ՀԱՅԿԱԿԱՆ ԽՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Մեխանիկա 42, № 6, 1989 Механика

УДК 539.37

НОРМАЛЬНЫЙ УДАР И ПРОБИВАНИЕ ТОНКОЙ ПЛИТЫ ЦИЛИНДРОМ В УСЛОВИЯХ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

РОМАНОВ Н. Н., САГОМОНЯН А. Я.

Толщина плиты меньше диаметра поперечного сечения цилиндра, который, в свою очередь, значительно меньше длины цилиндра [7]. Волновым процессом в отходе (пробке), образовавшемся в тонкой плите, пренебрегается. Деформации взаимодействующих тел происходят без упрочнения материалов. Эти приближения упрощают расчеты, но не являются принципиальными: указанным здесь путем можно исследовать задачу пробивания с учетом волновых процессов в преграде и упрочнения материалов тел. В отличие от работы [1], в настоящем исследовании рассматривается процесс торможения недеформированной хвостовой части цилиндра и допускается изменение скачком площади поперечного сечения цилиндра на фронте пластической волны [2, 3].

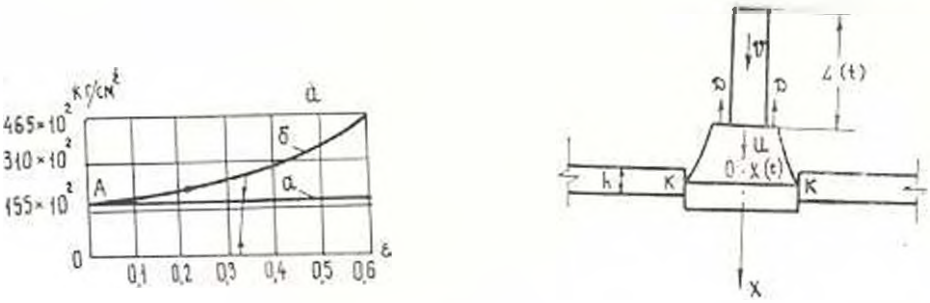
1. Модель. Опыты показывают [1], что при нормальном ударе цилиндрическим металлическим бойком о плоскость тонкой металлической плиты, толщина которой значительно меньше длины цилиндра и не превосходит его диаметра поперечного сечения, может быть выбита часть преграды — отход (пробка). В настоящем исследовании принимается, что пробивание плиты сопровождается образованием и выбиванием пробки из плиты. Отход (пробка) представляет собой цилиндр, диаметр которого равен диаметру расширившейся при ударе площади переднего среза бойка, прошедшего сквозь плиту [4]. Этот факт позволяет считать, что основное действие бойка на преграду локализовано в цилиндрическом объеме под поверхностью контакта. Механизм явления выбивания пробки можно представить следующим образом. При ударе в преграде непосредственно под передним срезом цилиндра образуется плоская ударная волна, приводящая к большим локальным пластическим деформациям, большому тепловыделению и высоким значениям температуры. В этом процессе температура повышается до 10^3 градусов по Цельсию, а скорости деформации сдвига достигают значений порядка 10^7 $С^{-1}$ [5]. Если скорость уменьшения прочности из-за наличия высоких температур больше скорости увеличения прочности за счет упрочнения при деформации, то пластические деформации остаются локализованными, а процесс в целом в этих условиях носит адиабатический характер. В

результате повышается местная температура, что приводит к дополнительным пластическим деформациям. Вследствие вынужденного смещения материала преграды на контактной поверхности в направлении проникания, сдвиговые пластические деформации и сдвиг возникнут на периметре контакта. Поэтому зоной, где происходит этот процесс, будет тонкий слой, примыкающий к цилиндрической поверхности и плите, соосной с бойком и радиусом, примерно равном радиусу расширевшегося переднего сечения бойка. Дальнейшее развитие процесса приводит к росту пластических деформаций и максимальным значениям напряжения сдвига в этом слое. В конце концов наступает состояние, когда несущая способность преграды скачкообразно уменьшается и происходит разрушение ее материала на цилиндрической поверхности. Такой процесс разрушения называется разрушающим термопластическим адиабатическим сдвигом [6]. К настоящему времени вопрос определения критерий возникновения разрушающего сдвига не решен. В работах [4, 6] приводятся результаты экспериментальных исследований, показывающие, что при больших скоростях деформаций, характерных для процессов пробивания, величина разрушающего напряжения сдвига не зависит от скорости удара и является постоянной величиной. Ниже принимается это условие. Для определенности в расчетах величина разрушающего сдвига приравнивается значению предела текучести при сдвиге. Таким образом, в рассматриваемой задаче при ударе в преграде мгновенно образуется отход, представляющий собой жесткий цилиндр, на боковой поверхности которого действует разрушающий сдвиг. В дальнейшем движение отхода (пробки) происходит под действием силы давления на контактной поверхности и силы сопротивления сдвига на боковой поверхности. Этот процесс принято называть «выбиванием пробки».

В момент удара в цилиндре возникает пластическая волна, которая в процессе взаимодействия с преградой распространяется к его свободному торцу. Непосредственно перед пластической волной в цилиндре напряжение равно пределу текучести при растяжении. Так как материал цилиндра не упрочняется, то такое же напряжение будет за пластической волной. Тогда соотношения на волне, выражающие основные законы механики в рассматриваемом одномерном движении, приводят к необходимости допустить скачок площади поперечного сечения цилиндра на пластической волне. Цилиндрический боек рассматривается как стержень, его хвостовая часть перед пластической волной считается жестким телом. Плотности материалов предполагаются постоянными.

На фиг. *1а* показана модельная зависимость напряжения от деформации для высокопрочного жесткопластического материала [7]. По горизонтальной оси отложена деформация ε, по вертикальной оси — напряжение. Линия *а* соответствует истинному значению предела текучести при растяжении σ_s неупрочняющегося материала, линия *б* — условному (техническому) значению материала σ.

2. *Основные уравнения.* Направим ось x по скорости пробивания



Фиг. 1

вертикально вниз вдоль оси цилиндра, начало оси x поместим на верхней поверхности плиты (фиг. 1*б*). Учитывая направление оси x, уравнение сохранения массы и количества движения на фронте пластической волны, распространяющейся в сторону свободного торца цилиндра запишутся в виде

$$F_0(v-D)=F(u-D), \quad \sigma_s>0$$
$$\rho F_0(v-D)(u-v)=\sigma_s(F_0-F) \tag{2.1}$$

Здесь ρ—плотность материала цилиндра, F_0, F—площади поперечного сечения цилиндра перед и за фронтом волны, v—скорость хвостовой части цилиндра, u—скорость цилиндра за волной, D—скорость волны относительно неподвижной точки $x=0$. Введем обозначения

$$s=\frac{F}{F_0}, \quad U=\frac{u}{a}, \quad V=\frac{v}{a}, \quad c=\frac{D}{a}, \quad a=\sqrt{\frac{\sigma_s}{\rho}} \tag{2.2}$$

и перепишем уравнения (1) в безразмерных переменных (2):

$$(V-c)=s(U-c), \quad (V-c)(U-V)=1-s \tag{2.3}$$

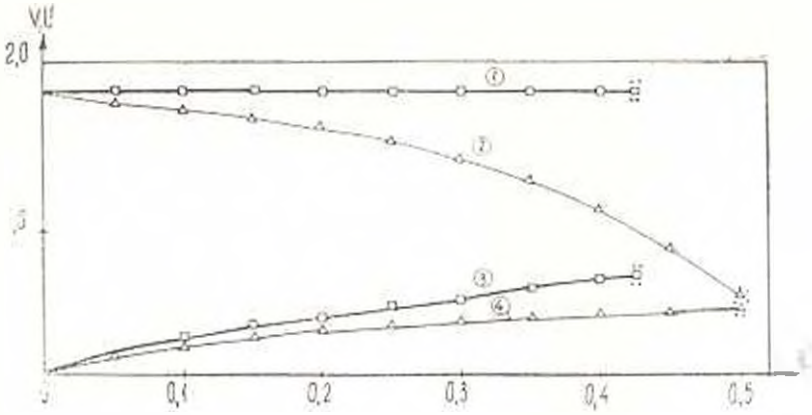
Пусть $L(t)$—текущая длина хвостовой части цилиндра, L_0—длина цилиндра до удара. Тогда можно записать следующее кинематическое условие—размерных и безразмерных переменных:

$$\frac{dL}{dt}=L=-(v-D), \quad l=\frac{dl}{dt'}=-(V-c), \quad l=\frac{L}{L_0}, \quad t'=\frac{at}{L_0} \tag{2.4}$$

где t'—безразмерное время, l—безразмерная длина хвостовой части цилиндра.

В рассматриваемой задаче отход и головная часть цилиндра за пластической волной движутся с одинаковыми скоростями и ускорениями. Поэтому движения обоих тел можно определить одним уравнением

$$[M_0+(M_c-\rho F_0 L(t))]\frac{d^2x}{dt^2}=\sigma_s F-2(h-x)(\pi F_0)^{1/2}\tau \tag{2.5}$$



Фиг 2

Фиг. 2

Здесь τ—разрушающий сдвиг на боковой поверхности отхода принимается, равным пределу текучести при сдвиге материала плиты, M_0—масса отхода, M_c—масса цилиндра в целом, h—толщина плиты, F—площадь поперечного сечения цилиндра непосредственно за пластической волной, F_0—площадь поперечного сечения переднего среза цилиндра после удара, равная площади отверстия в плите, образованного отходом. Координата переднего среза цилиндра (контактной поверхности KK на фиг. 2) в момент времени t обозначена через $x(t)$. Символом R_0 обозначим начальный радиус кругового сечения цилиндра и пусть ρ_0 и $\sigma_s=2\tau$ обозначают плотность и предел текучести при растяжении материала плиты. Введем безразмерные параметры

$$\alpha=\frac{F_0}{F}, \quad \beta=\frac{h}{l_0}, \quad \gamma=\frac{l_0}{R_0}, \quad \eta=\frac{\rho_0}{\rho}, \quad \chi=\frac{p_z}{\sigma_s}$$

$$A=1+\alpha\beta, \quad B=\gamma\sqrt{\alpha\eta}, \quad y=\frac{x(t)}{l_0}, \quad \ddot{y}=\frac{d^2y}{dt'^2} \tag{2.6}$$

и учтем, что

$$u=\frac{dx(t)}{dt}, \quad U=\dot{y}, \quad \dot{y}=\frac{dy}{dt'} \tag{2.6'}$$

Тогда уравнению (2.5) можно придать вид

$$(A-l)\ddot{y}=s+B(\dot{y}-\beta) \tag{2.7}$$

Нетрудно показать, используя (2.3) и (2.6′), что уравнение (2.4) эквивалентно уравнению

$$l=-\sqrt{s}, \quad \sqrt{s}=\frac{1}{2}\left[V-\dot{y}+\sqrt{4+(V-\dot{y})^2}\right] \tag{2.8}$$

где точка над символом означает дифференцирование по безразмерному времени t'

Уравнение движения хвостовой части цилиндра с учетом торможения в размерных и безразмерных переменных можно записать так:

$$L(t)\frac{dv}{dt} = -a^2, \quad l\dot{V} = -1, \quad \dot{V} = \frac{dV}{dt'} \tag{2.9}$$

Для постоянной скорости хвостовой части цилиндра имеем

$$v(t) = v_0, \quad V = V_0 = \frac{v_0}{a}$$

Начальными условиями системы дифференциальных уравнений (2.7), (2.8), (2.9) относительно неизвестных y, l, V будут

$$t' = 0, \quad l = 1, \quad V = V_0, \quad y = 0, \quad \dot{y} = 0 \tag{2.10}$$

На контакной поверхности скорость, ускорение и напряжение непрерывны.

Если пластическая волна в цилиндре затухает до момента вылета отхода из плиты, то в этом случае дальнейшее движение отхода и цилиндра происходит с одинаковыми скоростями и ускорениями и уравнение движения в рассматриваемом случае имеет вид

$$[\rho F_0 L_0 + \rho_0 F_0 h]\frac{d^2x}{dt^2} = -(h-x)(\pi F_0)^{1/2}\rho_0 \tag{2.11}$$

Или в безразмерных переменных

$$A\ddot{y} = B(y-\beta) \tag{2.12}$$

Решение уравнения (2.12) представляется в виде

$$y = \beta + C_1\exp(\lambda t') + C_2\exp(-\lambda t'), \quad \lambda = (B/A)^{1/2} \tag{2.13}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\lambda}\exp(-\lambda t_0)[\dot{y}(t_0) + \lambda(y(t_0)-\beta)], \quad C_2 = \frac{1}{2\lambda}\exp(\lambda t_0)[(\dot{y}(t_0)-\beta) - y(t_0)]$$

Символом t_0 в (2.13) обозначено значение безразмерного времени в момент исчезновения пластической волны в цилиндре. Из (2.13) нетрудно получить, что при $C_1 > 0$ отход вылетает из преграды со скоростью V_b в момент t_b', где

$$V_b = 2\lambda(-C_1C_2)^{1/2}, \quad t_b' = \ln(-C_2/C_1)^{1/2} \tag{2.14}$$

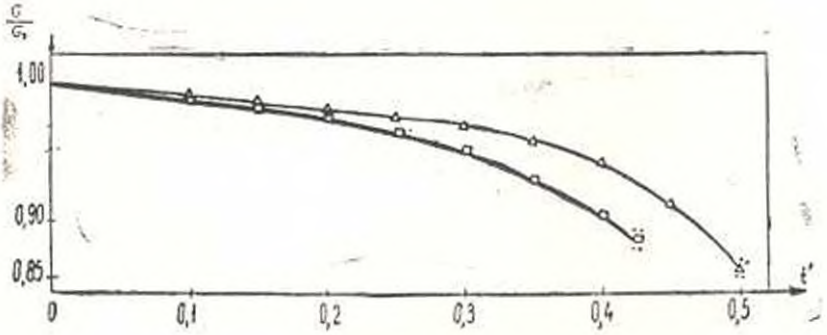
При $C_1 = 0$ движение отхода носит асимптотический характер: отход покидает преграду при $t \to \infty$ со скоростью $V \to 0$. При $C_1 < 0$ отход не вылетает из преграды и его скорость становится равной нулю в момент $t' = t_n$, где

$$t_n = \ln(C_2/C_1)^{1/2} \tag{2.15}$$

3. Результаты и анализ численного решения. Система уравнений (2.7), (2.8), (2.9) решалась для случая одинакового материала цилиндра и плиты. При численных расчетах на ЭВМ постоянные параметры, входящие в уравнения и условия задачи, имели значения

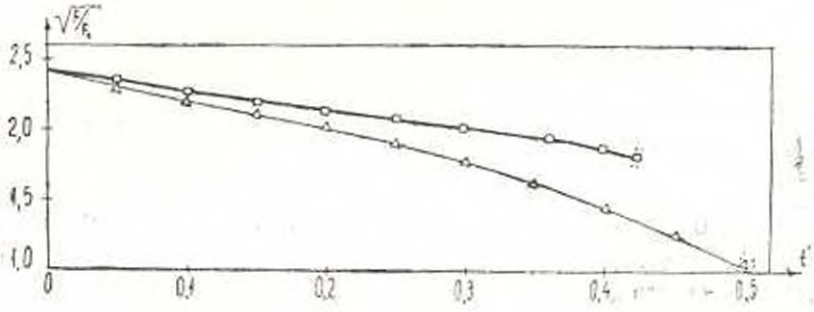
$$\beta = 0.15; \quad \varphi = 10, \quad \delta = 1, \quad \gamma = 1 \qquad (3.1)$$

Начальная скорость удара варьировалась. Результаты расчетов для $V_0 = 2$ представлены в виде графиков на фиг. 2—5. Линии с треугольниками относятся к случаю, когда учитывается торможение хвостовой части цилиндра перед пластической волной. Линии с квадратиками построены при постоянной скорости хвостовой части, равной начальной скорости $V_0 = \frac{v_0}{a}$. На фиг. 2—5 по горизонтальной оси отложено



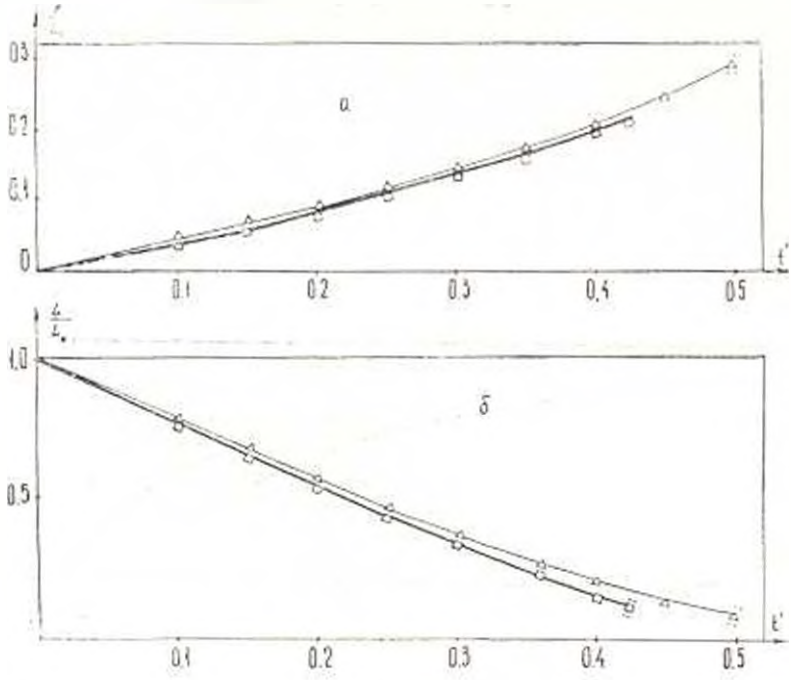
Фиг 3

Фиг. 3



Фиг. 4

безразмерное время t'. На фиг. 2 по вертикальной оси отложены безразмерные скорости хвостовой части цилиндра V (линии 1,2) и безразмерные скорости контактной поверхности U, равные скорости отхода (линии 3, 4). На фиг. 3 по вертикальной оси отложено безразмерное напряжение σ/σ_1 на контактной поверхности. На фиг. 4 по вертикали отложено значение квадратного корня от отношения площади поперечного сечения за пластической волной к начальной площади сечения. На фиг. 5*а* по вертикали отложена безразмерная длина головной части цилиндра — отношение длины деформированной части цилиндра $z(t)$ за волной к его начальной длине. Линии на фиг. 5*б* определяют изменение во времени отношения длины хвостовой части цилиндра к его начальной длине L_0.



Фиг 5

Фиг. 5

Анализ решения позволил сделать следующие основные выводы.

а. При достаточно больших скоростях V_0 выбивание пробки происходит до затухания пластической волны в цилиндре. При этом движение отхода происходит с ускорением. Такая картина наблюдается до некоторого предела. В расчетах путем варьирования скорости удара V_0 и постоянных значениях других параметров, определенных по формуле (3.1), было установлено, что этот предел близок в случае торможения хвостовой части к значению V_p: $V_p = 1{,}600$, без учета торможения хвостовой части к значению $V_p = 1{,}012$.

б. При меньших скоростях V_0, начиная с указанного выше предела до V_m, где V_m — минимальная начальная скорость, необходимая для пробития плиты, пробитие плиты происходит после полного затухания пластической волны в цилиндре. В этом диапазоне скоростей удара движение головной части цилиндра до затухания пластической волны ускоренное. В расчетах путем варьирования скоростей удара V_0 и постоянных значениях других параметров, определенных по формуле (.06), было получено, что для случая, когда учитывается торможение хвостовой части $V_m = 1{,}597$, без учета торможения для постоянной скорости хвостовой части $V_m = 1{,}010$.

При скоростях меньших минимальной скорости пробивания, то есть когда пробития не происходит, напряжение на контактной поверхности может расти и даже превысить значение σ_s.

Для решения задачи в этом диапазоне скоростей удара рассматриваемая здесь модель непосредственно не применима.

NORMAL SHOCK AND PUNCHING OF A THIN PLATE BY A CYLINDER IN THE CONDITIONS OF RIGID-PLASTIC DEFORMATION

I. N. ROMANOV, A. Ja. SAGOMONIAN

ՆՈՐՄԱԼ ՀԱՐՎԱԾԻ ՕԳՆՈՒԹՅԱՄԲ ԲԱՐԱԿ ՍԱԼԻ ԿՏՐՈՒՄԸ ԳԼԱՆՈՎ ԿՈՇՏ ՊԼԱՍՏԻԿՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ի. Ն. ՌՈՄԱՆՈՎ, Ա. ՅԱ. ՍԱՂՈՄՈՆՅԱՆ

Ամփոփում

Բերված է դեֆորմացվող գլանի օգնությամբ բարակ սալի կտրման խնդրի մոտավոր լուծումը կոշտ պլաստիկության դրվածքով՝ թափանի (խցանի) դուրս նետման պայմաններում։ Թափանցման ալիքային գործընթացը արհամարհվում է։ Խնդիրը բերված է սովորական հավասարումների համակարգի, շարժման պարամետրերի արժեքների որոշումը հանգեցվում է պարզ թվային հաշվարկի։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сагомонян А. Я.* К задаче пробивания преграды цилиндрическим бойком.—ВМУ, 1977, матмех, №5, с. 111—118.
2. *Гольдсмит В.* Удар.—М.: Стройиздат, 1965.
3. *Фрейбергер У.* Расширение круглого отверстия в листе.—Механика (сб. переводов), М.: ИЛ, 1953, с. 122—134.
4. *Рехт Р. Ф., Ипсонт Ю.* Динамика баллистической пробивки.—Прикладная механика (русск. перевод), 1963, №3, с. 73—80.
5. *Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х. Ф., Грещук Л. Б., Курран Д. Р.* Динамика удара.—М.: Мир, 1985.
6. *Рехт Р. Ф.* Разрушающий термопластический сдвиг.—Прикладная механика (русск. перевод), 1964, №2, с. 34—39.
7. *Ли Е., Таппер С.* Исследование пластической деформации в стальном цилиндре при ударе о жесткую плиту.—Механика (сб. переводов), М.: ИЛ, 1955, №2, с. 129—142.

Московский государственный университет
им. Ломоносова

Поступила в редакцию
2.XII.1988