

УДК 623.61.66

СТАТИЧЕСКАЯ, ДИНАМИЧЕСКАЯ И УДАРНО-ВОЛНОВАЯ ПРОЧНОСТЬ ТРУБНОЙ СТАЛИ МАРОК 17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ И КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60

В. А. Огородников^{1,2}, М. А. Сырунин¹, К. В. Ерофеев¹, Е. В. Кулаков¹,
А. С. Пупков¹, Е. В. Кошатова¹, Ф. Ф. Галиев^{1,2}, А. М. Подурец¹,
М. И. Ткаченко¹, Т. О. Складнева¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

²Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
603155 Нижний Новгород

При разработке специализированных взрывозащитных камер, к которым предъявляются повышенные требования по прочностной надежности, одним из важных вопросов является выбор материала силового корпуса, воспринимающего импульсные (динамические и ударно-волновые) нагрузки. Как правило, для таких конструкций используются трубы промышленного производства различных типоразмеров из низколегированной стали. При этом всегда возникает вопрос о выборе марки стали, особенно на этапе расчетного обоснования их взрывостойкости, поскольку характеристики динамической прочности материала труб, как правило, неизвестны. В связи с этим в данной работе впервые приведены результаты исследования статической, динамической и ударно-волновой прочности на сжатие и растяжение материала труб из стали марок 17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ и класса прочности К60. Кроме того, представлены сравнительные данные о взрывостойкости при скоростях деформации материала $(2 \div 5) \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ труб из стали марок 09Г2С и 10Г2ФБЮ.

Ключевые слова: прочность, пластичность, стальные трубы, взрыв, деформация, разрушение.

DOI 10.15372/FGV20230314

ВВЕДЕНИЕ

Трубы диаметром $0.2 \div 2.0$ м из стали разных марок широко применяют в качестве силовых оболочек при создании взрывозащитных камер, способных герметично локализовать в своем объеме продукты взрыва и высокоскоростные осколки исследуемых объектов при массе зарядов взрывчатых веществ до ≈ 100 кг в тротиловом эквиваленте (ТЭ) [1]. Также их можно использовать в качестве заготовок при изготовлении цилиндрических лайнеров для исследования квазиизоэнтропической сжимаемости различных газов до давления мегабарного уровня [2]. При этом материал оболочек испытывает интенсивные динамические

и ударно-волновые нагрузки с амплитудой давления $p = 1 \div 10$ ГПа и скоростью деформации $\dot{\epsilon} = 10^2 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$. Данные о динамической и ударно-волновой прочности при сжатии и растяжении стали марок 17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ и стали класса прочности К60 в этих условиях нагружения практически отсутствуют. Использование при проведении расчетов прочности взрывозащитных камер только статических механических характеристик материалов не позволяет корректно моделировать динамическую реакцию конструкции от воздействия нагрузок взрывного типа (ударные волны, газообразные продукты взрыва, осколки), что создает определенные трудности при численном моделировании.

Можно отметить, что упомянутые выше марки стали по результатам статических испытаний условно разделяются на менее прочные, но более пластичные (17Г1С, 09Г2С) и более прочные, но менее пластичные (10Г2ФБЮ и К60). В [3, 4] систематизированы результаты исследования статической и ударно-волновой прочности образцов стали различных марок (Ст3, Сталь 20, 09Г2С,

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы по созданию молодежных лабораторий (научная тема № FSWE-2021-0010 «Газодинамика и физика взрыва») и Национального центра физики и математики (г. Саров Нижегородской области).

© Огородников В. А., Сырунин М. А., Ерофеев К. В., Кулаков Е. В., Пупков А. С., Кошатова Е. В., Галиев Ф. Ф., Подурец А. М., Ткаченко М. И., Складнева Т. О., 2023.

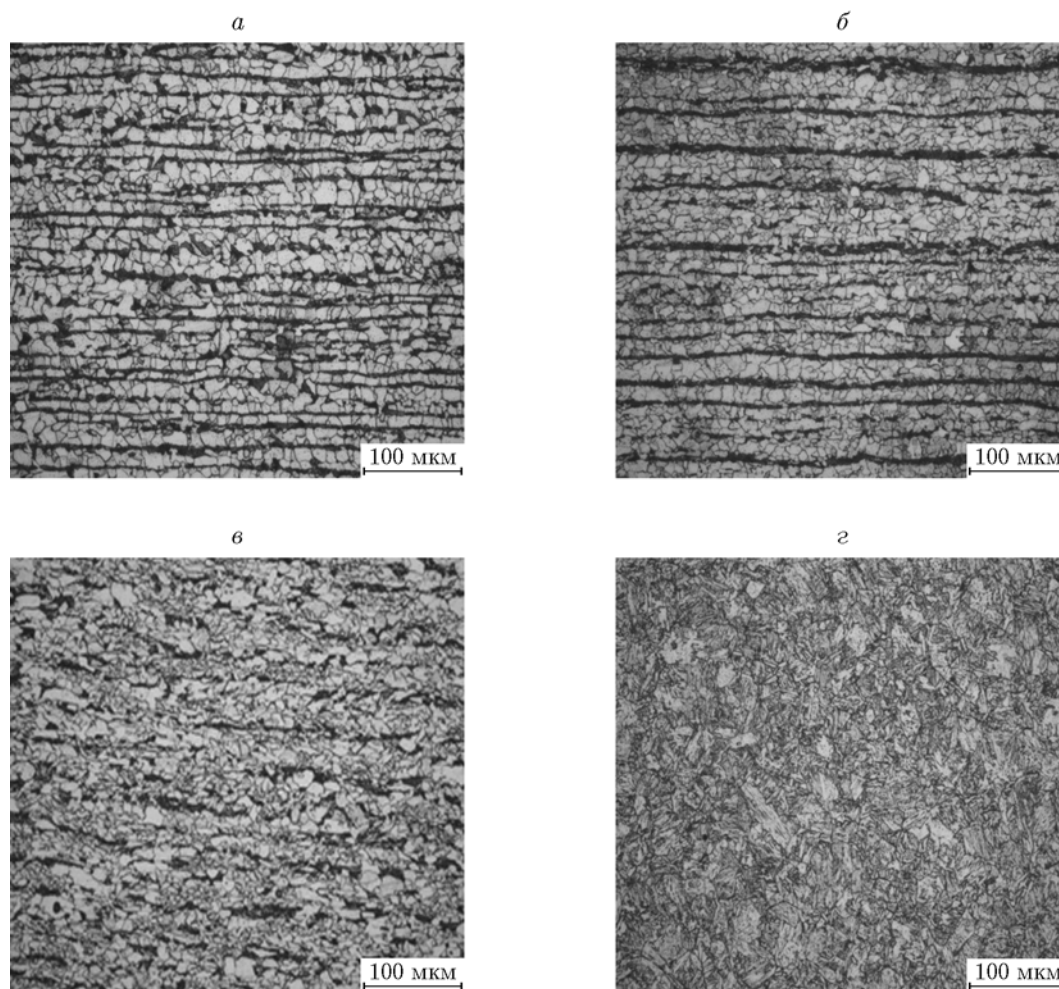


Рис. 1. Микрошлифы образцов стали марок 17Г1С (а), 09Г2С (б), 10Г2ФБЮ (в) и стали класса прочности К60 (г) в исходном состоянии

На рис. 1 представлены микрошлифы образцов исследуемых марок стали. Из анализа следует, что для стали марок 17Г1С и 09Г2С структура микрошлифов однородная по всей плоскости шлифа и состоит из зерен феррита с полосами перлита. При этом для обеих марок стали средний диаметр зерна равен 10 ± 5 мкм, а среднее расстояние между полосами перлита 16 ± 8 мкм (17Г1С) и 24 ± 10 мкм (09Г2С), микротвердость HV 184 ± 8 кгс/мм² (17Г1С) и 193 ± 10 кгс/мм² (09Г2С). Для стали марки 10Г2ФБЮ и стали класса прочности К60 структура однородная по всей плоскости шлифа и состоит из зерен феррита среднего диаметра $\approx 10 \pm 5$ мкм с небольшими включениями перлита (для стали марки 10Г2ФБЮ). Микротвердость HV составляет 208 ± 14 кгс/мм² для стали марки 10Г2ФБЮ и 269 ± 17 кгс/мм² для стали класса прочности К60.

СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Статические испытания на растяжение цилиндрических образцов длиной 30 мм, диаметром 5 мм проводили по ГОСТ 1497 при комнатной температуре ($+24$ °С) со скоростью относительной деформации $\dot{\epsilon} = 1.4 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹. Статические испытания на сжатие цилиндрических образцов длиной 12 и 15 мм, диаметром 6 и 10 мм проводили по ГОСТ 25.503-97 при комнатной температуре ($+24$ °С) со скоростью относительной деформации $\dot{\epsilon} = (1 \div 2) \cdot 10^{-2}$ с⁻¹. В результате испытаний определяли механические характеристики: условный предел текучести $\sigma_{0.2c}^+$, временное сопротивление при растяжении $\sigma_{в,с}^+$, условный предел текучести при сжатии $\sigma_{0.2c}^-$, относительное удлинение δ .

Таблица 2

Механические свойства при растяжении и сжатии исследуемых марок стали при $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$

Марка стали	Средние значения по результатам входного контроля				Данные сертификатов качества			Номер сертификата качества
	$\sigma_{0.2c}^+$, МПа	$\sigma_{B,c}^+$, МПа	$\sigma_{0.2c}^-$, МПа	δ , %	$\sigma_{0.2c}^+$, МПа	$\sigma_{B,c}^+$, МПа	δ , %	
17Г1С	386	555	413	27	430 ÷ 435	540 ÷ 550	26 ÷ 27	№ 279/2 ООО «МЕГА-Сталь»
09Г2С	412	563	415	30	460	560	27 ÷ 30	№ 279/1 ООО «МЕГА-Сталь»
10Г2ФБЮ	571	657	554	24	470 ÷ 520	590 ÷ 652	23.5 ÷ 25.0	№ 140/3 Челябинский трубопрокатный завод
K60	596	664	464	24	490	598 ÷ 608	21 ÷ 25	№ 3342 ОАО ВМЗ г. Выкса

В табл. 2 для сравнения приведены средние значения механических характеристик при растяжении и сжатии, измеренные при входном контроле, и данные сертификата качества на материал, из которого были выполнены исследуемые образцы.

Из табл. 2 следует, что результаты входного контроля механических характеристик при растяжении ($\dot{\epsilon} = 1.4 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$) несколько отличаются от данных, приведенных в сертификатах качества. Однако уточненные данные подтверждают общую тенденцию и принятое условное деление исследуемых марок стали на менее прочные, но более пластичные (17Г1С, 09Г2С) и более прочные, но менее пластичные (10Г2ФБЮ, К60). На рис. 2 приведены σ – ϵ -диаграммы растяжения и сжатия материала образцов стали этих марок, вырезанных в тангенциальном направлении. Установлено, что для образцов, вырезанных из труб в различных направлениях относительно оси труб (в радиальном, тангенциальном, продольном), заметного отличия, превышающего $1 \div 2$ %, в величинах $\sigma_{0.2c}^+$ и $\sigma_{0.2c}^-$ не наблюдается. Следует отметить, что как при сжатии, так и при растяжении на диаграммах деформирования образцов из стали марок 17Г1С, 09Г2С и 10Г2ФБЮ имеется «зуб» текучести, который отсутствует на диаграммах для стали класса прочности К60. Сравнение условных пределов текучести при сжатии и растяжении свидетельствует о том, что они практически совпадают для стали марок 17Г1С, 09Г2С и 10Г2ФБЮ, а для ста-

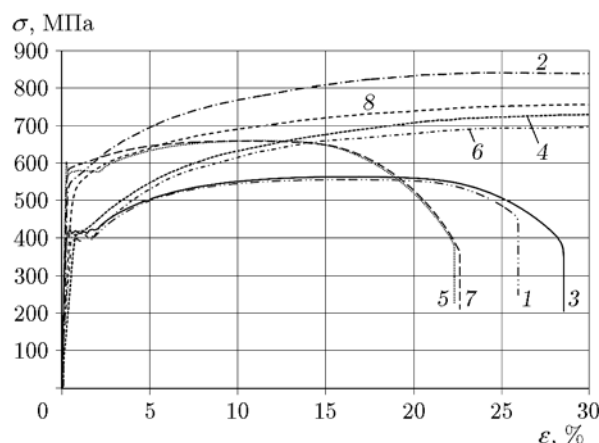


Рис. 2. Диаграммы деформирования при растяжении (1, 3, 5, 7) и сжатии (2, 4, 6, 8):

1, 6 — 17Г1С, 3, 4 — 09Г2С, 2, 5 — 10Г2ФБЮ, 7, 8 — К60

ли класса К60 условный предел текучести при растяжении на 28 % больше, чем при сжатии.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Динамические испытания образцов на сжатие и растяжение проводили на пневматической установке по методу Кольского с использованием составных стержней Гопкинсона [5, 6]. Образцы на сжатие имели диаметр и высоту 10×5 мм, а образцы на растяжение представляли собой галтели с резьбой общей длиной 38 мм, длиной рабочей части 10 мм и диаметром 5 мм [6]. В опытах использова-

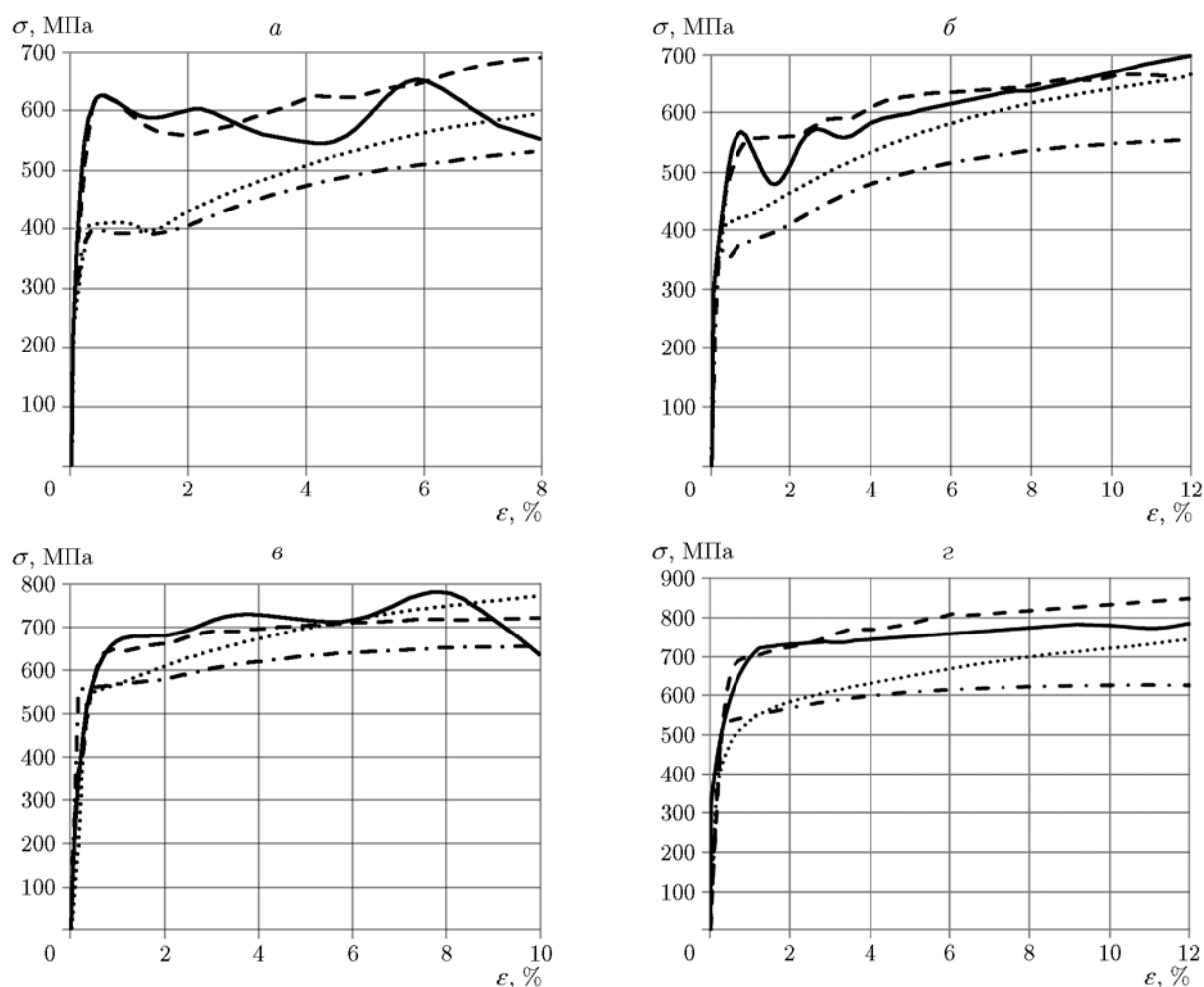


Рис. 3. Динамические и статические σ - ϵ -диаграммы деформирования стали марок 17Г1С (а), 09Г2С (б), 10Г2ФБЮ (в) и стали класса прочности K60 (г) при сжатии и растяжении

ли стержни и ударник из высокопрочной стали 005Н18К12М4Т1-ВИ диаметром 20 мм. Длины нагружающего и опорного стержней составляли 1 500 и 1 000 мм соответственно, длина ударника 400 мм. По зарегистрированным зависимостям деформации от времени $\epsilon(t)$ на нагружающем и опорном стержнях с использованием формул метода Кольского [5, 6] строили зависимости напряжения от деформации $\sigma(\epsilon)$ и скорости деформации от деформации материала образца $\dot{\epsilon}(\epsilon)$.

На рис. 3 приведены истинные σ - ϵ -диаграммы, полученные при динамических испытаниях образцов на растяжение и сжатие. Здесь же для сравнения приведены результаты статических испытаний. Из рис. 3 следует, что динамические σ - ϵ -диаграммы для сжатия и растяжения образцов всех исследованных марок стали идут выше статических. При

этом обращает на себя внимание наличие пика текучести («зуба» текучести) на динамических σ - ϵ -диаграммах для стали марок 17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ и его отсутствие для стали класса K60.

В табл. 3 приведены осредненные результаты обработки данных этих испытаний на растяжение $\sigma_{0.2}^+$, $\sigma_{\text{в}}^+$ и сжатие $\sigma_{0.2}^-$ при скорости деформации материала образца $\dot{\epsilon} \simeq 10^3 \text{ с}^{-1}$, а также результаты сравнения динамических и статических испытаний.

Из табл. 3 следует, что с увеличением скорости деформации до 10^3 с^{-1} различие значений условных пределов текучести ($\sigma_{0.2}^+$ и $\sigma_{0.2}^-$) при растяжении и сжатии не превышает 10 %. При этом по сравнению со статикой ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) в динамике ($\dot{\epsilon} \approx 10^3 \text{ с}^{-1}$) имеет место увеличение прочности на растяжение ($\sigma_{\text{в}}^+$) для

Таблица 3

Механические свойства исследуемых марок стали при сжатии и растяжении

Марка стали	Растяжение ($\dot{\epsilon} = (1.0 \div 1.3) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$)		Сжатие ($\dot{\epsilon} = (0.7 \div 1.0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$)	$\frac{\sigma_{0.2}^+}{\sigma_{0.2c}^+}$	$\frac{\sigma_{\text{в}}^+}{\sigma_{\text{в},c}^+}$	$\frac{\sigma_{0.2}^-}{\sigma_{0.2c}^-}$	$\frac{\sigma_{0.2}^+}{\sigma_{0.2}^-}$
	$\sigma_{0.2}^+$, МПа	$\sigma_{\text{в}}^+$, МПа	$\sigma_{0.2}^-$, МПа				
17Г1С	539	662	592	1.40	1.19	1.48	0.88
09Г2С	511	692	467	1.24	1.23	1.13	1.09
10Г2ФБЮ	594	787	547	1.04	1.19	0.99	1.08
K60	614	770	636	1.03	1.16	1.31	0.96

всех марок стали на $15 \div 20 \%$ и условного предела текучести на растяжение ($\sigma_{0.2}^+$) для менее прочных сталей (09Г2С, 17Г1С) на $25 \div 40 \%$, а условный предел текучести $\sigma_{0.2}^+$ при растяжении для более прочных сталей (10Г2ФБЮ, К60) остается практически на уровне статической величины. Аналогичная закономерность наблюдается и для условных пределов текучести при сжатии, за исключением величины $\sigma_{0.2}^-$ для стали класса К60, которая увеличивается на $\approx 30 \%$.

УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Опыты с ударно-волновым нагружением образцов проводили в той же постановке, что и в [4]. Исследуемые образцы стали толщиной 5 мм и диаметром 50 мм запрессовывали в обоймы из стали Ст3 с наружным диаметром 95 мм и толщиной, равной толщине образца. Такие мишени устанавливали в посадочное место вакуумированного ствола баллистической ударной установки [7] и нагружали ударником из стали той же марки, что и образец, диаметром 75 мм и толщиной 2.5 мм. При выбранной геометрии ударника и образца создавали режим одномерного сжатия и последующего растяжения исследуемого материала. Мишень с образцом после нагружения сохраняли путем торможения в малоплотной среде (полиэтиленовая стружка), после чего разрезали и проводили металлографический анализ состояния образца в продольном сечении.

В данной постановке выполняли по три опыта с образцами из стали каждой марки при разных скоростях ударника. Для всех марок стали (17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ) и стали класса прочности К60 удалось реализовать условия нагружения, вызывающие поврежденность материала различного уровня — от появления на-

чальных очагов разрушения (стадия I) до их объединения (стадия II) и полного макроскопического разделения образца на части (стадия III).

На рис. 4 представлены фотографии микрошлифов продольного сечения исследуемых образцов после ударно-волнового нагружения, в результате которого появились первые очаги разрушения (стадия I) и началось их объединение (стадия II). Анализ повреждений на микрошлифах продольных сечений образцов показал, что очаги разрушения условно менее прочной стали марок 17Г1С, 09Г2С формируются вдоль технологической текстуры материала образца при скоростях ударника $W_0 = 116 \div 130 \text{ м/с}$. Ширина зоны повреждения материала вблизи трещины изменяется от 0.5 мм при $W_0 = 116 \div 130 \text{ м/с}$ до 1 ÷ 2 мм при $W_0 = 200 \text{ м/с}$.

Для условно более прочной стали марки 10Г2ФБЮ и стали класса прочности К60 очаги разрушения формируются на отдельных неоднородностях при скоростях ударника $W_0 \cong 200 \div 260 \text{ м/с}$, которые с увеличением нагрузки объединяются микротрещинами в магистральную трещину. Причём ширина зоны поврежденности материала увеличивается до 2 ÷ 3 мм.

В каждом опыте с использованием PDV-датчиков измеряли подлетную скорость ударника к мишени и зависимость скорости свободной поверхности образца от времени $W(t)$, которые использовали для оценки прочности материала исследуемых марок стали при ударно-волновом нагружении на сжатие (динамического предела текучести Y) и растяжение (откольной прочности σ_p) и скорости деформации при сжатии $\dot{\epsilon}_1$ и растяжении $\dot{\epsilon}_2$ [8, 9]:

$$Y = 0.5 \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \rho_0 C_l W_{\text{упр}},$$

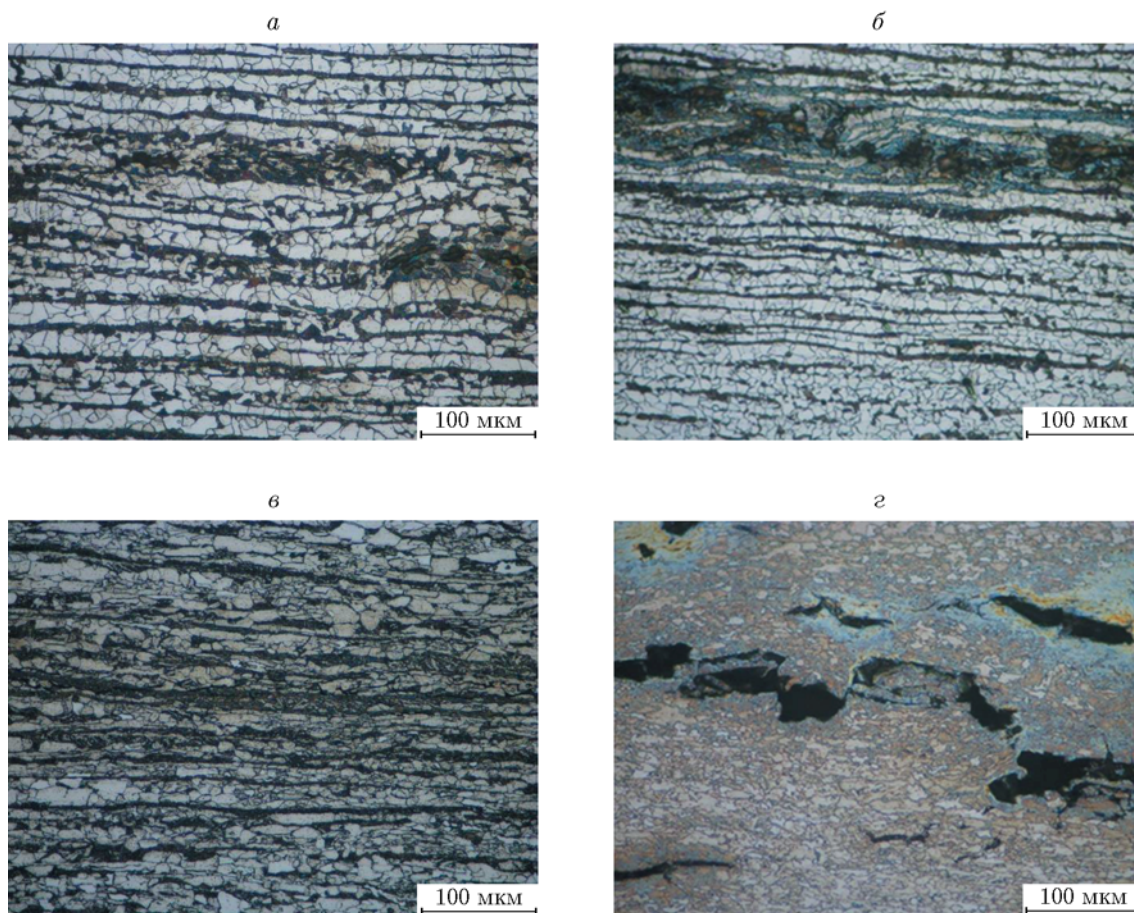


Рис. 4. Фрагменты микрошлифов образцов стали марок 17Г1С (а), 09Г2С (б), 10Г2ФБЮ (в) и класса прочности К60 (г) после испытаний

$$\sigma_p = 0.5\rho_0 C_0(W_1 - W_2 + \delta W),$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\partial W_{\text{упр}}}{\partial t} / 2C_0, \quad \dot{\varepsilon}_2 = \frac{\partial W_2}{\partial t} / 2C_0,$$

где ρ_0 — плотность, C_l , C_0 — продольная и объемная скорости звука, ν — коэффициент Пуассона; $W_{\text{упр}}$, W_1 , W_2 — скорость свободной поверхности на упругом предвестнике, в первых максимуме и минимуме на зависимости $W(t)$, δW — упругопластическая поправка [10].

На рис. 5 приведены зависимости скорости свободной поверхности образцов от времени, зарегистрированные в опытах, а в табл. 4 — результаты их обработки. В этой же таблице приведены для сравнения ударно-волновые прочностные характеристики (Y , σ_p) и статические характеристики ($\sigma_{0.2c}^-$, $\sigma_{B,c}^+$) материалов исследуемых образцов, полученные при $\dot{\varepsilon} \simeq 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Анализ результатов опытов (рис. 5, табл. 4) указывает на упругопластическое поведение стали всех марок при ударно-волновом деформировании. Обращает на себя внимание, так же как и в статических и динамических испытаниях, наличие на зависимостях $W(t)$ «зуба» текучести [11] для стали марок 17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ и его отсутствие для стали класса прочности К60, что связано, по-видимому, с более однородной структурой материала.

Для стали всех марок при ударно-волновых испытаниях ($\dot{\varepsilon} = 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$), по сравнению со статическими ($\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), наблюдается превышение предела текучести Y над пределом прочности на сжатие $\sigma_{0.2c}^-$ примерно в 2 ÷ 3 раза и превышение отклонной прочности σ_p над временным сопротивлением $\sigma_{B,c}^+$ при растяжении — примерно в 2 ÷ 4 раза. Причем если для стали марок 17Г1С и 09Г2С более заметное упрочнение (до

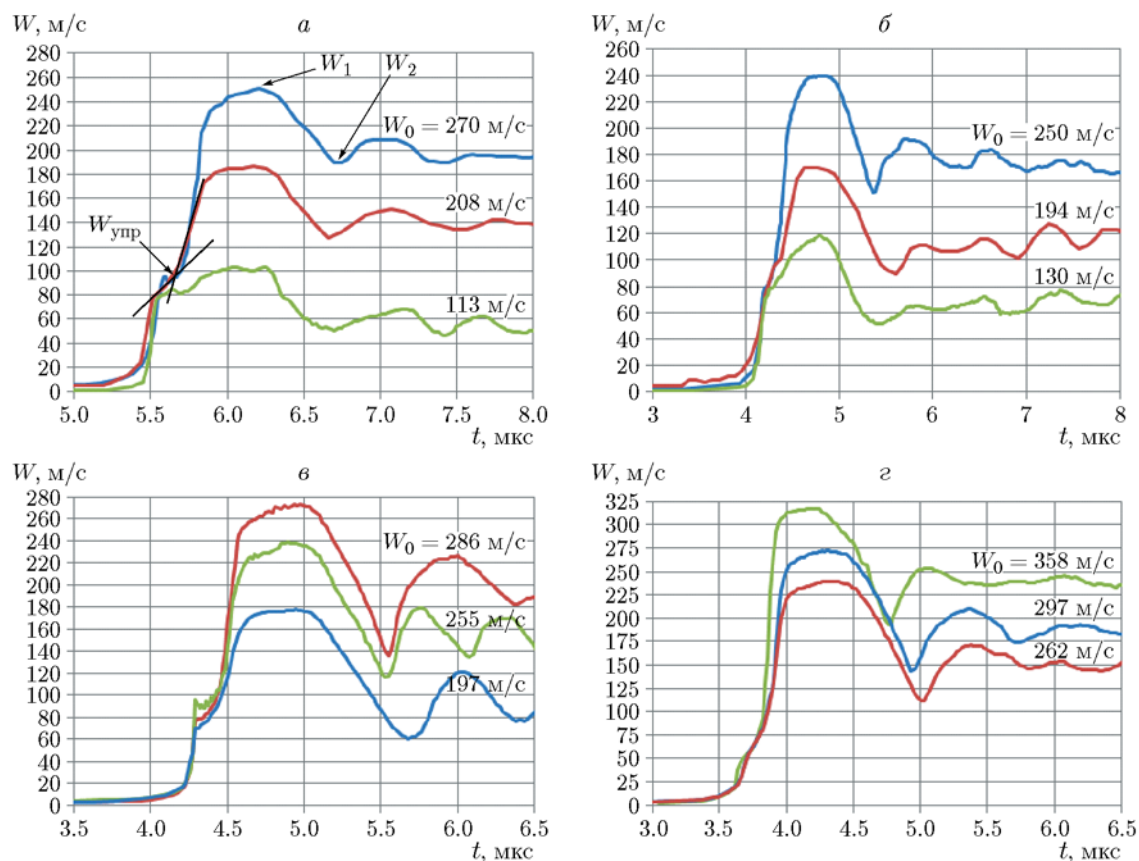


Рис. 5. Диаграммы скорости свободной поверхности образцов стали марок 17Г1С (а), 09Г2С (б), 10Г2ФБЮ (в) и стали класса прочности К60 (г)

Таблица 4

Сравнение статической и ударно-волновой прочности исследуемых марок стали

Марка стали	Номер образца	W_0 , м/с	Степень повреждения	Y , ГПа	ϵ_1 , 10^5 с $^{-1}$	σ_p , ГПа	ϵ_2 , 10^4 с $^{-1}$	$\bar{Y}$, ГПа	$\bar{\sigma}_p$, ГПа	$\bar{Y}/\sigma_{0.2c}^-$	$\bar{\sigma}_p/\sigma_{в,c}^+$
17Г1С	1	116	I-II	1.08	—	1.18	1.6	1.17	1.21	2.8	2.2
	2	208	II	1.15	0.5	1.11	1.8				
	3	270	III	1.27	1.0	1.34	1.9				
09Г2С	4	130	I-II	1.02	—	1.56	1.8	1.17	1.82	2.8	3.3
	5	194	II	1.42	0.5	1.93	1.7				
	6	250	III	1.07	1.0	2.05	2.9				
10Г2ФБЮ	10	197	II	0.97	0.6	2.49	2.2	1.09	2.76	2.0	4.2
	11	255	II-III	1.18	1.4	2.66	2.8				
	12	286	III	1.14	1.2	3.13	1.8				
К60	7	262	I-II	0.96	1.1	2.81	3.1	0.89	2.94	1.9	4.4
	8	297	II-III	0.91	1.6	3.02	3.4				
	9	358	III	0.80	2.2	2.99	4.1				

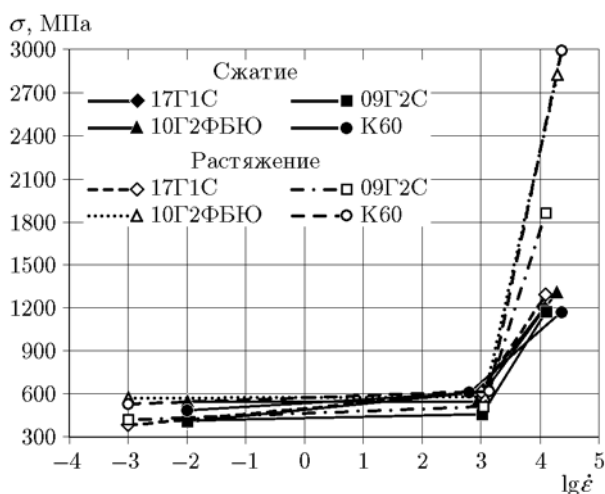


Рис. 6. Зависимость прочности исследуемых марок стали на сжатие и растяжение от скорости деформации при статических, динамических и ударно-волновых нагрузках

3 раз) наблюдается при сжатии, то для сталей марки 10Г2ФБЮ и класса К60 оно имеет место при растяжении (до 4 раз). Также можно отметить, что если прочностные характеристики исследуемых марок стали при статических ($\dot{\epsilon} \simeq 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) и динамических ($\dot{\epsilon} \simeq 10^3 \text{ с}^{-1}$) условиях сжатия и растяжения близки, то при ударно-волновых условиях нагружения ($\dot{\epsilon} \simeq 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$) величины Y и σ_p отличаются до $1.5 \div 2.5$ раза.

Подобные особенности в поведении прочностных характеристик различных марок стали отмечали в [3, 4], и связаны они, по-видимому, с термофлуктуационным и атермическим механизмами поведения стали при динамических ($\dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ с}^{-1}$) и ударно-волновых ($\dot{\epsilon} \geq 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$) условиях деформирования и разрушения [12]. На рис. 6 приведены полученные в работе экспериментальные данные по прочности исследуемых марок стали на сжатие и растяжение при статических ($\dot{\epsilon} = 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), динамических ($\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ с}^{-1}$) и ударно-волновых ($\dot{\epsilon} = 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$) испытаниях.

Следует отметить, что в целом тенденции изменения прочности материала исследуемых марок стали на сжатие и растяжение с увеличением скорости деформации до $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ не противоречат имеющимся в литературе данным для различных марок стали [3, 4, 12, 13].

СРАВНЕНИЕ ВЗРЫВОСТОЙКОСТИ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТАЛИ РАЗНЫХ МАРОК

В [14] при исследовании взрывного нагружения цилиндрических оболочек из стали марки 09Г2С ($\sigma_{0.2c} = 375 \text{ МПа}$, $\sigma_{в,с}^+ = 510 \text{ МПа}$, $\delta = 29 \%$) и марки 10ХСНД ($\sigma_{0.2c}^- = 505 \text{ МПа}$, $\sigma_{в,с}^- = 610 \text{ МПа}$, $\delta = 23 \%$) диаметром 850 мм с толщиной стенки 25 мм ($\epsilon_0 = \Delta/R \simeq 6 \%$) был сделан вывод, что их взрывостойкость определяется в большей степени не прочностными, а пластическими свойствами материала оболочки. Для проверки этого утверждения проведены дополнительные опыты по взрывному нагружению более тонкостенных ($\epsilon_0 = 3.6 \%$) цилиндрических оболочек (труб) из стали марок 09Г2С и 10Г2ФБЮ в той же постановке, что и в [14]. Оболочки диаметром 820 мм, с толщиной стенки 14 мм, высотой 1600 мм нагружали зарядами взрывчатого вещества предельной массы, установленными в геометрическом центре оболочки.

На рис. 7,а,б представлены фотографии оболочек после их нагружения предельной массой заряда взрывчатого вещества, равной 17.75 кг ТЭ, на рис. 7,в,г — результаты опытов с оболочками из стали марок 09Г2С и 10ХСНД из [14] при нагружении зарядом массой 24.30 кг ТЭ.

В табл. 5 приведены значения остаточной деформации $\epsilon_{окр}^{ост}$ и скорости деформации $\dot{\epsilon}$ при взрывном деформировании исследованных оболочек, полученные в данной работе и в [14]. Эти результаты свидетельствуют о том, что разрушение оболочки из более прочной, но менее пластичной стали марки 10Г2ФБЮ более катастрофично, чем оболочки из менее прочной, но более пластичной стали марки 09Г2С, что не противоречит выводу работы [14].

Таблица 5

Сравнительные данные по характеристикам деформирования				
Марка стали	Оболочка на рис. 7	$\epsilon_{окр}^{ост}, \%$	$\dot{\epsilon}, \text{ с}^{-1}$	Источник
09Г2С	а	32.6	400	Данная работа
10Г2ФБЮ	б	23.6	470	
09Г2С	в	22.1	275	[14]
10ХСНД	г	19.8	250	



Рис. 7. Состояние тонкостенных ($\varepsilon_0 = 3.6 \%$) (а, б) и толстостенных ($\varepsilon_0 = 6 \%$) (в, г) оболочек из [14] после нагружения зарядами взрывчатого вещества предельной массы 17.75 (а, б) и 24.30 кг ТЭ (в, г)

С учетом хода зависимостей $\sigma(\dot{\varepsilon})$ (см. рис. 6) и измеренных скоростей деформации при взрывном нагружении оболочек можно заключить, что при реализованных скоростях деформации ($\dot{\varepsilon} = 250 \div 470 \text{ с}^{-1}$) значения динамических пределов текучести $\sigma_{0.2}^{+,-}$ и временного сопротивления σ_v^+ исследованных марок стали отличаются незначительно. Тем не менее, как отмечалось выше, если в динамике ($\dot{\varepsilon} = 10^3 \text{ с}^{-1}$) величина $\sigma_{0.2}^+$ для условно менее прочной стали (17Г1С, 09Г2С) увеличивается на $24 \div 40 \%$ по сравнению со статикой

($\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), то для условно более прочной стали (10Г2ФБЮ, К60) она остается на уровне статической величины. По-видимому, определяющую роль в разрушении оболочек в данном случае играет вязкость их материала, которая у менее однородного и более текстурированного материала оболочек из стали марки 09Г2С (см. рис. 1) больше, чем у более однородной по структуре стали марок 10Г2ФБЮ и 10ХСНД. Это приводит к большему значению вязкостной составляющей динамического предела текучести в рамках вязкопластической

модели среды $\sigma_d = \sigma_{0.2} + \mu \dot{\epsilon}$ [13], где μ — вязкость материала, и, как следствие, к большей взрывостойкости оболочек из исходно менее прочной, но более пластичной стали марки 09Г2С.

ВЫВОДЫ

1. Впервые определены прочностные характеристики при сжатии и растяжении материала трубной стали марок 17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ и класса прочности К60 при динамических ($\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ с}^{-1}$) и ударно-волновых ($\dot{\epsilon} = 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$) условиях испытаний. Проведено их сравнение со статическими характеристиками ($\dot{\epsilon} = 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ с}^{-1}$).

2. По сравнению со статикой, при динамических испытаниях имеет место увеличение временного сопротивления при растяжении (σ_b^+) для всех марок стали на $15 \div 25 \%$ и условного предела текучести ($\sigma_{0.2}^+$) для менее прочных сталей (09Г2С, 17Г1С) на $25 \div 40 \%$, а условный предел текучести при растяжении ($\sigma_{0.2}^+$) для более прочных сталей (10Г2ФБЮ, К60) остается на уровне статических величин.

3. Для исследованных марок стали подтверждена известная тенденция резкого увеличения прочности материала при ударно-волновом сжатии, до $2 \div 3$ раз, и особенно при растяжении, до $3 \div 4$ раз, с увеличением скорости деформации до $10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$.

4. Подтверждено, что при скоростях деформации $(2.5 \div 4.7) \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ взрывостойкость оболочек из менее прочных, но более пластичных сталей (09Г2С) несколько выше, а характер разрушения менее катастрофичен по сравнению с оболочками из более прочных, но менее пластичных сталей (10Г2ФБЮ и 10ХН8Д).

5. Полученные результаты будут полезны при построении более адекватных определяющих соотношений для моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций и совершенствования моделей разрушения материалов при действии на элементы конструкций динамических и ударно-волновых нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сырунин М. А., Огородников В. А. Взрывозащитные камеры для исследований гидродинамических процессов и взрывных технологий // Приборы и техника эксперимента. — 2015. — № 2. — С. 5–13.
2. Мочалов М. А., Илькаев Р. И., Фортон Е. И., Михайлов А. Л., Раевский В. А. и др. Исследование квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия при давлениях 1500–5000 ГПа // ЖЭТФ. — 2014. — Т. 146, № 1. — С. 169–185.
3. Клещевников О. А., Тюняев Ю. Н., Софронов В. Н., Огородников В. А., Иванов А. Г., Минеев В. Н. Динамический предел текучести и удельная работа отрыва при отколе ряда конструкционных сталей // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 4. — С. 102–106.
4. Огородников В. А., Боровкова Е. Ю., Ерунов С. В. Прочность некоторых марок стали и армо-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений $2 \div 200$ ГПа // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 109–117.
5. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. B. — 1949. — V. 62, N 11. — P. 676–700. — (Рус. перевод в: Механика. — 1950. — Вып. 4. — С. 108–119).
6. Pushkov V., Yurlov F., Leonov V., Tsibikov A., Naydanova T. Dynamic tension of aluminum alloy AMg-6 in a facility of split Hopkinson Bar // Proc. 12th Int. Conf. DYMAT, Arcachon, France, 2018, Sept. 9–14 / EPJ Web of Conf. — 2018. — V. 183. — Paper 02036. — P. 1–3. — DOI: 10.1051/epjconf/201818302036.
7. Минеев В. Н., Погорелов В. П., Иванов А. Г., Свидинский В. А., Русак В. Н., Букреев Ю. В. Установка для исследования поведения конструкционных материалов и конструкций при динамических нагрузках // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 3. — С. 129–133.
8. Канель Г. И. Ударные волны в физике твердого тела. — М.: Физматлит, 2018.
9. Kanel G. I., Savinykh A. S., Garkushin G. V., Razorenov S. V. Effects of temperature on the flow stress of aluminum in shock waves and rarefaction waves // J. Appl. Phys. — 2020. — V. 127, N 3. — 035901. — DOI: 10.1063/1.5130703.
10. Степанов Г. В. Откольное разрушение материалов плоскими упругопластическими волнами // Проблемы прочности. — 1976. — № 8. — С. 66–69.
11. Иванов А. Г., Новиков С. А. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности // Приборы и техника эксперимента. — 1963. — № 1. — С. 135–138.
12. Канель Г. И., Разоренов Г. В., Уткин А. В., Фортон В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.

13. **Разрушение** разномасштабных объектов при взрыве / под ред. А. Г. Иванова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
14. **Ерофеев К. В., Огородников В. А., Сырунин М. А., Ханин Д. В.** Реакция цилиндрических оболочек из стали марок 09Г2С и 10ХСНД с продольными и кольцевыми сварными швами на взрывное нагружение // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 116–121. — DOI: 10.15372/FGV20200612.

Поступила в редакцию 29.06.2022.

Принята к публикации 07.09.2022.
