричным ударником

Рассмотрим многослойную структуру, состоящую из n однородных слоев, изготовленных из r_m различных материалов (n, r_m – заданные числа). Материалы этих слоев лежат в интервалах $x_i \leq x < x_{i+1}$, а ось x ориентирована по нормали к пластинке, так что $x_{i+1} = x_i + \Delta_i$, $x_0 = 0$, $x_n = L$, $i = 0, 1, \dots, n-1, n$, где Δ_i – толщина слоя с номером i , а $L = \sum_i \Delta_i$ – толщина составной кусочно-однородной пластины. Свойства материала слоя ($x_i \leq x < x_{i+1}$) с номером $i+1$ характеризуются двумя константами: динамической жесткостью A_0^{i+1} и плотностью A_2^{i+1} . В целом свойства состав-

ной пластины описываются кусочно-постоянными функциями $A_0(x)$, $A_2(x)$:

$$A_0(x) = A_0^{i+1}, \quad A_2(x) = A_2^{i+1}, \quad x \in [x_i, x_{i+1}). \quad (1)$$

Для удобства вводится кусочно-постоянная функция

$$t = t(x), \quad x \in [0, L], \quad t \in \{t_i = i\}, \quad (2)$$

и применяется натуральная параметризация свойств материалов

$$A_0(t(x)) = A_0^{i+1}, \quad A_2(t(x)) = A_2^{i+1}, \quad x \in [x_i, x_{i+1}), \quad (3)$$

которая соответствует некоторому материалу с номером s , т.е.

$$A_0^{i+1}, A_2^{i+1} \in \{(A_0)_s, (A_2)_s\}, \quad s = 1, 2, \dots, r_m. \quad (4)$$

Динамика высокоскоростного проникания осесимметричного абсолютно жесткого ударника (со скоростями входа вплоть до $2 \cdot 10^3$ м/с) исследуется с применением формулы, связывающей величину сопротивления слоистой среды $D(x)$ с параметрами материалов слоев A_0^i , A_2^i , их размерами Δ_i , а также с формой ударника $y = y(x)$ и его длиной l [27]:

$$D(x) = D_{nose}(x) + D_{lat} = B_0(x) + B_2(x)v^2, \quad (5)$$

$$B_0(x) = \pi r^2 A_0(x) - 2\pi \int_{x_*}^{x_{**}} A_0(\eta) y y_\eta d\eta, \quad (6)$$

$$B_2(x) = \pi r^2 A_2(x) - 2\pi \int_{x_*}^{x_{**}} \frac{A_2(\eta) y y_\eta^3}{1 + y_\eta^2} d\eta, \quad (7)$$

где r – радиус затупленной носовой части ударника. Независимая переменная x в данных выражениях изменяется на интервале $0 \leq x \leq L + l$ и описывает положение носика ударника в выбранной системе координат, причем величины x_* и x_{**} характеризуют различные стадии проникания ударника в слоистую пластинку и размеры участка взаимодействия ударника и слоистой среды. Так, на начальном этапе при частичном входе ударника, т.е. при $0 \leq x < l$, имеем $x_* = 0$, $x_{**} = x$. При полном проникании ударника, т.е. при $l \leq x \leq L$, имеем $x_* = x - l$ и $x_{**} = x$, а в случае частичного выхода ударника из пластинки, т.е. при $L < x \leq L + l$, полагаем $x_* = x - l$, $x_{**} = L$. С учетом соотношений (5)–(7) процесс проникания жесткого ударника в слоистую среду (многослойную пластинку) описывается обыкновенным дифференциальным уравнением при $0 < x < L$ с граничным условием при $x = 0$:

$$Mv \frac{dv}{dx} = -D, \quad (8)$$

$$(v)_{x=0} = v_{imp}. \quad (9)$$

Здесь $v(0) = v_0 = v_{imp} > 0$ – скорость ударника при входе в слоистую структуру, M – его масса, а $v = v(x)$ – распределение скоростей при $0 < x < L$.

Если начальная скорость (скорость входа) $v_0 = v_{imp}$ такова, что

$$v(x) > 0, \quad x \in [0, L + l), \quad (10)$$

$$(v)_{x=L+l} = 0,$$

то скорость соударения называется «баллистической предельной скоростью», то есть

$$v(0) = v_{imp} = v_{BLV}. \quad (11)$$

Эта скорость принимается здесь в качестве основной защитной характеристики (критерия) слоистой структуры. Для эффективного отыскания $v_{BLV} = -J_v$ удобно ввести новую независимую переменную ξ :

$$\xi = L + l - x, \quad d\xi = -dx, \quad (12)$$

и преобразовать задачу интегрирования дифференциального уравнения (8) с заранее неизвестным начальным условием (9) в задачу интегрирования модифицированного дифференциального уравнения с нулевым начальным условием

$$\frac{dv^2}{d\xi} = \beta(\alpha + v^2), \quad (13)$$

$$(v^2)_{\xi=0} = 0. \quad (14)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\alpha = \frac{B_0}{B_2}, \quad \beta = \frac{2B_2}{M}. \quad (15)$$

Таким образом, при заданном распределении материалов в слоистой пластине распределение скоростей ударника $v = v(\xi)$ и величина баллистической предельной скорости

$$v_{BLV} = (v)_{\xi=L+l}$$

находятся из решения задачи Коши (13), (14).

Задача многоцелевой оптимизации защитной слоистой структуры

В дальнейшем v_{BLV} принимается в качестве положительной максимизируемой величины или, в эквивалентной форме, отрицательной величины ($-v_{BLV}$) и рассматривается в качестве минимизируемого функционала

$$J_v = -v_{BLV}(t, \Delta), \quad (16)$$

где t – кусочно-постоянная функция из (2), определяющая натуральную параметризацию слоистой структуры, а $\Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n)$. Для оценки стоимости материала составной слоистой пластинки или, в частности, ее массы в дальнейшем используется интегральный функционал

$$J_m = S \int_0^L k(t(x)) dx, \quad (17)$$

где S – площадь пластинчатого слоя, а k – удельная стоимость материала, в частности, его плотность ($k = A_2$). Полная толщина слоистой структуры L также может рассматриваться в качестве скалярного функционала, то есть

$$J_L = L = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n. \quad (18)$$

С учетом введенных функциональных характеристик (скалярных функционалов) в рамках рассматриваемой модели динамического взаимодействия ударника

и слоистой пластины может быть рассмотрена следующая многоцелевая задача минимизации векторного функционала

$$J_* = J(h_*) = \min_{h \in \Lambda_h} \left\{ \begin{matrix} J_v \\ J_m \\ J_L \end{matrix} \right\}, \quad (19)$$

где $h = (t, \Delta) = (t, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n)$, а Λ_h – некоторое заданное множество допустимых значений переменных проектирования. Операция \min в (19) рассматривается в смысле Парето. Это означает, что

$$h_* = \arg \min_{h \in \Lambda_h} J(h), \quad (20)$$

если не существует другая переменная проектирования \tilde{h} , такая, что

$$J_i(\tilde{h}) \leq J_i(h_*), \quad i = v, m, L, \quad (21)$$

и, по крайней мере, для одной из компонент векторного функционала (скалярного функционала J_j) справедливо следующее строгое неравенство:

$$J_j(\tilde{h}) < J_j(h_*). \quad (22)$$

Для исследования сформулированной многоцелевой задачи оптимизации (19) применим метод целевого взвешивания, основанный на введении весового функционала J_C в виде скалярной суммы отдельных целевых функционалов (компонент векторного функционала) J_v, J_m, J_L , умноженных на весовые множители C_v, C_m, C_L :

$$J_C = C_v J_v + C_m J_m + C_L J_L, \quad (23)$$

где предполагается, что

$$1 \geq C_v \geq 0, \quad 1 \geq C_m \geq 0, \quad 1 \geq C_L \geq 0, \quad (24)$$

$$C_v + C_m + C_L = 1. \quad (25)$$

В соответствии с методом весовых множителей решение многоцелевой задачи оптимизации (19) (отыскание Парето-оптимальных решений) сводится к решению вспомогательной задачи минимизации скалярного функционала

$$J_C^* = J_C(h_*) = \arg \min_{h \in \Lambda_h} J_C(h) \quad (26)$$

при ограничениях (24), (25), наложенных на весовые коэффициенты.

Отыскание оптимальных многокритериальных структур на основе применения нелокального поиска – генетического алгоритма

Для отыскания решения многоцелевой задачи оптимизации (19) применим эволюционный оптимизационный алгоритм – генетический алгоритм [29]. Решение задачи минимизации функционала $J_C(h)$ выполняется для различных заданных значений параметров задачи. Для каждого интервала $[\xi_j, \xi_{j+1})$, соответствующего слою с номером $j + 1$, величины параметров $(A_0)^{j+1}$ и $(A_2)^{j+1}$ принимали значения, отвечающие выбранному материалу. Полагалось, что рассматриваемые в применяемом генетическом алгоритме популяции состоят из N индивидов, представляющих до-

пустимую кусочно-однородную пластинчатую структуру. Число N предполагается четным и неизменяющимся в процессе обновления популяций. Каждый индивид (i – номер индивида) рассматриваемой популяции описывается множеством величин $h(i,j)$, соответствующих переменной проектирования для интервала $\xi_{j-1} \leq \xi \leq \xi_j$. «Наилучший» индивид, т.е. множество $h(i,j)$, минимизирующее функционал $J_C(h)$, отыскивается с использованием генетического алгоритма.

На первом шаге алгоритма выполняется инициализация N индивидов начальной популяции путем приписывания случайных величин каждому элементу $h(i,j)$. Затем на втором шаге выбирается некоторое натуральное число $N^T < N$, и из N^T индивидов, выбранных случайным образом, сохраняется только один индивид, обладающий минимальным значением J_C . Аналогично находится второй индивид, и из них составляется первая родительская пара индивидов. Всего составляется $N/2$ таких пар. Третий шаг заключается в выполнении оператора пересечения (crossover) с некоторой вероятностью p_{CO} ($0 < p_{CO} < 1$) и в получении двух новых индивидов-отпрысков от каждой рассматриваемой пары индивидов-родителей. Получаемые N индивидов-отпрысков составляют новую популяцию. Последний (четвертый) шаг алгоритма заключается в мутации полученной новой популяции с вероятностью мутации p_m . Этот шаг выполняется для предотвращения «застывания» в локальном минимуме. Заметим, что если найденный наилучший индивид окажется хуже наилучшего индивида предыдущей популяции, то он заменяется старым. После этого алгоритм возвращается к выполнению второго шага и начинает строить следующую популяцию. Цикл, состоящий из второго, третьего и четвертого шагов, представляет собой генерацию новой популяции. Выполняемые итерации, состоящие из инициализации и заданного числа генераций N_{gen} , реализуют процесс поиска глобального минимума. Заметим, что решение задачи отыскивалось для некоторого заданного числа инициализаций N_{init} .

Оптимальное распределение материалов определялось для случая, когда

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \dots \Delta_n = \frac{L}{n} \quad (n = 20), \quad (27)$$

а минимизируемый вектор-функционал имел две скалярные компоненты J_v, J_m , то есть

$$J = \left\{ \begin{matrix} J_v \\ J_m \end{matrix} \right\} \rightarrow \min_{t \in \Lambda_t}, \quad (28)$$

$$J_C = C_v J_v + C_m J_m = (1 - C_m) J_v + C_m J_m \rightarrow \min_{t \in \Lambda_t}, \quad (29)$$

где $0 \leq C_m \leq 1$, Λ_t – множество допустимых кусочно-постоянных t .

В проводимых исследованиях параметры генетического алгоритма задавались следующим образом: $N = 10$, $N^T = 4$, $p_{CO} = 0,5$, $p_m = 0,05$. Вычисления завершались после выполнения $N_{gen} = 500$ генераций (итераций) для $N_{init} = 10$ инициализаций. Характеристические свойства материалов, рассматриваемых в качестве допустимых величин для слоев пластинки, брались из [30, 31]:

- алюминий $(A_0)_1 = 350 \cdot 10^6$ Н/м², $(A_2)_1 = 2765$ кг/м³;
- мягкая сталь $(A_0)_2 = 1850 \cdot 10^6$ Н/м², $(A_2)_2 = 7830$ кг/м³;
- медь $(A_0)_3 = 910 \cdot 10^6$ Н/м², $(A_2)_3 = 8920$ кг/м³;
- дюралюминий $(A_0)_4 = 1330 \cdot 10^6$ Н/м², $(A_2)_4 = 2765$ кг/м³.

На рис. 1 представлены оптимальные распределения материалов по слоям структуры толщиной $L = 0,1$ м при значении весового коэффициента $C_m = 0,2$. Вариант *a* соответствует внедрению цилиндрического ударника (радиус поперечного сечения $r = 0,005$ м, масса ударника $M = 0,05$ кг), при этом первые семь слоев структуры – медь ($s = 3$, ячейки черного цвета), последующие тринадцать – сталь ($s = 2$, ячейки серого цвета). Вариант *б* иллюстрирует случай проникания конического ударника (длина конической части $l = 0,02$ м, радиус цилиндрической части $r = 0,005$ м, масса ударника $M = 0,05$ кг). Первые пятнадцать слоев – сталь ($s = 2$, серый цвет), последние пять – дюралюминий ($s = 4$, белый цвет). Вариант *в* отвечает случаю внедрения затупленного конического ударника (длина конической части $l = 0,02$ м, радиус затупленного носика $r = 0,002$ м, радиус цилиндрической части $R = 0,005$ м, масса ударника $M = 0,05$ кг). Оптимальной в этом случае является стальная плита.

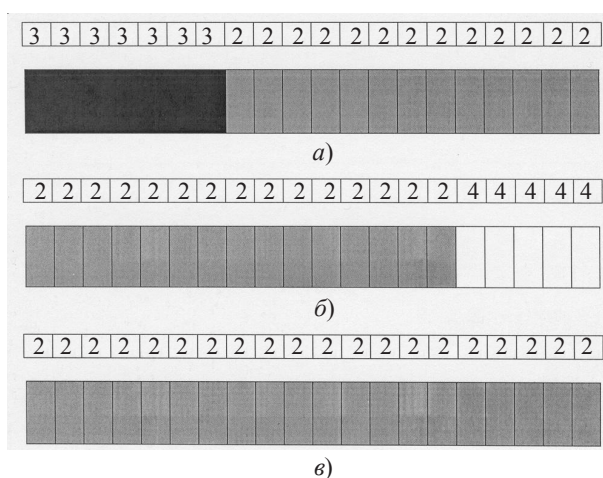


Рис. 1

На рис. 2 представлена зависимость величины скорости проникающего в структуру ударника от номера слоя при $C_m = 0$. Пунктирная кривая отвечает цилиндрическому ударнику, тонкая и жирная сплошные линии – соответственно затупленно-му и коническому телу. Последние четыре слоя 21–24, показанные на рисунке, являются вспомогательными для расчета баллистической предельной скорости и считаются заполненными воздухом.

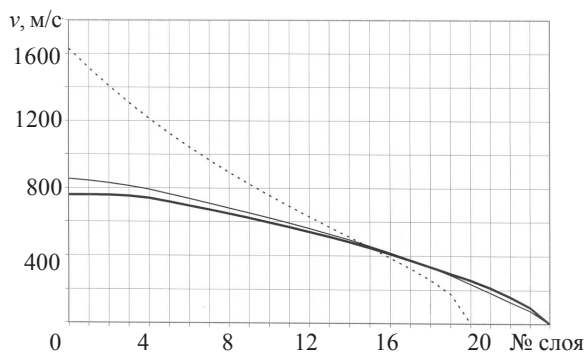


Рис. 2

Рисунок 3 представляет зависимость минимизируемого функционала J_C от коэффициента C_m для цилиндра (штриховая линия), затупленного конуса (тонкая сплошная линия) и конуса (жирная сплошная линия).

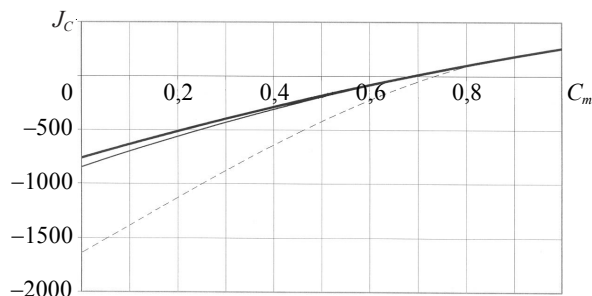


Рис. 3

Некоторые выводы и замечания

Найдены наилучшие слоистые структуры защитных систем в рамках применения многоцелевой постановки проблемы, т.е. с учетом характеристик надежности и материальных расходов (вес, стоимость материалов и т.п.). При проведении аналитических и численных исследований применен эволюционный подход к отысканию глобального оптимума, учитывающий дискретный набор материалов. В частности, определены глобально оптимальные распределения слоев защитных структур, учитывающие требования максимизации величины баллистических предельных скоростей и минимальности весовых или стоимостных характеристик используемого материала. Заметим, что в проведенных исследованиях наряду с применяемыми эффективными методами анализа и обратным интегрированием для получения величины баллистической предельной скорости не учитывались факторы перехода границ раздела сред (слоев) и особенности процесса входа и выхода из пробиваемой структуры.

Список литературы

1. Backman M.E., Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets // Internat. Engng. Sci. 1978. V. 16, No 1. P. 1–99.
2. Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets // Internat. J. Impact Engng. 1999. V. 22 (2,3). P. 95–395.
3. Бивин Ю.К., Викторов В.В., Коваленко В.В. Определение динамических характеристик грунтов методом внедрения // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1980. №3. С. 105–110.
4. Бивин Ю.К., Колесников В.А., Флитман Л.М. Определение механических свойств среды методом динамического внедрения // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1982. №5. С. 181–185.
5. Hill R. Cavitation and influence of headshape in attack of think targets by non-deformable projectiles // J. Mech. and Phys. Solids. 1980. V. 28, No 5, 6. P. 249–263.
6. Бивин Ю.К. Кавитация при вертикальном входе жестких тел в упругопластическую среду // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1997. №1. С. 93–101.
7. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н.А. Златина, Г.И. Мишина. М.: Наука, 1974.
8. Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D. Laboratory-scale penetration experiments into geological targets up to impact velocities of 2.1 km/s // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1986. V. 53, No 2. P. 317–320.
9. Бивин Ю.К. Проникание твердых тел в сыпучие и слоистые среды // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2008. №1. С. 154–160.

10. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Shape optimization of high velocity impactors using analytical models // International Journal of Fracture. 1997. V. 87, No 1. L7–L10.
11. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimal 3-D penetrating into layered targets // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1997. V. 27, No 3. P. 161–166.
12. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of the shape of a penetrator taking into account plug formation // International Journal of Fracture. 2000. V. 106, No 3. P. L29–L34.
13. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Shape optimization of a penetrator nose // Theoret. Appl. Fract. Mech. 2001. V. 35, No 3. P. 261–270.
14. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Numerical solution for shape optimization of an impactor penetrating into a semi-infinite target // Computers and Structures. 2003. V. 81, No 1. P. 9–14.
15. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu. Shape optimization of rigid 3-D high speed impactor penetrating into concrete shields // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2008. V. 36, No 3. P. 249–259.
16. Banichuk N.V., Ragnedda F., Serra M. On body shapes providing maximum depth of penetration // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2009. V. 38, No 3. P. 491–498.
17. Остапенко Н.А., Романенко В.И., Якунина Г.Е. Оптимальные формы трехмерных тел, проникающих в плотные среды // Прикладная механика и техническая физика. 1994. Т. 4. С. 515–521.
18. Остапенко Н.А., Якунина Г.Е. Форма тонких трехмерных тел, проникающих на максимальную глубину в плотные среды // Прикладная математика и механика. 1999. Т. 63. С. 953–967.
19. Multiobjective shape optimization of the rigid shell moving into dense media / N.V. Banichuk, S.Yu. Ivanova, F. Ragnedda, M. Serra // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2013. V. 40, No 1. P. 73–82.
20. Аптуков В.Н. Оптимальная структура неоднородной пластины с непрерывным распределением свойств по толщине // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1985. №3. С. 149–152.
21. Аптуков В.Н., Поздеев А.А. Некоторые минимаксные задачи технологии и прочности конструкций // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1982. №1. С. 47–55.
22. Аптуков В.Н., Петрухин Г.И., Поздеев А.А. Оптимальное торможение твердого тела неоднородной пластиной при ударе по нормали // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1985. №1. С. 165–170.
23. Аптуков В.Н., Белоусов В.Л., Каниболотский М.А. Оптимизация структуры слоистой плиты при проникании жесткого ударника // Механика композитных материалов. 1986. №2. С. 252–257.
24. Аптуков В.Н., Мурзакаев А.В., Фонарев А.В. Прикладная теория внедрения. М.: Наука, 1992.
25. Каниболотский М.А., Уржумцев Ю.С. Оптимальное проектирование слоистых конструкций. Новосибирск: Наука, 1989.
26. Алехин В.В., Уржумцев Ю.С. Оптимизация слоистых систем. Якутск: Якутский филиал изд-ва СО РАН, 2002.
27. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Applied high-speed plate penetration dynamics. Dordrecht: Springer, 2006.
28. Баженов В.Г., Котов В.Л. Математическое моделирование нестандартных процессов удара и проникания осесимметричных тел и задачи идентификации свойств грунтовых сред. М.: Физматлит, 2011.
29. Goldberg D.E. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning. Westley Publ. Comp. inc., 1989.
30. Витман Ф.Ф., Иоффе Б.С. Простой метод нахождения динамической твердости металлов с помощью двустороннего конуса // Заводская лаборатория. 1948. Т. XIV, №6. С. 727–732.
31. Витман Ф.Ф., Степанов В.А. Влияние скорости деформирования на сопротивление деформированию металлов при скоростях удара 10^2 – 10^3 м/с // Некоторые проблемы прочности твердого тела. Изд-во АН СССР, 1959. 336 с.

**PENETRATION OF RIGID STRIKERS IN LAYERED PLATES AND SOME
PROBLEMS OF GLOBAL MULTIPURPOSE STRUCTURAL OPTIMIZATION**

N.V. Banichuk, S.Yu. Ivanova, E.V. Makeev

Problems of optimal design of piece-wise homogeneous layered plates consisting from different materials against penetration of absolutely rigid strikers are considered. The number of materials is assumed to be finite and consequently the set of admissible design variables is composed from discrete values. Various axisymmetric bodies having cylindrical, conical and truncated conical nose parts are considered as rigid strikers. Problems of finding of optimal layered plate structures providing the maximal ballistic limit velocity and minimal mass are solved using evolutionary method of global extremum search (genetic algorithm).

Keywords: multiobjective optimization, penetration in deformable media, layered structures.