

УДК 532.593

КРИТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКОЛЕ И ДИНАМИЧЕСКОМ РАЗРЫВЕ МЕТАЛЛОВ

Г. Г. Савенков

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-производственное предприятие “Краснознаменец”», 195043 Санкт-Петербург
E-mail: sog@hotmail.ru

Представлены результаты динамических испытаний на разрыв ряда металлов на составном стержне Гопкинсона и при ударно-волновом нагружении плоских образцов. Показано, что истинное сопротивление разрыву при скорости деформации $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ практически совпадает с откольной прочностью при более высоких скоростях деформации. Приведены результаты испытаний этих же металлов на составном стержне Гопкинсона в диапазоне температур $20 \div 350 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: откольная прочность, сопротивление разрыву, составной стержень Гопкинсона.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию прочности материалов в условиях ударно-волнового нагружения, и достигнутый определенный прогресс в общем понимании происходящих при этом физических процессов, в целом можно констатировать, что существуют проблемы корректного определения прочности металлов при откольном разрушении, сопоставимости получаемых результатов с результатами других видов динамических и квазистатических испытаний.

Основные и, как считается, наиболее достоверные результаты по определению откольной прочности получают с использованием методик, в основе которых лежит непрерывная регистрация скорости свободной поверхности образца (мишени) в условиях одномерной деформации. В акустическом приближении для идеального материала его откольная прочность (амплитуда σ_p растягивающих напряжений, действующих в сечении откола внутри образца) определяется по выражению [1]

$$\sigma_p = 0,5\rho_0 c_0 (V_0 - V_m), \quad (1)$$

где ρ_0 — начальная плотность материала; c_0 — объемная скорость звука; V_0 — максимальная скорость свободной поверхности; V_m — скорость свободной поверхности в первом минимуме зависимости $V(t)$; t — время.

В случае материалов с явными проявлениями упругопластических свойств как в падающих, так и в отраженных волнах в формулу (1) вносится поправка, связанная с определением разности скоростей $\Delta V = V_0 - V_m$, которая учитывает нагон лидирующей части откольного импульса, распространяющейся со скоростью продольной упругой волны c_l , разгрузочной частью падающего импульса сжатия, имеющей скорость $\approx c_0$:

$$\sigma_0 = 0,5\rho_0 c_0 (\Delta V + \delta V). \quad (2)$$

Различные виды соотношения для δV можно найти в работах [1–3].

Существующие в настоящее время модели откольного разрушения исходят из стадийности процесса откола. Большинство авторов рассматривают от двух до четырех стадий:

возникновение “взрывоподобным” образом множества одиночных микро- и мезотрещин; объединение их в группы (конечные кластеры); рост и смыкание кластеров в одну макротрещину (бесконечный кластер), проходящую через весь образец, и наконец полное разрушение образца на части (так называемое образование откольной “тарелочки”). Все стадии рассматриваются в зоне действия волны растяжения, но даже в случае ударной волны небольшой интенсивности существуют возможности образования микро- и мезодефектов, как параллельных ее фронту, так и перпендикулярных к нему размерами $l_{1,2} \geq 10^{-6}$ м (здесь l_1, l_2 — размеры перпендикулярного и параллельного дефектов соответственно). Это связано с тем, что, как показано в ряде работ (см., например, [4] и приведенную в ней библиографию), движение микро- мезопотоков частиц материала при его ударно-волновом нагружении обладает скоростной неоднородностью как в волне нагрузки, так и в волне разгрузки, т. е. кроме средней скорости частиц такое движение характеризуется дисперсией скорости и ее размахом. Вследствие такой скоростной неоднородности между соседними микро- (мезо) потоками при определенных условиях могут образовываться микро- (мезо) дефекты сдвигового типа [5]. Кроме того, как известно, в поле сжимающих напряжений и без скоростной неоднородности частиц происходит возникновение как трещин сдвига, так и трещин отрыва [6].

Таким образом, определяемая в этом случае откольная прочность по любой из формул (1), (2) является характеристикой не исходного материала, а материала с дефектной структурой.

Поэтому было бы целесообразно иметь либо альтернативный метод определения прочности материала при ударно-волновом нагружении, который позволил бы напрямую получить необходимую характеристику, либо сопоставимо-корреляционные связи между откольной прочностью и другими характеристиками динамической или статической прочности материалов.

В работе [7] впервые была предпринята попытка сопоставить откольную прочность и истинное сопротивление разрыву S_k материала. Имевшиеся на тот период данные (в основном литературные) позволили автору [7] сделать вывод о том, что σ_p превосходит S_k не более чем в два раза и что основное отличие в результатах связано с напряженно-деформированным состоянием (НДС) при отколе и в шейке образца при его растяжении: в первом случае достигается строго одномерная деформация, во втором случае одноосная нагрузка приводит к трехмерному НДС.

Однако деформация образца при его растяжении носит сложный характер, непрерывно трансформируется, и в большинстве случаев степень ее сосредоточения и градиент распределения оказываются настолько значительными, что приводят к резкому повышению истинных скоростей деформации и изменению НДС. На заключительном этапе растяжения деформация сосредоточивается около одного из сечений и перестает быть равномерной, что делает ее практически адекватной деформации в условиях откола. Кроме того, многочисленными экспериментами показано, что истинное сопротивление разрыву равно удвоенной величине сопротивления сдвигу [8], а этот факт полностью соответствует теоретическому определению откольной прочности.

Поэтому представляют интерес сравнительные испытания материалов на растяжение при скоростях деформации, близких к скоростям, достигаемым при ударно-волновом нагружении плоских образцов. Таким методом, позволяющим провести подобные испытания, на наш взгляд, является ударное растяжение образцов с помощью составного стержня Гопкинсона (ССГ). В настоящее время на этом стержне при скоростях деформации $\dot{\epsilon} \approx 10^4$ с⁻¹ можно определить характеристики: предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{д}}$, истинное сопротивление разрыву $S_k^{\text{д}}$, относительное удлинение δ и относительное сужение ψ .

Таблица 1

Марка металла	Стандартные механические характеристики	S_K^D , ГПа	σ_p , ГПа	$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-4}$, c^{-1}
Сталь марки Ст.4	$\sigma_{0,2} = 250$ МПа, $\sigma_B = 525$ МПа, $\delta_5 = 26$ %	1,72	1,87	3,75
Сталь 40X	$\sigma_{0,2} = 415$ МПа, $\sigma_B = 680$ МПа, $\delta_5 = 7,7$ %	1,5	1,6 1,72	3,6 8,2
Сталь 45	$\sigma_{0,2} = 330$ МПа, $\sigma_B = 610$ МПа, $\delta_5 = 24$ %	1,66	1,79 1,58	3,1 4,25
Сталь 12X18H10T	$\sigma_{0,2} = 350$ МПа, $\sigma_B = 560$ МПа, $\delta_5 = 56$ %	1,96	1,77 1,95 1,63	2,45 3,9 6,1
Сталь Сп.28	$\sigma_{0,2} = 540$ МПа, $\sigma_B = 745$ МПа, $\delta_5 = 23$ %	2,38	1,32 1,64 2,22 2,80*	1,35 3,5 4,25 5,5
Сталь 30XH4M	$\sigma_{0,2} = 925$ МПа, $\sigma_B = 1310$ МПа, $\delta_5 = 22$ %	2,23	2,06 2,21 2,98*	4,8 5,5 6,6
Сплав ХН75ВМЮ	$\sigma_{0,2} = 890$ МПа, $\sigma_B = 1385$ МПа, $\delta_5 = 45$ %	2,52	2,6 2,58 3,43*	3,85 5,25 7,1
Медь марки М2	$\sigma_{0,2} = 140$ МПа, $\sigma_B = 220$ МПа, $\delta_5 = 58$ %	0,93	0,87 1,22 1,03	1,88 3,68 5,22
Титановый сплав ВТ6-С	$\sigma_{0,2} = 650$ МПа, $\sigma_B = 745$ МПа, $\delta_5 = 16$ %	1,14	1,31	2,97

Примечания: 1. Погрешность определения напряжений составляла не более 7 % при доверительной вероятности 0,95.

2. Звездочкой отмечены значения σ_p при образовании откольной тарелочки.

Таблица 2

Марка металла	S_K^D , ГПа			
	$T = 20$ °C	$T = 150$ °C	$T = 250$ °C	$T = 350$ °C
Сталь Ст.4	$1,72 \pm 0,062$	$1,61 \pm 0,049$	$1,485 \pm 0,043$	$1,35 \pm 0,052$
Сталь 40X	$1,5 \pm 0,064$	$1,45 \pm 0,061$	$1,31 \pm 0,071$	$1,2 \pm 0,059$
Сталь 45	$1,66 \pm 0,038$	$1,54 \pm 0,049$	$1,48 \pm 0,025$	$1,41 \pm 0,044$
Сталь 12X18H10T	$1,956 \pm 0,082$	$1,45 \pm 0,056$	$1,21 \pm 0,039$	$1,1 \pm 0,07$
Сталь Сп.28	$2,38 \pm 0,071$	$2,38 \pm 0,068$	$2,374 \pm 0,074$	$2,28 \pm 0,092$
Сталь 30XH4M	$2,23 \pm 0,058$	$2,21 \pm 0,061$	$2,18 \pm 0,052$	$2,0 \pm 0,069$
Медь М2	$0,925 \pm 0,031$	$0,929 \pm 0,025$	$0,619 \pm 0,009$	$0,468 \pm 0,028$
Сплав ВТ6-С	$1,14 \pm 0,063$	$1,13 \pm 0,057$	$1,12 \pm 0,064$	$1,08 \pm 0,068$

В настоящей работе испытания на ССГ (диаметр стержней 18 мм) проводили при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Большое значение имеет выбор размеров образца, в частности длины его рабочей (расчетной) части (l_0). Как известно, абсолютное удлинение образца после разрыва состоит из суммы двух удлинений: $\Delta l_{\text{в}}$ — абсолютного равномерного удлинения и $\Delta l_{\text{у}}$ — абсолютного сосредоточенного удлинения, т. е. $\Delta l_{\text{к}} = \Delta l_{\text{в}} + \Delta l_{\text{у}}$. Поскольку для рассматриваемых в работе экспериментов интерес представляет только сосредоточенное удлинение $\Delta l_{\text{у}}$, которое распределяется обычно на ограниченной части образца в полтора-два его диаметра (d_0) сечения [8], в качестве рабочей части использовался укороченный образец с $l_0/d_0 = 2,0$.

Испытания по определению откольной прочности $\sigma_{\text{р}}$ проводили на пневматической пушке калибром 37 мм. Образцы представляли собой диски диаметром 52 мм и толщиной 5–10 мм. Скорость свободной поверхности регистрировалась лазерным дифференциальным интерферометром. Методика эксперимента изложена, например, в [4].

Анализ приведенных в табл. 1 значений $\sigma_{\text{р}}$, рассчитанных по формуле (1), и значений $S_{\text{к}}^{\text{д}}$ показывает, что истинное сопротивление разрыву при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ практически совпадает с откольной прочностью при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$. Этот вывод еще раз подтверждает отмеченную важность учета сжатия материала при ударно-волновом нагружении.

В работе [9] сравнение экспериментальных данных и теоретических моделей, где процесс сжатия не учитывался, показало большую скорость и резкость реального процесса откольного разрушения. При описании экспериментальных данных авторы работы использовали экспоненциальную зависимость скорости накопления микротрещин от их объемной концентрации.

В целом можно констатировать, что откольная прочность материалов определяется соотношением (1), поправка в (2) нивелируется уменьшением параметров, входящих в это соотношение, за счет образования системы дефектов на этапе сжатия. Кроме того, следует отметить, что откольная прочность малочувствительна к скорости деформации и совпадает с истинным сопротивлением разрыву материалов при ударном растяжении на установке ССГ.

Представляло интерес проверить влияние начальной температуры образца на $S_{\text{к}}^{\text{д}}$ и тем самым на $\sigma_{\text{р}}$. Соответствующие результаты приведены в табл. 2. Для большинства испытанных металлов с увеличением начальной температуры $S_{\text{к}}^{\text{д}}$ уменьшается незначительно, а для стали 12Х18Н10Т и меди марки М2 — довольно значительно. Следует остановиться на феномене стали 12Х18Н10Т. Формально эта сталь относится к классу средних жаропрочных сталей, однако, как видно из табл. 2, при температуре $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит резкое уменьшение $S_{\text{к}}^{\text{д}}$. Дальнейшее увеличение температуры приводит к не столь значительному уменьшению этой характеристики. В целом это не противоречит данным других авторов. Так, в [10] приводятся результаты для стали 12Х18Н9Т (с тем же содержанием хрома ($\approx 18 \%$), который определяет жаропрочность сталей данного типа) при скорости деформации 90 с^{-1} , из которых видно, что уменьшение $\sigma_{\text{в}}$ с ростом температуры превышает 50 %. Аналогичные результаты имеются и для результатов статических испытаний. Эффект же снижения прочности в диапазоне $150 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ подлежит дальнейшему изучению.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Разрушение** разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. Саров: Всероссий. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2001.
2. **Степанов Г. В.** Уругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. Киев: Наук. думка, 1991.

3. **Канель Г. И.** Искажение волновых профилей при отколе в упругопластическом теле // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 2. С. 194–198.
4. **Баракхин Б. К., Мещеряков Ю. И., Савенков Г. Г.** Динамические и фрактальные свойства стали Сп.28 в условиях высокоскоростного нагружения // Журн. техн. физики. 1998. № 10. С. 43–52.
5. **Мещеряков Ю. И., Савенков Г. Г.** Трещиностойкость материалов в условиях динамического нагружения // ПМТФ. 1993. № 3. С. 138–142.
6. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
7. **Канель Г. И.** Сопротивление металлов откольному разрушению // Физика горения и взрыва. 1982. № 3. С. 77–84.
8. **Шапошников Н. А.** Механические испытания металлов. М.; Л.: Машгиз, 1951.
9. **Канель Г. И., Черных Л. Г.** О процессе откольного разрушения // ПМТФ. 1980. № 6. С. 78–84.
10. **Полухин П. И., Гунн Г. Я., Галкин А. М.** Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.

*Поступила в редакцию 23/III 2004 г.,
в окончательном варианте — 28/II 2005 г.*
