

модели частично пропускающего нестационарного поршня, составляя $25 < t < 65$ мкс в этом случае.

Таким образом, интерферометрические исследования УВ, образованной при генерации сверхзвуковых потоков плазмы в воздухе, позволили раскрыть особенности ее движения и взаимодействия с плазменным потоком, а также определить параметры среды, в которую истекает плазма.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Бурмаков, Г. М. Новик. ЖТФ, 1981, 51, 1, 68.
2. А. А. Коньков, А. П. Соколов. Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1977, 4, 167.
3. D. Apostol, I. Apostol, E. Cojocaru. J. Appl. Phys., 1980, 51, 2, 1238.
4. A. P. Burmakov, A. A. Labuda. Proc. of the XV Internat. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Invited Papers. M.: VINITI. 1981.
5. М. А. Ельяшевич, А. А. Лабуда, Л. Я. Минько и др. Докл. АН БССР, 1972, 16, 2, 115.
6. А. П. Бурмаков, В. А. Зайков, А. В. Колесник и др. ЖПС, 1982, 37, 3, 368.
7. Л. Я. Минько. Получение и исследование импульсных плазменных потоков. Минск: Наука и техника, 1970.
8. Н. Н. Кочина, Н. С. Мельникова. ПММ, 1958, 22, 4, 444.
9. Д. Е. Охочимский, И. Л. Кондрашева, З. П. Власова и др.— В кн.: Тр. Матем. ин-та им. В. А. Стеклова АН СССР. Т. 50. М., 1957.

Поступила в редакцию 20/XI 1984,
после доработки — 12/III 1985

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ И УДЕЛЬНАЯ РАБОТА ОТРЫВА ПРИ ОТКОЛЕ РЯДА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

*О. А. Клещевников, Ю. Н. Тюняев, В. Н. Софронов,
В. А. Огородников, А. Г. Иванов, В. Н. Минеев*

(Москва)

Создание надежных конструкций, работающих при интенсивных динамических нагрузках, часто обусловлено знанием откольной прочности конструкционных материалов. Наиболее распространенные теории (критерии) откольного разрушения рассматривают его как отделение части материала путем слияния отдельных независимо развивающихся трещин в одну трещину разрыва по достижении критических значений: растягивающего напряжения $\sigma_{кр}$ или $\sigma_{кр}$ и времени пребывания τ материала под действием растягивающих напряжений, или энергии упругой деформации E объема, охваченного волной растяжения¹. Значения параметров откольной прочности находятся из расчетов течения материала при начальных условиях, взятых из эксперимента. Вследствие использования в расчетах оценочных данных о динамической зависимости напряжение — деформация (важнейшая точка — динамический предел текучести σ_s) и неконтролируемости критических условий откольного разрушения значительная часть данных об откольной прочности материалов носит качественный характер. Действительно, приводимые в литературе значения откольной прочности $\sigma_{отк}$ для одних и тех же материалов по данным разных авторов, полученные в близких условиях нагружения, отличаются более чем на порядок [2]. Эти различия связаны как с методами определения $\sigma_{отк}$, так и с технологией изготовления

¹ Часть работ (например, [1]) рассматривает и описывает откольное разрушение как непрерывный процесс накопления повреждений, качественно тождественный для любого момента времени вплоть до полной потери сплошности материалом. Обладая несомненными достоинствами в описании кинетики разрушения на микроуровне, такой подход по существу отрицает явление макроразрушения.

и последующей обработки материалов. Причины разброса в значениях откольной прочности, связанные с методами ее определения, обсуждены в [2].

Обратимся к результатам влияния технологии изготовления материалов и их термической обработки на величину $\sigma_{отк}$.

В [3] приведены результаты исследования влияния микроструктуры меди марки МО на откольную прочность. Показано, что удельная работа отрыва при отколе для образцов из партии мелкозернистой меди (размер зерна 60—70 мкм) составляет 5 Дж/см², а для крупнозернистой меди (размер зерна 250—350 мкм) — 3 Дж/см². Эти результаты находятся в согласии с выводами [4] об охрупчивании металлов при увеличении размеров зерна и снижении их прочности.

Известно [4, 5], что наличие в материалах волокнистой структуры и связанное с этим направленное расположение скопления включений, обуславливают зарождение и первоначальное развитие откольного разрушения именно по этим направлениям. Отсюда должен следовать вывод о влиянии на откольную прочность направления технологической прокатки.

В [6] показано, что предварительная статическая деформация листового алюминиевого сплава 6061 на 2,5—3% привела к снижению критического уровня напряжений, соответствующего зарождению в материале повреждений с характерными размерами ≥ 1 мкм, на 20—30%. В то же время для листового и пруткового материалов (направление приложения нагрузки перпендикулярно и вдоль технологической прокатки соответственно) разницы в критических уровнях прикладываемых напряжений не обнаружено. В [7] для сплава 6061-T6 также не замечено разницы в критических уровнях прикладываемых напряжений для образцов из листового и пруткового материалов. Однако при исследовании сплава АМГ-6 в [8] достаточно убедительно показано, что критические уровни нагружения, соответствующие зарождению в материале повреждений и макроскопическому расслоению материала, для образцов из прутка в 1,4—1,7 раза больше, чем из листового материала.

Выяснение влияния термообработки на условия откольного разрушения в [9] проведено на образцах из прутка меди М1, которые подвергались предварительному отжигу в течение 1 ч при температуре 600°C, а затем охлаждались в воде. Из результатов эксперимента следует, что критические значения растягивающих напряжений при отколе для образцов в состоянии заводской поставки уменьшились после отжига на 11%. Предварительный отжиг образцов из сплава 6061-T6 по данным [7] привел к снижению критического уровня напряжений примерно на 30%.

В [10] исследовано влияние предварительной термообработки образцов из стали 40X на величину откольной прочности. Образцы подвергались предварительному отжигу при 830—850°C или закалке с 840—860°C до твердости HRC = 20 ÷ 55. Установлено, что ударно-волновое нагружение с интенсивностью ударной волны 3—6,5 ГПа приводит к упрочнению стали 40X не только в отожженном, но и в термически упрочненном состоянии. Эти выводы согласуются с результатами, полученными ранее на образцах из стали 4340 [11] и 40X [12, 13].

Из изложенного следует, что имеющиеся данные по затронутым вопросам противоречивы и требуется проведение дальнейших исследований с привлечением более широкого класса материалов.

В настоящей работе для сталей 30ХГСА, ЭИ712, 12Х18Н10Т и 36НХТЮ² экспериментально-расчетными методами определены удельная работа динамического отрыва при отколе λ , динамический предел текучести σ_s , максимальное значение растягивающего напряжения $\sigma_{кр}$, время действия растягивающих напряжений в плоскости откола τ и по-

² Несмотря на широкое применение перечисленных сталей в конструкциях, подвергающихся интенсивным динамическим нагрузкам, данные по их динамической прочности практически отсутствуют.

казано влияние статического предела текучести $\sigma_{0,2}$ и направления действия растягивающих напряжений относительно направления технологической прокатки (параллельно \parallel , перпендикулярно \perp) на величины $\sigma_{кр}$, σ_s , λ . Величина $\sigma_{0,2}$ варьировалась с помощью термообработки.

Значение λ определялось как величина, лежащая в интервале $E_1 - E_2$, где E_1 — максимальная упругая энергия, при которой материал еще не разрушается, а E_2 — минимальная величина ее, при которой материал уже разрушен.

Материал считался разрушенным при полном отделении откольного слоя. В экспериментах осуществлялось плоское соударение движущегося диска-ударника толщиной $h = 5$ мм с неподвижным образцом-мишенью толщиной 10 мм [3]. Ударник разгонялся в баллистической ударной трубе. Диски-мишени вырезались из листа либо из прутка. Экспериментально находились скорость ударника перед соударением W_0 , скачок скорости свободной поверхности мишени при выходе на нее упругого предвестника $W_{упр}$ и профиль скорости свободной поверхности мишени $W(t)$. Величина W_0 измерялась контактно-осциллографическим методом (максимальная относительная погрешность измерения $\pm 2\%$), а $W_{упр}$ и $W(t)$ — методом емкостного датчика (максимальная относительная погрешность измерения $\pm 10\%$).

В сериях из 5—7 опытов с последовательно увеличивающимся значением W_0 для каждой стали найдены интервалы W_0 , в которых происходило разрушение мишени. Отделение откольного слоя контролировалось после мягкого торможения и записи зависимости $W(t)$. Полученные интервалы W_0 с точностью $\pm 10\%$ определяют минимальные (критические) скорости плоского соударения W_0^* , при которых происходит откольное разрушение.

Динамические пределы текучести вычислялись по известной формуле

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{1-2\nu}{1-\nu} \rho c W_{упр},$$

где ρ — плотность; c — скорость продольных звуковых волн; ν — коэффициент Пуассона. Для нахождения E_1 и E_2 проводились расчеты на ЭВМ упругопластического течения материала мишеней в плоском одномерном случае [14], в которых использовались экспериментальные значения σ_s и граничные значения интервала для W_0^* . Получены зависимости $p(x, t)$ (нормальная к фронту волны компонента давления), $W(t)$ и $E(x, t)$. Принимались $E = E_1$ или $E = E_2$, если использовалась нижняя или верхняя граница W_0^* . Поскольку вычисления проводились по уравнению течения сплошной среды (без отколов), то ясно, что значения E_2 есть абсолютные верхние оценки λ .

$\sigma_{кр}$ и τ оценивались тремя методами:

1) по формуле теории упругости

$$\sigma_{кр} = \frac{1}{2} \rho c W_0, \quad (1)$$

$$\tau = 2h/c;$$

2) из численных расчетов $\sigma(x, t)$ в плоскости откола ($x = \delta$) по методу [14]. Поскольку, по определению, разрушение наступает при $\sigma(t) = \sigma_{кр}$, то для расчета $\sigma_{кр}$ и τ необходимо использовать верхнюю границу W_0^* («гарантированное» разрушение материала). В силу отмеченной выше специфики машинных расчетов по уравнениям механики сплошной среды, найденные значения $\sigma_{кр}$ и τ будут, очевидно, завышенными. Корректность проведенных расчетов на фазе сжатия материала подтверждается совпадением расчетных и экспериментальных зависимостей $W(t)$, включая упругий предвестник;

3) по профилю $W(t)$ как

$$\sigma_{кр} = 0,5\rho c_0 \Delta W, \quad (2)$$

где c_0 — объемная скорость звука; ΔW — разница между максимальной

Материал	Направление растяжения	$\sigma_{0,2}$ кг/мм ²	σ_s кг/мм	W^* м/с	E_1 Дж/см ²	E_2 Дж/см ²	$\sigma_{кр}$, кг/мм ²			τ , мкс
							по форм. (1)	числ. счет	по форм. (2)	
30ХГСА	⊥ *	23,9	88,7	160—172	7,8	9,4	390	285	140	1,7
	⊥ **	82,0	98,0	220—238	15,4	21,4	535	410	195	1,7
	*	41,0	94,9	230—245	19,5	21,7	555	520	275	1,8
ЭИ712	**	143,0	107,0	322—332	38,5	46,9	760	540	385	1,8
		74,0	81,0	240—260	17,0	26,0	580	400	255	1,6
		111,0	80,5	210—230	15,1	19,0	515	420	265	1,75
12Х18Н10Т	⊥	32,0	59,0	285—310	38,2	47,0	695	520	285	1,8
36НХТЮ		97,0	112,0	268—310	14,1	22,0	675	—	475	1,75

* Образцы с HRC = 21÷23.
** Образцы с HRC = 35÷36.

скоростью свободной поверхности и значением W перед фронтом откольного импульса с учетом поправки на разницу скоростей падающей волны и откольного импульса [2]. Экспериментальные зависимости $W(t)$, по которым определялись $\sigma_{кр}$ и τ , получены в опытах, где откольная пластина отделялась полностью, что соответствует верхним оценкам искомых величин.

Результаты экспериментов и расчетов сведены в таблицу. Для W_0^* указаны интервалы возможных значений. Полное время действия растягивающих напряжений τ определено по экспериментальной зависимости $W(t)$ и практически совпадает с удвоенным временем пробега звуковой волны по толщине откольной пластины.

Из таблицы видно, что для сталей с относительно низким пределом текучести ($\sigma_{0,2} \leq 100$ кг/мм²) $\sigma_s > \sigma_{0,2}$, что согласуется с литературными данными [15]. Однако для некоторых высокопрочных в исходном состоянии сталей ($\sigma_{0,2} \geq 110$ кг/мм²) $\sigma_s < \sigma_{0,2}$. Ранее подобные результаты получены для высокопрочной стали ШХ15 [16] и алюминиевого сплава 2024 [17]. Слабая чувствительность или даже отсутствие зависимости предела текучести от скорости деформирования в высокопрочных материалах обусловлена, по-видимому, низкими барьерами Пайерлса в этих материалах³, т. е. в высокопрочных материалах сопротивление пластическому течению при высоких скоростях деформирования обусловлено только сопротивлением надбарьерному движению дислокаций. Последнее при высоких действующих на дислокации напряжениях (большие скорости деформации) может стать меньше напряжения старта дислокаций ($\sigma_{0,2}$).

Относительно приведенных в таблице значений $\sigma_{кр}$ можно заметить следующее. Теория упругости, не учитывая реальную форму и затухание импульса сжатия, приводит к явно завышенным значениям $\sigma_{кр}$. Большим реализмом обладают оценки $\sigma_{кр}$, основанные на машинных расчетах упругопластического течения сплошной среды при использовании критических значений параметров откола из эксперимента. Однако подобные расчеты для неконтролируемых условий опыта могут привести к неоправданно большим значениям $\sigma_{кр}$ [9]. На это указывает сравнение результатов машинного счета и полученных из обработки экспериментальных зависимостей $W(t)$, которые оказались почти вдвое меньше численных значений $\sigma_{кр}$. Следует заметить, что $\sigma_{кр}$, определенные по экспериментальным зависимостям $W(t)$, например, для стали 12Х18Н10Т вполне удовлетворительно согласуются с данными [2], где использовался аналогичный метод. Учитывая возможность релаксации напряжений при появлении и развитии очагов разрушения в плоскости откола и условия полного отделения

³ Известно, что величина σ_s , зависящая от скорости деформации, связана с преодолением дислокациями барьеров Пайерлса [18].

откольной пластины в настоящих экспериментах, определенные по зависимости $W(t)$ значения $\sigma_{кр}$ следует считать, по-видимому, оценкой сверху.

В заключение отметим, что из приведенных в таблице данных следует, что динамическая прочность анизотропного материала, характеризующаяся σ_s , λ (или W_0), может быть изменена за счет статического предела текучести $\sigma_{0,2}$ путем термообработки, либо статическая ($\sigma_{0,2}$) и динамическая прочности могут быть изменены путем определенной ориентации материала относительно направления действия растягивающих напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Davison, A. L. Stevens. J. Appl. Phys., 1972, 43, 3, 988.
2. Г. И. Канель. ФГВ. 1982, 18, 3, 77.
3. О. А. Клещевников, В. Н. Софронов и др. ЖТФ, 1977, 47, 8, 1791.
4. П. И. Полухин, С. С. Горечник, В. К. Воронцов. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982.
5. В. К. Голубев, С. А. Новиков и др. Проблемы прочности, 1983, 2, 53.
6. D. W. Blincow, D. V. Keller. ASTM Spec. Techn. Publ., 1962, 336, 252.
7. V. M. Butcher.— In: Behaviour of Dense Media under High Dynamic Pressures. N. Y.: Gordon and Breach, 1968.
8. Б. А. Тарасов. Проблемы прочности, 1974, 3, 121.
9. В. К. Голубев, С. А. Новиков и др. ПМТФ, 1980, 4, 136.
10. В. К. Голубев, С. А. Новиков и др. Проблемы прочности, 1984, 4, 41.
11. V. M. Butcher. J. Appl. Mech., 1967, 34, 1, 209.
12. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1966, 21, 4, 608.
13. М. А. Иванов.— В кн.: Механика взрывных процессов. Вып. 29. Новосибирск, 1977.
14. М. Л. Уилкинс. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
15. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Сеницын. ФТТ, 1963, 5, 1, 269.
16. Ю. Я. Волощенко-Климовицкий. Динамический предел текучести. М.: Наука, 1965.
17. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
18. P. G. Davis, S. J. Mäidji. Tr. Amer. общ-ва инж.-механиков, 1975, 2, 58.
19. С. А. Новиков, А. В. Чернов. ПМТФ, 1977, 2, 143.

Поступила в редакцию 21/II 1985,
после доработки — 26/VII 1985

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И СЖИМАЕМОСТЬ СЕРЫ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

*В. И. Постнов, Л. А. Апаньева, А. Н. Дремин,
С. С. Набагов, В. В. Якушев
(Черноголовка)*

Большое внимание в физике высоких давлений уделяется исследованию перехода диэлектриков в металлическое состояние при сильном сжатии [1—5]. Одним из объектов, на примере которого изучался переход диэлектрик — металл, является элементарная сера. Возможность перехода серы в металлическое состояние показана в [6] на основании экстраполяции в область высоких давлений зависимости сдвига края полосы поглощения от плотности. В дальнейшем эта возможность проверялась непосредственным измерением электрического сопротивления образцов под давлением. Исследования проводились не только при статическом сжатии [7—11], но и при ударно-волновом нагружении [12—16]. Однако данные, полученные в условиях динамического воздействия, носят слишком разрозненный характер.

Настоящая работа посвящена измерению электропроводности и сжимаемости орторомбической серы в широком диапазоне динамических давлений (4—34 ГПа) с целью выявления особенностей ее перехода в высокопроводящее состояние.

Используемые в опытах образцы отливали из серы полупроводниковой чистоты ОСЧ 16-5. В зависимости от величины удельного сопротивления ρ эксперименты проводили на двух типах ячеек. Ячейка для