

УДК 539.42:620.172.254

620.17:620.18:669.14.018.298

## РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛИ ИМПУЛЬСИВНОМУ НАГРУЖЕНИЮ

В.М.Чертов

*Российская инженерная академия;  
129110 Москва Б.Переяславская, 15, оф. 45  
E-mail: chertovv@mail.ru*

Предложено заменить уравнение баланса энергии при сквозном пробитии преграды на более простое уравнение для проникновения ударника только на безопасную глубину. Влияние истинной прочности обнаруживается тогда в полной мере. Расчетные значения безопасной скорости непробития в определенных пределах соответствуют фактическим значениям. Осуществлен переход от расчетной модели к практической технологии. Наибольшее сопротивление конструкционной стали импульсивному нагружению соответствует оптимальному режиму термической обработки.

Определение связи статических и динамических свойств конструкционной стали до сих пор остается задачей, для которой, по-видимому, еще не найдено удовлетворительное решение. В общем виде – это зависимость сопротивления разрушению (или другой фундаментальной характеристики) от скорости деформации, учитывающая исходные механические свойства, определенные при квазистатическом нагружении. Задача усложняется тем, что, по достижении определенной скорости, кроме чисто механического воздействия, проявляется влияние волновой составляющей, включая отражение и интерференцию волн. Поэтому ряд предложенных решений весьма сложен и проверен для отдельных материалов и условий нагружения. Разнообразие условий – прочность и форма ударника, структура (свойства) и материал преграды, форма области деформации, условия эксперимента — вносит свой вклад в уравнение баланса энергии. При этом первостепенное значение имеет сопротивление динамическому нагружению. В работе [1] за критерий принято значение откольной прочности при скорости соударения ударника и преграды (мишени) 150-650 м/сек. В работе [2] определялось сопротивление сдвигу при 500 и 1000 м/сек. В работе [3], касающейся пулестойкости слоистых бронежилетов, определялась диссипация энергии удара и учитывались продольная и поперечная составляющие пластической деформации, а критерием сопротивления являлась предельная скорость непробития. В этих расчетах учитывалась энергия, расходуемая на выбивание и ускорение пробки и даже на разлет осколков. Найдено, что в этом случае сопротивление внедрению ударника стабилизируется при определенной входной скорости [4,5], а закономерность изменения показателей нарушается [6]. Поэтому в уравнении баланса энергии приходится учитывать массу ударника, плотность материала преграды, радиус ударника и пробки, толщину преграды, начальную скорость соударения, текущие скорости ударника и пробки, напряжения сдви-

га и перемещение пробки [2]. Для такого материала, как титановые сплавы, при определении откольной прочности в диапазоне скорости ударника 250-600 м/сек, обнаружено протекание фазовых превращений, инициируемых ударным нагружением, и обусловленное этими превращениями изменение откольной прочности [7]. Еще более сложная зависимость результатов от исходных условий при увеличении входной скорости до 2, 10 и 30 км/сек [8].

В нашем исследовании с целью приближения к достоверному результату, произведено ограничение исходных условий, влияющих на процесс соударения и деформации:

— принято, что ударник не деформируется, имея высокую прочность и цилиндрическую форму;

— преграда изготовлена из стали тип 30ХНМ средней прочности  $\sigma_b = 1000 \pm 100$  МПа/ с достаточно высокой пластичностью ( $\psi \geq 35$  %) и вязкостью ( $a_n^{+20} \geq 100$  Дж/см<sup>2</sup>;  $a_n^{+40} \geq 50$  Дж/см<sup>2</sup>);

— входная скорость ударника 500-1000 м/сек;

— глубина внедрения ударника ограничена (ее предельные значения соответствуют скорости, при которой еще не происходит сдвига пробки) и обозначена как "безопасная" глубина;

— входная скорость не превышает скорости звука в материале преграды, поэтому волновым фактором можно пренебречь (при этом подразумевается, что рост сопротивления преграды не сопровождается снижением вязкости до критического значения, соответствующего началу хрупкого разрушения);

— истинная прочность, с целью наибольшего приближения к условиям испытания, определялась при растяжении в жидком азоте гладких образцов  $\varnothing$  6 мм.

Иначе говоря, принятыми граничными условиями наложен запрет на достижение предельных растягивающих напряжений на обратной стороне преграды. В этих условиях кинетическая энергия ударника расходуется только на преодоление сопротивления сдвигу /или отрыву/ в узкой области по образующей вмятины.

Обозначим величины:

$S_n$ , МПа — истинная прочность материала преграды при растяжении в жидком азоте;

$G, H$  — вес ударника;  $D$ , мм — диаметр ударника;  $\delta$ , мм — толщина преграды;

$\beta$  — коэффициент безопасности;

$h = \beta \delta$ , мм — безопасная глубина внедрения ударника;

$V_n$ , м/сек — предельная - "безопасная" - скорость непробития;

$K_g$  — динамический коэффициент, учитывающий рост сопротивления преграды с увеличением скорости ;

$K_g S_n$ , МПа — динамическое сопротивление преграды;

$g$ , м/сек<sup>2</sup> — ускорение силы тяжести;

$\frac{\pi D^2}{4} \beta \delta$ , мм — площадь поверхности сдвига при "безопасной" глубине внедрения ударника.

Тогда уравнение баланса энергии выразится как

$$\frac{G v_n}{2g} = K_g S_x \frac{\pi D^2}{4} \beta \delta \quad \text{и} \quad V_n = \sqrt{g K_g S_x \frac{\pi D^2}{2G} \beta \delta} \quad \text{или} \quad V_n = A \sqrt{\frac{K_g S_x D^2 \delta}{G}},$$

где  $A = P \sqrt{\frac{\pi \beta g}{2}}$  — коэффициент учета соотношения размерностей входящих величин.

По результатам более чем 1500 измерений установлено, что для толщины преграды 30-100 мм значение  $\beta$  можно принять равным 0,45 /гомогенная горячекатанная сталь/.

Зависимость безопасной глубины внедрения ударника от остальных факторов такова:

$$h = \beta \delta = \frac{g K_g S_x \pi D^2}{2 G V_n^2},$$

$$h = B \frac{K_g S_x D^2}{G V_n^2}, \quad (1)$$

где  $B$  — результирующая постоянная, учитывающая также соотношение размерностей. Выражение (1) соответствует формуле, приведенной в работе [9]. Значения  $K_g$  определены расчетным путем по данным более чем 1000 испытаний (см. таблицу).

Т а б л и ц а. Динамический коэффициент для различной скорости ударника

$V_n$ , м/сек	500	600	700	800	900	1000
$K_g$	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,5

При испытании преград под различными углами растут значения предельной скорости непробития, соответствующей безопасной глубине вмятины. Соотношение безопасной глубины при испытании по нормали и под углом определяется из соотношения  $h_1 = h \sec \alpha$ , где  $\alpha$  — угол встречи.

Тогда

$$V_n = A \sqrt{\frac{K_g S_x D^2 \delta}{G} \sec \alpha} \quad (2)$$

и

$$h = B \frac{K_g S_x D^2}{G V_n^2 \sec \alpha}.$$

Следует указать, что в преграде, изготовленной методом литья, формируются по толщине три слоя с различной микроструктурой и четкой границей между ними. Наружный слой, примыкающий к песчаной форме или к кокилю, состоит из более тонких столбчатых кристаллитов повышенной прочности и пластичности. Слой, примыкающий к стержню, состоит из грубых столбчатых дендритов с пониженной прочностью и пластичностью. Центральная зона отливки образуется равноосными кристаллитами с промежуточными значениями механических свойств. Усредненную истинную прочность преграды можно, по нашим данным, принять как среднее значение

$$S_k = \frac{a S_k^n + b S_k^0 + c S_k^m}{3},$$

где  $a, b, c$  — относительная глубина зон отливки.

Пластическая деформация зон литой преграды сопровождается неоднозначным ростом истинной прочности: при критической степени деформации прочность, пластичность и работа разрушения при растяжении снижаются [10]. При скорости более 800 м/сек в литой преграде имеет место прохождение ударных волн и их интерференция на границах зон, что ведет к деформации, аналогичной деформации при обычном механическом воздействии. Это следует учитывать, вводя пониженный коэффициент порядка 0,7 для обратной зоны преграды. По данным более 200 измерений установлено, что для литой преграды коэффициент безопасности следует принять равным 0,4.

Расчетные значения  $V_n$ , определенные по формуле (2), сверены с данными более 1000 испытаний горячекатаных и литых преград под углами от 0 до 30°. Разница расчетных и фактических результатов не превышала  $\pm 5\%$ . При углах встречи более 31-35° фактические значения более чем на 10 % превышают расчетные, что указывает на рикошет ударника и необходимость повышения скорости для пробития преграды. Отмечено также, что при конической форме головной части ударника фактические значения  $V_n$  ниже расчетных вследствие изменений напряженного состояния при соударении и пробитии и механизма деформации. При испытании неравнопрочными ударниками фактические значения  $V_n$  завышены против расчетных.

Расчеты, проведенные для преград высокой прочности ( $\sigma_b > 1500$  МПа), показали пригодность формулы (2) и для этой ситуации. Опробовано применение метода расчета для случая кумулятивного воздействия; при этом следует учитывать, что безопасная глубина достигает 90% толщины преграды, пробоина имеет коническую форму, и кинетическую энергию струи с пестом приходится рассчитывать более сложным путем.

Проверена также возможность воздействия на уровень истинной прочности путем изменения режимов термической обработки. Определены параметры — температура и выдержка — лустенитизации перед закалкой, влияющие на кинетику превращения при охлаждении, и режимы отпуска. В итоге обозначены условия получения оптимальной структуры и наибольших значений истинной прочности [11], и показано, что имеется определенная зависимость предельной скорости непробития от режима термической обработки [12]. В качестве примера использования разработанной методики сошлемся на опыт разрешения загадки контузии Дантеса на дуэли с Пушкиным, позволившей утвердительно ответить на вопрос, была ли на Дантесе кольчуга [13].

Таким образом, построение расчета на определении максимальной безопасной скорости непробития показало, что зависимость этой скорости от глубины внедрения является параболической, а не линейной, как показано в работе [14]. Имеется также четкая зависимость скорости непробития от свойств материала преграды. Можно полагать, что отсутствие такой зависимости, согласно той же работе, объясняется неопределенностью уравнения баланса энергии в ситуации с вылетом пробки.

### Список литературы

1. С.А.Атрошенко и др. Особенности микромеханизмов высокоскоростного деформирования металлов // Сб. трудов XXXV семинара "Актуальные проблемы прочности". Псков. 1999. С. 85-86.

2. М.А.Соковиков. Автомодельные закономерности неустойчивости пластического сдвига при высокоскоростном ударе // То же издание. С. 435-439.
3. А.Г.Полушин. Расчетные модели некоторых комбинационных решений при обработке листовых материалов, реализуемых при ударном нагружении // Сб. тез. докл. науч. конф. М.: 1998. МГТУ им. Н.Э.Баумана. С. 278-279.
4. Музыченко В.П. и др. О возможности прогнозирования сопротивляемости металлических материалов пробивающему воздействию // Ж. прикл. мех. и техн. физ. 1984. № 5. С. 123-125.
5. Милейко С.Т. и др. Феноменологическая модель пробивания // То же издание. 1981. № 5. С. 140-142.
6. Наймарк О.Б. и др. О механизме адиабатического сдвига при высокоскоростном нагружении материалов // Матем. моделирование систем и процессов. 1995. № 3. С. 71-75.
7. Ю.И. Мещеряков и др. Откольная прочность и фазовые превращения в титановых сплавах при ударном нагружении // Сб. трудов XXXV семинара... С. 366-371.
8. С.А. Афанасьева и др. Влияние начальной пористости материала ударника на глубину проникновения // Матер. сем. "Металлические материалы и изделия из них под воздействием различных видов энергии". М.: 1999. ВИМИ. С. 15-16.
9. Д.Райнхарт, Д.Пирсон. Поведение материалов при импульсивном нагружении. М.: 1958. Иностр. Литература. 427 с.
10. В.М.Чертов. О свойствах литой конструкционной стали после предварительной деформации // Известия АН СССР. Металлы. 1968. № 5. С. 136-139.
11. Голованенко Ю.С. и др. Влияние структуры на сопротивление разрушению крупногабаритных деталей из стали 50ХНЗМ // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1981. № 5. С. 123-128.
12. В.М.Чертов. Превращения при закалке стали и ее стойкость при импульсивном нагружении // Сб. мат. 4 Собрания металлословов России. Пенза. 1998. Приволжск. Дом знаний. С. 29-31.
13. В. Чертов. Не спасла ли Дантеса кольчуга? // Технология металлов. 1999. № 7. С. 44-48.
14. Милейко С.Т. и др. Об одном случае пробивания // Проблемы прочности. 1979. № 12. С. 69-71.