

ПРОЧНОСТЬ НЕКОТОРЫХ МАРОК СТАЛИ И АРМКО-ЖЕЛЕЗА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ СЖАТИИ И РАЗГРУЗКЕ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ $2 \div 200$ ГПа

В. А. Огородников, Е. Ю. Боровкова, С. В. Ерунов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Представлены результаты сравнительного экспериментального исследования динамической прочности в условиях ударно-волнового сжатия и растяжения (откола) образцов сталей Ст. 20 и 09Г2С при давлении на фронте ударной волны $1 \div 5$ ГПа и скорости деформации $10^3 \div 10^4$ с⁻¹, представляющих интерес в качестве конструкционных материалов для силовых корпусов взрывозащитных камер. Проведен сравнительный анализ полученных и имеющихся результатов по динамическому пределу текучести и откольной прочности сталей Ст. 3, Ст. 20, 09Г2С, 12Х18Н10Т, ЭИ712, 30ХГСА, 36НХТЮ, ХВГ, 35ХЗНМ и армко-железа, значения прочности и пластичности которых в статических условиях нагружения отличаются до пяти раз. Приведены результаты экспериментов по взрывному нагружению шаров из сталей Ст. 3, Ст. 20, 12Х18Н10Т и 30ХГСА с заметно отличающимися прочностью и пластичностью, квазисферической сходящейся ударной волной, давление в которой вблизи центра 200 ГПа и скорость деформации 10^5 с⁻¹.

Ключевые слова: прочность, пластичность, сталь, ударная волна, сжатие, разгрузка.

В задачах, связанных с созданием взрывостойких конструкций для хранения и транспортировки объектов, содержащих токсичные, радиоактивные и взрывчатые материалы, или проведения в них испытаний, особенно важно знать поведение прочности материалов этих конструкций, в частности сталей различных марок, в широком диапазоне изменения действующих на них давлений ($p = 1 \div 10$ ГПа) при скоростях деформации материала $\dot{\epsilon} = 10^3 \div 10^5$ с⁻¹ [1, 2]. Кроме того, существует проблема углубленного изучения процессов разрушения, фрагментации и диспергирования материалов под действием динамических нагрузок интенсивностью $p = 50 \div 200$ ГПа при $\dot{\epsilon} = 10^4 \div 10^6$ с⁻¹ [3, 4].

Наибольший интерес с точки зрения численного моделирования этих процессов представляют данные по динамическому пределу текучести (Y) и откольной прочности (σ_p), характеризующие сопротивление деформации материала при высокоскоростных сжатии и растяжении [5, 6]. В связи с этим в настоящей работе систематизированы имеющиеся и получены новые результаты по определению величин Y и σ_p некоторых марок стали (Ст. 3, Ст. 20, 09Г2С, 12Х18Н10Т, ЭИ712, 30ХГСА, 36НХТЮ, ХВГ, 35ХЗНМ) и армко-

железа. Статические характеристики исследуемых марок сталей (предел текучести σ_T , предел прочности σ_B , пластичность δ) приведены в табл. 1. При определении динамической прочности (Y , σ_p) в ряде случаев учитывали технологию изготовления и последующую термомеханическую обработку материала, направление действия нагрузок относительно выделенной в материале текстуры (параллельно (\parallel) и перпендикулярно (\perp) направлению прокат-

Таблица 1

Материал	σ_T , ГПа	σ_B , ГПа	δ , %
Армко-железо	0,25	0,38	52
Ст. 3	0,24	0,37	22
Ст. 20	0,25	0,48	26
09Г2С	0,35	0,46	21
12Х18Н10Т	0,34	0,52	52
ЭИ712	0,64	0,81	22
30ХГСА	0,94	1,10	10
36НХТЮ	0,97	1,12	16
ХВГ	—	1,30	—
35ХЗНМ	1,48	1,70	11

ки), объем исследуемого материала или масштабный фактор.

В дальнейшем эти данные использовали при выборе различных марок стали с заметно отличающимися прочностными и деформационными характеристиками. Эксперименты по взрывному нагружению шаров из таких материалов проводили с целью установления влияния амплитуды давления в ударной волне (УВ) $p \approx 200$ ГПа на динамическую прочность, которую оценивали по размеру образующейся полости после разгрузки шаров [7, 8]. Согласно существующим представлениям с увеличением давления в УВ до $100 \div 300$ ГПа различия в динамической прочности материалов нивелируются из-за теплового разогрева [9]. Обычно в таких исследованиях в качестве материалов с различной прочностью использовали металлы с заметно отличающимися физико-механическими характеристиками, например, алюминий, свинец, медь, сталь [10, 11]. Из-за различной сжимаемости этих материалов такой подход не совсем корректен. В данной работе для исследования возможного влияния давления на фронте УВ $p \lesssim 200$ ГПа, предшествующей растяжению материала, на прочность, оцениваемую по размеру образующейся в центре шара полости, использовали марки стали с минимальными, промежуточными и максимальными прочностными характеристиками, значения которых различались до 5 раз в области давлений на фронте УВ $p \leq 10$ ГПа.

Экспериментальные данные по определению величин Y и σ_p , полученные с использованием профилей скорости свободной поверхности ударно-нагруженных образцов $W(t)$, для армко-железа и ряда марок стали опубликованы в [12–16]. Остановимся на результатах, полученных в последнее время для Ст. 20 и 09Г2С. Эти марки стали представляют практический интерес при изготовлении силовых оболочек взрывозащитных камер большого размера. Исследуемые образцы изготавливали в виде диска с осью, ориентированной в поперечном и продольном направлениях относительно выделенной в материале текстуры. Опыты, как и [12–16], проводили в одинаковой постановке. Исследуемые образцы диаметром 50 мм запрессовывали в обойму из стали Ст. 3 с наружным диаметром 95 мм и толщиной, равной толщине образца $h_m = 5, 10, 20$ мм. Такие мишени устанавливали в посадочном месте ствола баллистической ударной

трубы БУТ-76 [17] и нагружали ударниками из стали Ст. 3 диаметром 75 мм и толщиной 2,5, 5, 10 мм соответственно. Ударники закрепляли на снарядах, которые разгоняли энергией сжатого воздуха в вакуумированном стволе БУТ-76. При выбранных толщинах ударника и мишени создавали режим одномерного сжатия и последующего растяжения исследуемого материала. Для каждой пары ударник — мишень проводили серии опытов, в которых скорость ударника W_0 изменяли таким образом, чтобы реализовались следующие условия разрушения образцов в мишени: А — отсутствие зародышей разрушения; Б — появление отдельных зародышей разрушения в виде микропор или микротрещин; В — слияние зародышей разрушения в магистральную трещину; Г — разделение образца на части. Скорость ударников измеряли в каждом опыте с погрешностью не хуже $\pm 0,1$ %. Мишень с образцом после нагружения сохраняли, тормозя ее в малоплотной среде (полиэтиленовая стружка), после чего разрезали и проводили металлографический анализ состояния образца в продольном сечении. В каждом опыте емкостным датчиком [18] диаметром 10 мм регистрировали профиль скорости свободной поверхности $W(t)$ образцов. Неподвижной обкладкой датчика служил диск из малоплотного пенопласта ($\rho_0 \approx 0,15$ г/см³) толщиной 7 мм, на поверхность которого наносили в качестве электрода слой меди толщиной несколько десятков микрометров. Столкновение образцов из стали с такой подложкой при скоростях $\approx 100 \div 300$ м/с не приводило к заметным необратимым изменениям в структуре их материала. По профилю $W(t)$ определяли динамический предел текучести, откольную прочность и скорость деформации исследуемого материала:

$$Y = 0,5 \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \rho_0 c_l W_{\text{упр}},$$

$$\sigma_p = 0,5 \rho_0 c_0 (W_1 - W_2 + \delta W), \quad \dot{\epsilon} = \frac{\partial W_1}{\partial t} / 2c_0,$$

где ρ_0 , c_l , c_0 , ν — плотность, продольная и объемная скорости звука и коэффициент Пуассона; $W_{\text{упр}}$, W_1 , W_2 — скорость свободной поверхности на упругом предвестнике, в первых максимуме и минимуме на профиле $W(t)$, δW — упругопластическая поправка [19].

На рис. 1, а–г представлены фотографии микрошлифов продольного сечения образцов

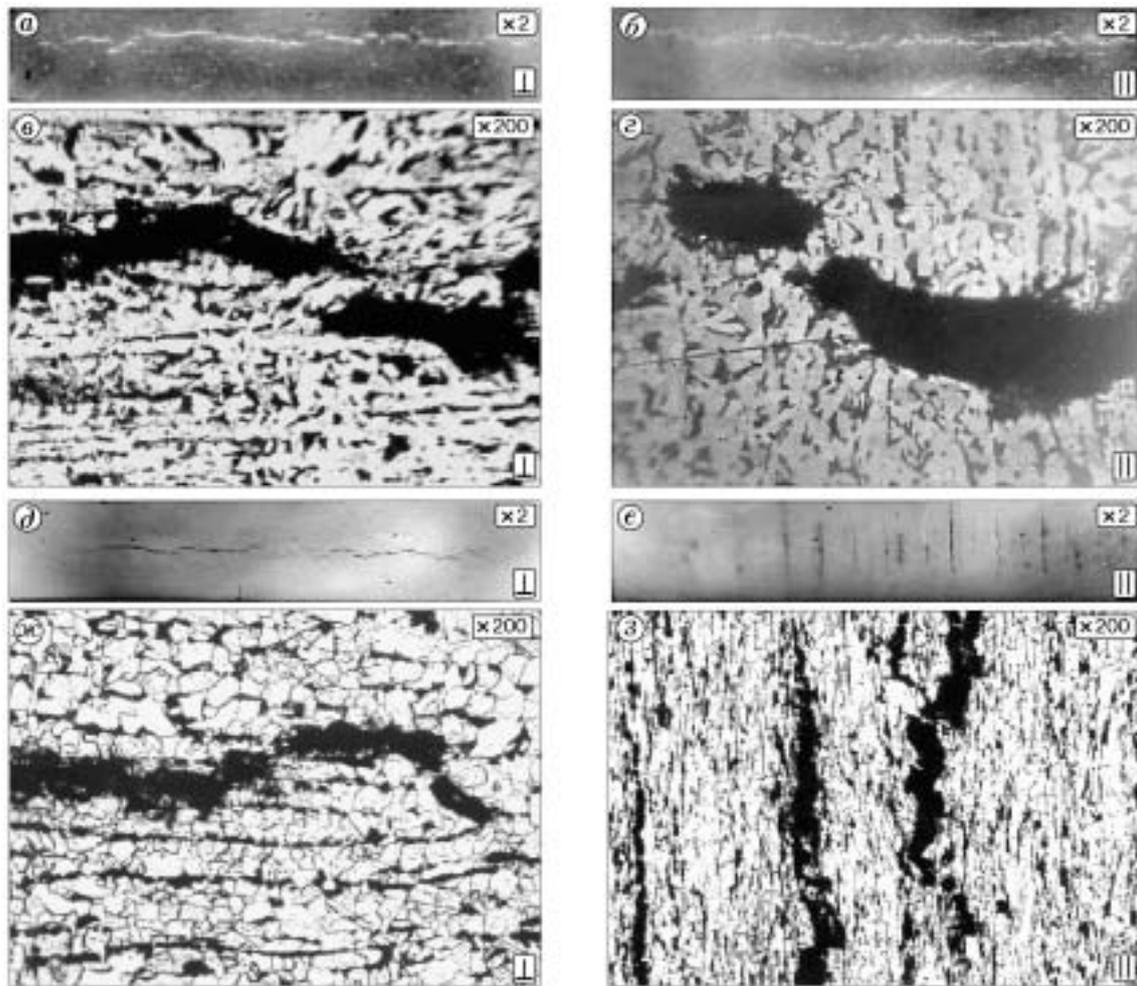


Рис. 1. Микро- и макроструктура образцов сталей Ст. 20 и 09Г2С:

|| — действие нагрузки параллельно, ⊥ — перпендикулярно направлению проката

стали Ст. 20, на рис. 1, д–з — стали 09Г2С. Образцы нагружали в продольном и поперечном направлениях относительно выделенной в них технологической текстуры, связанной с прокатом. На рис. 2 приведены профили скорости свободной поверхности образцов, зарегистрированные в опытах, в табл. 2 — результаты их обработки.

Анализ характера повреждений продольных сечений плоских образцов свидетельствует о наличии особенностей в кинетике разрушения образцов, нагружаемых в направлении выделенной текстуры, которые были отмечены для стали в работе [20]. Микроочаги разрушения в виде цепочки микротрещин формируются в направлении действия нагрузки, и только при определенном уровне нагрузки (или значении W_0) эти очаги объединяются откольной макро-

трещиной, идущей в поперечном направлении относительно действия нагрузки. Причем для образцов из стали 09Г2С эта особенность выражена наиболее сильно и появление откольной трещины в поперечном направлении наблюдается при достаточно высоких скоростях ударника — $W_0 \geq 300$ м/с, а при $W_0 \cong 130 \div 300$ м/с образцы разрушаются на ряд фрагментов в продольном направлении. Для образцов, нагружаемых перпендикулярно направлению выделенной текстуры, особенностей, как и в [20], не обнаружено.

Форма регистрируемых профилей $W(t)$ свидетельствует об упругопластическом характере деформирования образцов из обеих марок стали. Динамические пределы текучести Y образцов толщиной 5, 10, и 20 мм, нагружаемых в продольном и поперечном направлении

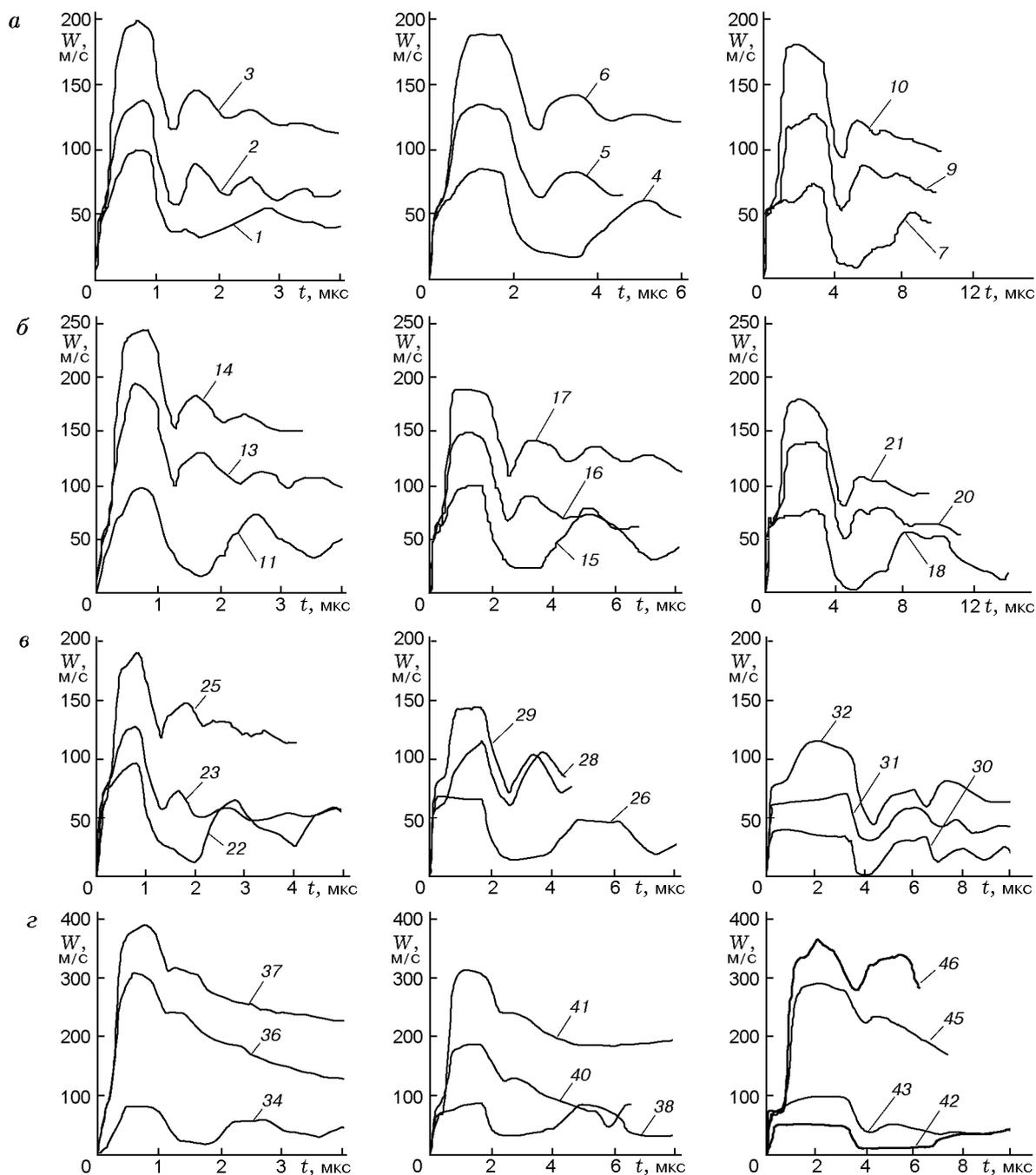


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности образцов сталей Ст. 20 (а, б) и 09Г2С (в, г), зарегистрированные в опытах с продольным (б, г) и поперечным (а, в) нагружением:

номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2

Таблица 2

Марка стали	Нагружение	Номер опыта	W_0 , м/с	h_m , мм	Y , ГПа	δW , м/с	σ_p , ГПа	$\dot{\epsilon}$, 10^4 с^{-1}	Разрушение
Ст. 20	Поперечное	1	100	5	0,78	—	—	—	А
		2	139,7		0,79	1,9	1,55	1,94	Б
		3	196,2		0,65	1,5	1,63	2,05	Г
		4	84	10	0,67	—	—	—	А
		5	134,2		0,87	1,0	1,37	0,71	В
		6	188,9		0,86	1,5	1,43	0,88	Г
		7	72,2	20	0,83	—	—	—	А
		8	97,5		0,88	1,4	1,31	01,87	Б
		9	130,7		0,78	1,6	1,46	0,95	В
		10	180,5		0,82	2,7	1,72	0,86	Г
	11	98,6	5	0,86	—	—	—	А	
	12	143,7		0,85	1,3	1,77	1,94	Б	
	13	193,1		0,96	1,6	1,84	2,29	В	
	14	249,1		0,89	2,5	1,81	2,65	Г	
	15	100,2	10	0,78	—	—	—	А	
	16	151,1		0,98	1,8	1,12	1,12	В	
	17	188,3		0,86	1,3	1,46	0,67	Г	
	18	75,7	20	0,84	—	—	—	А	
	19	107,1		0,91	1,6	1,59	1,02	Б	
	20	138,2		0,89	2,0	1,73	0,89	В	
	21	180,6		0,84	2,5	1,94	0,92	Г	
09Г2С	Поперечное	22	96,8	5	1,02	—	—	—	А
		23	126,8		1,04	1,24	1,36	1,24	Б
		24	140,6		0,85	1,58	1,29	1,19	В
		25	191,6		0,87	2,19	1,42	1,75	Г
		26	72,8	10	—	—	—	—	А
	27	102,3	0,89		1,36	1,06	0,53	Б	
	28	115,2	0,75		1,71	1,07	0,74	В	
	29	145,4	1,11		1,06	1,40	0,69	Г	
	30	40,1	20	—	2,52	0,68	1,22	Б	
	31	69,9		—	1,92	0,79	0,82	В	
	32	115,2		1,06	2,92	1,42	0,69	Г	
	33	140,5		1,14	2,81	1,66	0,78	Г	
	34	78,3	5	—	—	—	—	А	
	35	200		1,08	1,37	1,23	2,30	Б	
	36	304,7		1,2	0	1,28	2,43	В*	
	37	376,4		1,12	1,26	1,02	3,32	Г*	
38	88	10	—	—	—	—	А		
39	136,6		0,98	2,55	0,99	1,16	Б		
40	193,3		1,09	1,73	1,22	1,62	В*		
41	306,7		0,99	0	1,38	1,63	Г*		
42	53,6	20	—	—	—	—	А		
43	100,7		1,01	1,42	1,22	0,51	Б		
44	131,9		0,96	0,44	0,88	0,61	Б*		
45	290,3		0,92	3,35	1,25	0,82	В*		
46	365		0,99	3,97	1,69	0,72	Г*		

Примечание. *Образцы разрушались по типу рис. 1,з.

ях относительно выделенной текстуры, отличаются мало и составляют $0,9 \div 1,2$ ГПа для стали 09Г2С и $0,8 \div 0,9$ ГПа для стали Ст. 20.

Откольная прочность образцов из стали 09Г2С увеличивается с 0,7 до 1,4 ГПа при уменьшении толщины образцов с 20 до 5 мм или при увеличении скорости деформации с $5 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$ с⁻¹. При этом она зависит от направления действия растягивающих напряжений относительно направления выделенной текстуры, что связано, по-видимому, с отмеченными выше особенностями кинетики разрушения. Кроме того, для образцов из стали 09Г2С толщиной 20 мм наблюдается разрушение при давлении в образце, не превышающем динамического предела текучести, т. е. в упругой области деформирования (см. рис. 2, в, кривые 30–32). Для стали Ст. 20 откольная прочность выше и составляет $\sigma_p = 1,3 \div 1,6$ и $1,6 \div 1,8$ ГПа для образцов с действием растягивающих напряжений соответственно в поперечном и продольном направлениях относительно выделенной текстуры образца. Для обеих марок стали величина растягивающих напряжений возрастает с увеличением амплитуды УВ в образце перед растяжением [11], а при близких скоростях ударников степень разрушения более толстых образцов всегда больше, что свидетельствует о наличии масштабных эффектов энергетической природы [12].

В табл. 3 приведены имеющиеся и вновь полученные результаты по динамическому пределу текучести и откольной прочности рассматриваемых марок стали по описанной выше схеме. Для сравнения приведены коэффициенты динамического упрочнения материала в случае, когда направление нагрузки совпадает с направлением технологического проката, а также указаны значения отношений σ_B/σ_T , $\sigma_p^{\parallel}/\sigma_B$ и σ_p/Y в статических и динамических условиях испытаний. Из анализа этих результатов следует, что прочность исследуемых сталей при давлении на фронте УВ $p \leq 10$ ГПа в зоне, предшествующей разгрузке, является структурно-чувствительной характеристикой материала, зависит от технологического и масштабного факторов, динамичности нагружения и может изменяться в несколько раз. Динамический предел текучести Y слабо зависит от направления действия нагрузки относительно направления выделенной в материале текстуры для сталей с различной пластичностью в исходном состоянии (Ст. 20, 09Г2С,

30ХГСА, 35ХЗНМ). Для низкопрочных и высокопластичных сталей наблюдается значительное упрочнение при переходе от статических условий к динамическим условиям нагружения (значение Y увеличивается в 2–3 раза), в то время как для высокопрочных и менее пластичных сталей динамического упрочнения практически не наблюдается, что отмечалось в [14]. Откольная прочность оказалась более чувствительной характеристикой материала. Причем если отношение предела прочности к пределу текучести (σ_B/σ_T) по мере увеличения прочности рассматриваемых сталей в статике уменьшается с 1,5 до 1,2, то в динамике оно (σ_p/Y) увеличивается до четырех раз, главным образом за счет возрастания откольной прочности, особенно высокопрочных сталей.

В отличие от экспериментов по исследованию ударно-волнового деформирования материалов при их нагружении плоскими УВ эксперименты с применением шаров позволяют реализовать вблизи центра образца давление более 200 ГПа за счет эффекта сферической сходящейся УВ [7, 8]. Сферическую сходящуюся УВ в шаре создавали при инициировании на его поверхности взрывчатого вещества (ВВ) толщиной несколько миллиметров. В результате разгрузки шара после отражения УВ в центре шара возникают отрицательные растягивающие напряжения, приводящие к разрыву материала и образованию полости. В такого рода исследованиях невозможна инструментальная регистрация параметров, связанных с протеканием процессов деформирования и разрушения материала. Экспериментальной информацией о воздействии на материал ударно-волновых нагрузок (сжатия и растяжения) является исследование состояния шара после опыта, его наружного диаметра и размера полости. По размеру полости с помощью численного моделирования можно определить значения Y и σ_p [7, 8].

Опыты по нагружению шаров из стали (в состоянии поставки) с начальным радиусом $R_0 = 24$ мм проводили в одинаковой постановке по схеме, приведенной на рис. 3. С учетом данных табл. 1 и 3 для экспериментов с шарами выбрана сталь марок Ст. 3, Ст. 20, 12Х18Н10Т и 30ХГСА. Первые две стали имеют минимальную откольную прочность и промежуточную пластичность. Сталь 30ХГСА обладает наибольшей откольной прочностью и минимальной пластичностью, а сталь 12Х18Н10Т — промежуточной откольной прочностью и макси-

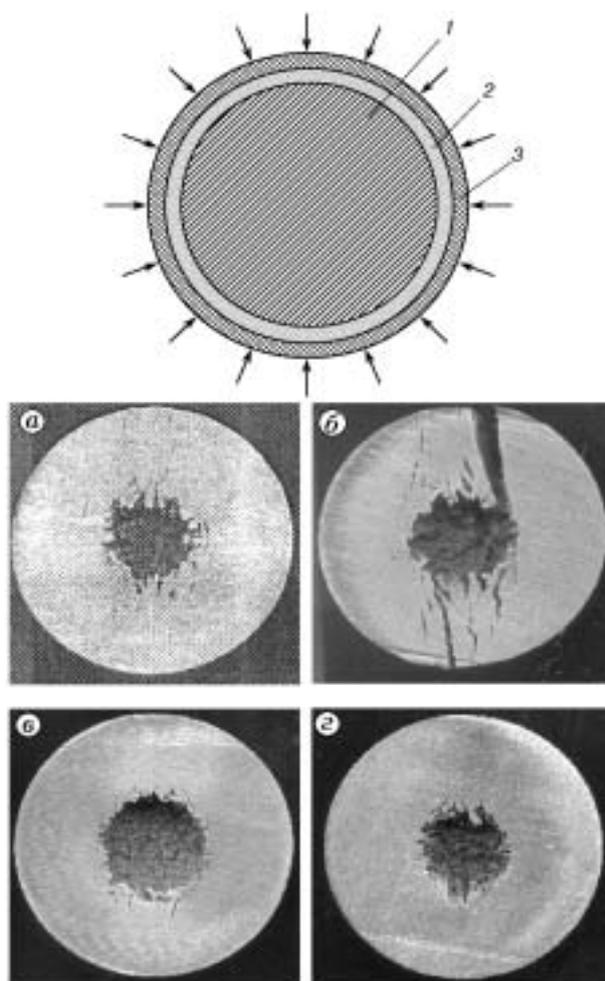


Рис. 3. Схема постановки опытов и фотографии сечений сохраненных после опыта образцов:

1 — шар, 2 — прокладка из полиэтилена, 3 — ВВ;
а — Ст. 3, б — Ст. 20, в — 12Х18Н10Т, г — 30ХГСА

мальной пластичностью. Сферическую сходящуюся УВ создавали при подрыве на наружной поверхности шара пластического заряда ВВ толщиной 3 мм. Между слоем ВВ и шаром из исследуемой стали устанавливали прокладку из полиэтилена толщиной 3 мм. Это позволило, согласно расчетам, создать в УВ при ее сжатии к радиусу 1 мм давление ≈ 200 ГПа. Образцы после нагружения сохраняли и разрезали в меридиональном направлении с целью определения размеров и формы образующейся полости. На рис. 3 представлены фотографии меридиональных сечений сохраненных после опыта шаров из исследуемых марок стали. В табл. 4 приведены результаты измерения радиуса шара в полюсе (R_1) и в экваторе (R_2), радиуса полости, образовавшейся внутри шара, измеренного в меридиональном (r_1) и экваториальном (r_2) направлениях, а также значения необратимой пластической деформации в меридиональном ($\varepsilon_1 = R_1/R_0$) и экваториальном ($\varepsilon_2 = R_2/R_0$) направлениях соответственно.

Из анализа полученных результатов (см. рис. 3, табл. 4) можно сделать вывод о различной степени анизотропии свойств исследуемых марок стали, вызванных технологическим фактором. Из рис. 3 видно, что имеются в различной степени развитые трещины, идущие по материалу шара в меридиональном направлении от полюсов стенок полости, совпадающем с направлением прокатки. Это согласуется с результатами исследования откола в образцах плоской геометрии. Наибольший ($9 \div 10$ мм) и наименьший ($8,0 \div 8,5$ мм) размеры полости наблюдаются для высокопластичной ($\delta = 52$ %) и низкопластичной ($\delta = 10$ %) сталей 12Х18Н10Т и 30ХГСА соответственно. Для сталей Ст. 20 и Ст. 3 со средней пластичностью $\delta = 22 \div 26$ % зафиксирован промежуточный размер полости $8 \div 9$ мм. Поскольку прочность этих сталей меньше прочности стали 12Х18Н10Т, то, казалось бы, должен быть больше и размер образующейся полости, чего не наблюдается. Эти обстоятельства указывают на то, что влияние прочности материала шара на размеры образующейся полости, после воздействия на него УВ с давлением на фронте ≈ 200 ГПа, невелико. Это может быть связано с тем, что различие значений прочности исследуемых сталей, достигающее 2–3 раз при давлениях ≤ 10 ГПа, при увеличении давления до 200 ГПа нивелируется за счет теплового разогрева.

Таблица 4

Сталь	R_1 , мм	R_2 , мм	r_1 , мм	r_2 , мм	ε_1	ε_2
Ст. 3	24,5	24,5	8,8	7,8	1,02	1,02
Ст. 20	24,6	25,3	$8 \div 9$	9,7	1,03	1,05
12Х18Н10Т	24,8	24,6	9,9	9,2	1,03	1,03
30ХГСА	24,3	24,4	8,4	8,1	1,01	1,02

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов А. Г., Федоренко А. Г., Сырунин М. А.** О возможности повышения безопасности ядерного оружия // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 169–171.
2. **Рыжанский В. А., Иванов А. Г., Жуков В. В., Минеев В. Н.** Взрывостойкость цилиндрической части корпуса быстрого реактора // Атомная энергия. 1995. Т. 79, вып. 3. С. 178–188.
3. **Михайлов А. Л., Огородников В. А., Хохлов Н. П. и др.** Взрывное разрушение, фрагментация и диспергирование конструкционных материалов // Хим. физика. 2001. Т. 20, № 8. С. 73–79.
4. **Разрушение** разномасштабных объектов при взрыве / В. А. Рыжанский, А. Г. Федоренко, М. А. Сырунин и др. Под ред. А. Г. Иванова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. С. 481.
5. **Фракталы** в прикладной физике / Б. Л. Глушак, И. Р. Трунин, С. А. Новиков, А. И. Рузанов. Под ред. А. Е. Дубинина. Арзамас-16: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1995. С. 59.
6. **Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. А. и др.** Кинетическая модель пластического разрушения с учетом диссипативных процессов // Хим. физика. 2002. Т. 21, № 9. С. 104–109.
7. **Бахрах С. М., Ковалев Н. П., Надыкто Б. А. и др.** Исследование пластических и прочностных свойств меди в условиях всестороннего растяжения // Докл. АН СССР. 1974. № 5. С. 1090–1093.
8. **Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. Н.** Роль диссипативных процессов в экспериментах по реализации всестороннего сжатия и растяжения шаров при взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 1. С. 96–101.
9. **Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е.** Исследования механических свойств материалов при ударно-волновом нагружении // Механика твердого тела. 1999. № 5. С. 173–188.
10. **Батьков Ю. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А.** Прочность алюминия, меди и стали за фронтом УВ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 126–132.
11. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Тюнькин Е. С. и др.** Зависимость откольной прочности металлов от амплитуды ударно-волновой нагрузки // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 1. С. 94–98.
12. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др.** Влияние масштабного и технологического факторов и предварительной деформации на высокоскоростное разрушение (откол) титанового сплава ПТ-3В и стали 12Х18Н10Т // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 130–139.
13. **Arnold W.** Dynamisches Werkstoffverhalten von Armco-Eisen bei Stoßwellenbelastung // Fortschr. Ber. VDI. Reihe 5. № 247. Dusseldorf, Germany, VDI-Verlag, 1992.
14. **Клещевников О. А., Тюняев Ю. Н., Софронов В. Н. и др.** Динамический предел текучести и работа отрыва при отколе ряда конструкционных сталей // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 102–106.
15. **Молодец А. М.** Измерение откольной прочности трех сталей // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черноголовка, 1978.
16. **Глузман В. Д., Канель Г. И., Лоскутов В. Ф. и др.** Сопротивление деформированию и разрушению стали 35ХЗНМ в условиях ударного нагружения // Проблемы прочности. 1985. № 8. С. 52–57.
17. **Минеев В. Н., Погорелов В. П., Иванов А. Г. и др.** Установка для исследования поведения конструкционных материалов и конструкций при динамических нагрузках // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 3. С. 129–133.
18. **Иванов А. Г., Новиков С. А.** Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности // Приборы и техника эксперимента. 1963. № 1. С. 135–139.
19. **Степанов Г. В.** Откольное разрушение материалов плоскими упругопластическими волнами // Проблемы прочности. 1976. № 8. С. 66–69.
20. **Огородников В. А.** О кинетике разрушения при отколе в широком диапазоне изменения амплитуды и длительности ударно-волновых нагрузок // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 4. С. 119–123.

Поступила в редакцию 9/IX 2003 г.