

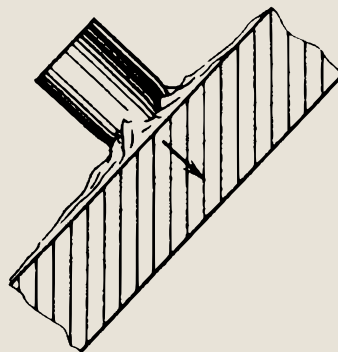
Откол брони

И. И. Кравченко

22 июля 2026 г.

Решаем задачу по физике об откольном разрушении материала из сборника Савченко [1]. Опубликовано впервые на [«Savchenko Solutions»](#).

3.8.8*. Для борьбы с танками применяют «пластиковые» снаряды. Взрывчатка во время удара такого снаряда о танк расплывается по броне, а затем взрывается. Волна, порожденная взрывом, проходит толщу брони и откалывает с внутренней стороны слой, отлетающий с большой скоростью. Найдите эту скорость и толщину отколотого слоя брони, если давление на броню при взрыве $P = 5 \cdot 10^4$ атм и действует оно в течение времени $\tau = 4 \cdot 10^{-6}$ с. Скорость звука в броне $c = 5$ км/с, плотность брони $\rho = 8 \cdot 10^3$ кг/м³.



1 Решение

Предварительное: физика волновых процессов при столкновении тел хорошо описана в Сивухине том 1 при решении задачи о столкновении тел к параграфу 82.

Считаем, что разрушения нет от давления сжатия в волне, идущей после взрыва в броне. Считаем, что плоская волна после взрыва распространяется без потерь в основном только в поперечном направлении пластины брони, как показано на рисунке.

Броню, которая по характеристикам близка к стали, при ударной нагрузке рассматриваем в приближении сильной хрупкости [2]. Это означает, что броня не будет выдерживать практически растяжение, то есть отрицательное давление. Явление хрупкости прямо описывается позже в задаче 3.8.9 (Савченко).

Анализ будем делать с помощью диаграмм зависимости деформации (относительной, что далее подразумевается) от координаты $\varepsilon(x)$ (см. задачу 3.8.2).

Так наглядно видна физика процесса (например, превращения энергии при отражении).

Плоскость пластины, противоположную плоскости взрыва, считаем свободной границей.

Рассмотрим диаграмму $\varepsilon(x)$ сразу после окончания действия давления P . Образованная волна сжатия, бегущая к свободной границе, занимают ширину по оси распространения x , равную $c\tau = 20$ мм, что будем считать меньше толщины брони.



Д1

Пока эта волна движется до свободной границы, перемещаясь со скоростью звука c с сохранением своей формы.

После касания этой волны свободной поверхности результирующую волну в броне находим наложением (сложением) прямой волны с прямой скоростью $\vec{c}$ и волны противоположной деформации с обратной скоростью $-\vec{c}$, идущей симметрично свободной границе (идея в задаче 3.8.5). Обоснование возможности сложения деформаций в определении деформации $\varepsilon = dY/dx = dy_{\text{п}}/dx + dy_{\text{о}}/dx = \varepsilon_{\text{п}} + \varepsilon_{\text{о}}$, где Y — результирующее смещение, $y_{\text{п}}, \varepsilon_{\text{п}}$ — смещение и деформация в прямой, $y_{\text{о}}, \varepsilon_{\text{о}}$ — смещение и деформация в обратной.

Посмотрим на диаграмму $\varepsilon(x)$ после касания падающей волны свободной поверхности спустя небольшое время по сравнению с τ .



Д2

Видим, что пока после касания прошло время меньше $\tau/2$ в броне будет только область сжатия с отрицательной деформацией. Положительная деформация появится сразу спустя время $\tau/2$ после касания: в этот момент броня и разрушится.

По диаграмме Д2 первое растяжение появится на расстоянии $c\tau/2 = 10$ мм от свободной границы, то есть такая часть металла отколется.

Из связи давления P волны и скорости v среды в бегущей

$$P = \rho cv,$$

что с учетом $P = E\varepsilon$ (где E — модуль Юнга) переписывается

$$E\varepsilon = \rho cv,$$

видим, что скорости всех элементов среды волн одинаковы в обеих бегущих.

Далее, можно складывать скорости среды волн. Обоснование возможности сложения таких скоростей в определении скорости $v = dY/dt = dy_{\text{п}}/dt + dy_{\text{о}}/dt = v_{\text{п}} + v_{\text{о}}$, где Y — результирующее смещение, $y_{\text{п}}, v_{\text{п}}$ — смещение и скорость среды в прямой, $y_{\text{о}}, v_{\text{о}}$ — смещение и скорость в обратной.

В момент откола скорости среды в прямой волне равны $\vec{v}$ (вдоль оси x), скорость среды в обратной волне равна так же $\vec{v}$ (использовано для краткости в бегущей волне свойство связи направления скорости среды и направления распространения волны, см. Сивухин и решение задачи 3.8.2).

Поэтому скорость в отколоте участке

$$u = 2v = \frac{2P}{\rho c} = 250 \text{ м/с.}$$

Про откольное разрушение в книге [3].

Литература

- [1] И. И. Воробьев, П. И. Зубков, Г. А. Кутузова, О. Я. Савченко, А. М. Трубачев и В. Г. Харитонов. *Задачи по физике*. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2008.
- [2] В. И. Феодосьев. *Сопротивление материалов*. Наука, 1986.
- [3] С. Г. Андреев и др. *Физика взрыва*. Наука, 2004.
- [4] И. Е. Иродов. *Волновые процессы*. Бином, 2015.
- [5] Д. В. Сивухин. *Общий курс физики. Механика*. Наука, 1979.
- [6] Ю. М. Волченко. *Научная графика на языке Asymptote*. 2018.
- [7] Charles Staats III. *Пособие по Asymptote*. 2022.