

УДК 539.4

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-2-241-252

СЖАТИЕ СТАЛИ МАРКИ Ст3 «СЛАБОЙ» УДАРНОЙ ВОЛНОЙ*

© 2025 г. Назаров Д.В.¹, Трунин И.Р.^{1,2}, Баженов Д.А.¹,
Шестаков Е.Е.¹, Гнутов И.С.¹

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация

²Саровский физико-технический институт – филиал Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Саров, Российская Федерация

staff@vniief.ru

Поступила в редакцию 26.03.2025

Представлен экспериментальный подход, позволяющий рассмотреть картину волновых взаимодействий вблизи свободной поверхности ударно-нагруженных образцов, и исследовано их влияние на движение свободной поверхности.

Проведены ударно-волновые эксперименты, в которых образцы из стали Ст3 различной толщины нагружались ударниками из того же материала. Опыты проводились на нагружающей пневматической установке пушечного типа (рабочий газ – гелий), ударник разгонялся до скоростей ~500 м/с, диагностика волновых процессов проводилась по регистрации скорости движения свободной поверхности с помощью методики PDV (Photon Doppler Velocimeter). На фронтальном участке зависимости скорости поверхности образца от времени зарегистрированы особенности в виде ступенек, которым соответствуют времена выхода на свободную поверхность первой упругой волны, распространяющейся по образцу с продольной скоростью звука, и второй волны, образованной в результате отражения первой упругой волны разрежения от ударной волны. Предложено оценивать значение скорости ударной волны в случае ее упругопластической конфигурации по регистрации времен выхода упругих предвестников на свободную поверхность образца.

Построены ударные адиабаты стали Ст3: зависимость скорости ударной волны от массовой скорости за фронтом волны, зависимость напряжения от плотности стали в диапазоне нагружения до давления ~13 ГПа, соответствующего началу фазового перехода α - ϵ в железе.

Определены параметры уравнения состояния стали Ст3 в форме Ми – Грюнайзена, которые позволяют использовать это уравнение для численного моделирования поведения вещества в низкой области ударного нагружения.

Ключевые слова: сталь марки Ст3, скорость свободной поверхности, упругий предвестник, ударная волна, ударная адиабата, уравнение состояния.

* Выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики по Государственному контракту №Н.4ц.241.4Д.23.1085.

Введение

Экспериментальные исследования ударно-волнового сжатия различных химических элементов и соединений, определяющие связь давления с плотностью и энергией – ударную адиабату, проводятся в России уже более 70 лет [1–3], они вносят большой вклад в построение уравнений состояния и определение свойств веществ в широком диапазоне динамических нагрузок. Основной объем опытных данных по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ, полученный как российскими, так и зарубежными учеными, был представлен в справочниках [4, 5], а также в многочисленных публикациях (например, [6]).

Данные по ударным адиабатам (УА) большинства веществ в [4–6] получены методом отражения [7], в котором ударная волна (УВ) подводилась к исследуемым образцам через экраны из эталонных материалов, УА которых исследованы наиболее подробно, в частности, методом торможения [8]. В качестве материалов экранов использовался алюминий и железо, иногда медь. Подчеркнем, что приведенные в [4, 6] данные, как правило, получены усреднением четырех–восьми опытов при шести–восьми независимых регистрациях времени в каждом из них.

Практически во всех измерениях использовалась электро-контактная методика регистрации, основанная на замыкании проходящей волной двух электродов, расположенных друг относительно друга на известном расстоянии.

Для создания ударных волн в исследуемых веществах применяли различные лабораторные нагружающие устройства, мощные взрывчатые вещества (ВВ), плоские разгонные системы – «взрывные пушки», сферические системы. При исследовании сжимаемости удалось достичь в образцах рекордных значений давлений ударного сжатия до 2,5 ТПа (сферические системы). Плоские разгонные системы, основанные на ускорении продуктами взрыва тонких пластин-ударников, позволили разогнать, например, алюминиевые ударники до скоростей 2,0–6,5 км/с. При этом средняя квадратичная ошибка определения кинематических параметров ударной волны (скорость ударной волны D и массовая скорость за фронтом волны U) составляла ~1,0–1,5% (как указано в [6]).

Отметим, что для всех перечисленных типов устройств нижний уровень реализуемых в образцах давлений составлял десятки ГПа.

В случае «слабых» УВ с амплитудой до нескольких ГПа, когда волна сжимает вещество всего на несколько процентов и скорость ее распространения меньше продольной скорости звука $D < C_L$, для большинства приведенных в [4–6] веществ данные по ударно-волновому сжатию отсутствуют или ограничиваются единичными результатами. Поэтому в этой области нагружений ударная адиабата в виде линейной (иногда квадратичной) зависимости $D(U)$, как правило, экстраполируется из области высоких давлений к малым амплитудам P , $U \rightarrow 0$. Однако, как указано в [9], такая экстраполяция может привести к погрешностям в определении коэффициентов c_0 , λ в зависимости $D(U)$.

Обратим внимание, что при прохождении ударных импульсов по конденсированной среде может возникнуть многоволновая конфигурация УВ, связанная с упруго-пластическим деформированием среды и образованием упругих предвестников, распространяющихся со скоростью, близкой к продольной скорости звука C_L . Для разных материалов границы области существования двухволновой упруго-пластической конфигурации УВ могут различаться в несколько раз. Например, для алю-

миния область, где $D < C_L$, по напряжению (амплитуде ударной волны) составляет до ~12 ГПа, для меди ~22 ГПа, для вольфрама ~121 ГПа.

В этом диапазоне динамических нагрузок определение скорости распространения D пластической УВ по результатам, полученным контактным методом, сопряжено со сложностями достоверной фиксации времени выхода УВ на свободную поверхность. Определенные сложности возникали и при создании ударных нагрузок, соответствующих воздействию на исследуемые материалы «слабых» ударных волн.

Использование ствольных систем нагружения [10–13] для разгона плоских ударников со скоростями от ~100 м/с, лазерных доплеровских интерферометров (VISAR) [13] и гетеродин-интерферометра (PDV) [14] для регистрации волновых течений позволило повысить точность измерений и определить скорости УВ в области давлений, где информация о сжатии материалов ограничена.

Подчеркнем, что именно в этом богатом на экспериментальные возможности диапазоне особенно проявляются реологические прочностные свойства материала, которые влияют на состояние среды, находящейся под воздействием ударно-волновых нагрузок.

1. Структура профиля скорости движения свободной поверхности образца

В задачах высокоскоростного ударного нагружения, когда УВ, возникающая в результате соударения ударника и образца, разделяется на упругую и пластическую волны, важно знать времена выхода этих волн на свободную поверхность (СП) образца. Эти времена, а также значение скорости W , которую приобретает СП при выходе на нее упругой волны W_{HEL} , и ее максимальное значение W_{max} позволят определить скорость ударной волны D , массовую скорость за фронтом волны U , амплитуду ударной волны P , сжимаемость ρ/ρ_0 , предел Гюгонио σ_{HEL} и т.д. Отметим, что упругая волна распространяется со скоростью, несколько большей, но близкой к продольной скорости звука в материале C_L . Вслед за упругой волной распространяется пластическая УВ. Ее минимальная скорость близка к объемной скорости звука $C_b = \sqrt{K/\rho} < C_L$, где K – модуль объемного сжатия.

В настоящее время регистрация профилей скорости движения свободной (тыльной) поверхности $W(t)$ является наиболее распространенным способом исследования структуры упругопластических волн сжатия в твердом теле. Однако взаимодействие упругопластической волны сжатия со свободной поверхностью образца приводит к появлению серии отражений и искажению регистрируемого волнового профиля, что иногда затрудняет интерпретацию полученных результатов, и к погрешностям при определении волновых скоростей.

Фронтальная часть профиля скорости $W(t)$ формируется за счет выхода упругой волны (упругий предвестник – УП), упругих волн, переотраженных от пластической волны, и пластической УВ [15, 16]. На рис. 1а,б схематично показан профиль скорости движения свободной поверхности, полученный при ударном сжатии пластины из упругопластического материала. Видно, что профиль $W(t)$ содержит ряд особенностей. Выход УВ на свободную поверхность (время t_1 , рис. 1а) приводит ее в движение со скоростью W_{HEL} и вызывает появление отраженной упругой волны разрежения. После «встречи» отраженной волны с пластической УВ ($t_{1,2}$) в разгруженном материале вновь формируется упругая волна сжатия, которая при выходе на

свободную поверхность (время t_2 , рис. 1а) формирует вторую «ступеньку» на профиле скорости СП амплитудой W_{HEL2} на рис. 1б.

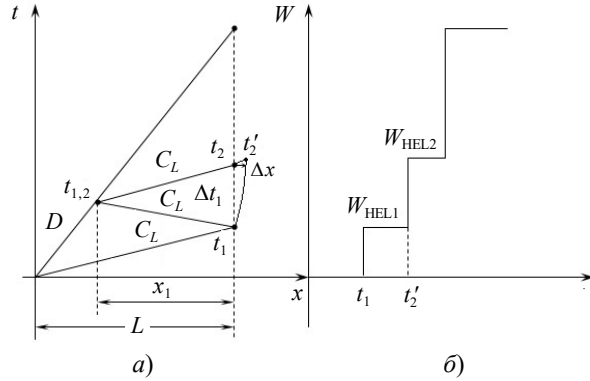


Рис. 1. Диаграмма $x-t$ (а), профиль скорости движения СП (б)

Согласно рис. 1, и исходя из того, что скорость УП равна C_L и в эксперименте регистрируются времена выхода на свободную поверхность образца по крайней мере двух УП (t_1 и t_2' на зависимости $W(t)$), можно определить скорость D распространения пластической УВ:

$$D = C_L \frac{1 - A}{1 + A}, \quad (1)$$

где $A = (t_2' - t_1)(C_L - W_{\text{HEL}})/(2L)$, L – толщина пластины, $t_1 = L/C_L$ – время выхода первого упругого предвестника, t_2' – время выхода переотраженного упругого предвестника с учетом движения свободной поверхности со скоростью W_{HEL1} .

2. Ударное сжатие стали Ст3

Рассмотренный выше подход был применен для определения скорости УВ в стали Ст3. Исследовался диапазон нагружения до ~ 13 ГПа – область исходной твердой α -фазы железа, что является новым по сравнению с данными для большинства веществ, в которых скорости УВ были получены при больших ударно-волновых воздействиях. Так, для железа и сталей в [4, 5] данные по ударному сжатию (зависимости $D(U)$) представлены при $P > 20$ ГПа, что соответствует состоянию в твердых ε -, γ - и жидкой L -фазах железа.

Рассматривая в качестве примера построение соотношения $D(U)$ для стали в области воздействия «слабой» УВ, попытаемся ответить на вопрос о корректности экстраполяции данных из области высоких давлений в область исходной α -фазы железа.

2.1. Постановка опытов и результаты экспериментов. Объектом исследования выбраны образцы из стали Ст3 с процентным содержанием железа $\text{Fe} \geq 99\%$. Исходные микротвердость и плотность стали: $H_V = 130$, $\rho_0 = 7,85$ г/см³. Измеренная ультразвуковым методом скорость распространения продольных волн $C_L = 5,88$ км/с, рассчитанное значение объемной скорости звука $C_b = 4,616$ км/с.

Эксперименты с образцами из стали Ст3 проводились по схеме, согласно которой плоский ударник, разогнанный в вакуумированном стволе нагружающей пневматической установки пушечного типа калибра 50 мм, соударялся с мишенным блоком, в котором была закреплена обойма диаметром 60 мм.

В обойму из стали Ст3 толщиной 8 мм со шлифованными основаниями были запрессованы три образца из стали с номинальными толщинами 2, 3 и 5 мм и диаметрами 10, 12 и 16 мм соответственно. Свободная часть обоймы диаметром не менее 22 мм являлась четвертым образцом. Выбор геометрических размеров образцов определялся так, чтобы волновые процессы, возникающие при нагружении каждого из образцов, не оказывали взаимного влияния на измерения. Для измерений скорости движения СП образцов с помощью лазерной доплеровской оптогетеродиновой методики [14] в их центральные зоны диаметром не более 5 мм проецировались «точки» зондирования датчиков PDV. Нагружение мишенного блока проводилось ударником из стали Ст3 толщиной 2 мм и диаметром 45 мм со скоростями 247, 306, 370 и 430 м/с.

Типичные зарегистрированные в экспериментах профили скорости движения свободной поверхности образцов $W(t)$, приведенные к расчетному моменту времени соударения ударника и обоймы, показаны на рис. 2 для скорости нагружения $W_{уд} = 430$ м/с. Цифрами на рисунке отмечены различные толщины образцов: 1 – 2 мм, 2 – 3 мм, 3 – 5 мм, 4 – 8 мм.

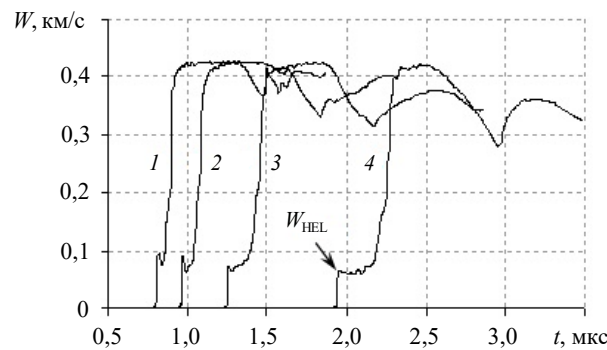


Рис. 2. Профили скорости $W(t)$ СП образцов из стали Ст3

На волновых профилях фиксируется упругий предвестник с напряжением сжатия за фронтом, равным динамическому пределу упругости (HEL), а изменение его амплитуды дает возможность оценить затухание УП по мере распространения по образцам. В экспериментах с образцами толщиной $L = 8$ мм результаты для всех скоростей нагружения отдельно приведены на рис. 3.

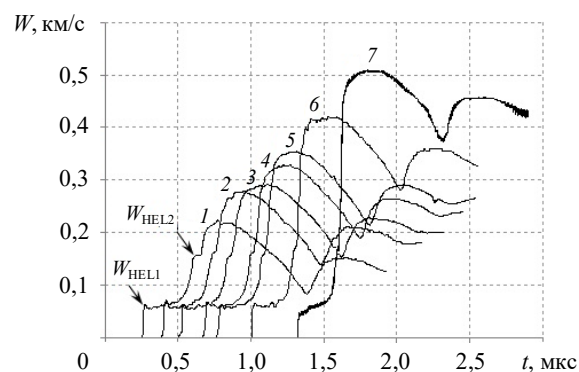


Рис. 3. Экспериментальные зависимости скорости движения СП от времени для образцов толщиной $L = 8$ мм

На рис. 3 более четко зарегистрирован выход на СП как первого УП, так и отраженного от УВ второго УП (на рис. 1 времена выхода обозначены t_1 и t'_2 с амплитудами W_{HEL1} и W_{HEL2} соответственно). К профилям, полученным в этой серии экспериментов, добавлены результаты аналогичных опытов с образцами толщиной $L = 8$ мм, нагруженными ударниками со скоростями 293, 343, 514 м/с. Цифрами на рисунке отмечены различные скорости ударников $W_{\text{уд}}$: 1 – 247, 2 – 293, 3 – 306, 4 – 343, 5 – 370, 6 – 430, 7 – 514 м/с.

2.2. Оценка скорости пластической ударной волны D . По результатам опытов с толщиной образца (обоймы) $L = 8$ мм определена скорость распространения пластической УВ и построена зависимость D от массовой скорости частиц за фронтом волны U . Для этого использовано выражение (1), в котором времена выхода УП (t_1 и t'_2) определялись по соответствующим этим временам максимальным значениям производной скорости

$$\frac{dW_i}{dt} = \frac{W_{i+1} - W_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

на участках зависимости $W(t)$ от 0 до W_{HEL1} и от W_{HEL1} до W_{HEL2} .

На рис. 4 в качестве примера приведен график производной dW/dt от времени (синий цвет), на котором явно выражены максимумы, первые из которых соответствуют временам выхода на свободную поверхность образца первого УП t_1 и переотраженного УП t'_2 .

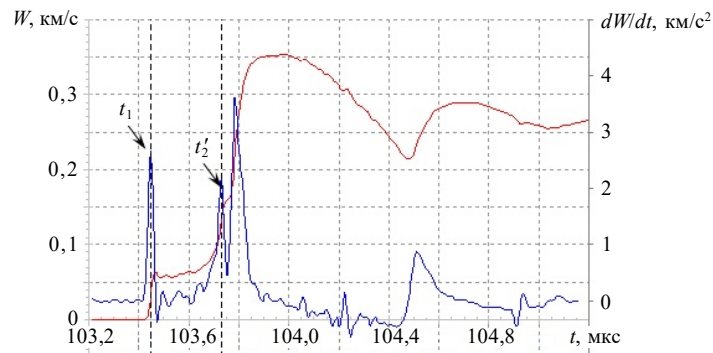


Рис. 4. Моменты времени выхода упругих предвестников на СП обоймы в опыте №5 ($W_{\text{уд}} = 370$ м/с)

По результатам, полученным для других толщин образцов (2, 3, 5 мм), после обработки экспериментальных спектрограмм были определены времена выхода упругой волны на свободные поверхности образцов t_1 и значения скорости W_{HEL1} и сделаны оценки скорости упругой волны в стали Ст3 и значений динамического предела упругости $\sigma_{\text{HEL1}} = 0,5 \rho_0 C_L W_{\text{HEL1}}$. Средняя продольная скорость звука по данным четырех опытов $C_L = 5,90 \pm 0,08$ км/с, что хорошо согласуется с измеренным ультразвуковым методом значением $C_L = 5,877$ км/с для данного материала обоймы. Среднее значение предела упругости: $\sigma_{\text{HEL1}} = (2,003 \pm 0,179)$ ГПа при толщине образца $L = 2$ мм (четыре опыта), $\sigma_{\text{HEL1}} = (2,003 \pm 0,111)$ ГПа при $L = 3$ мм (четыре опыта), $\sigma_{\text{HEL1}} = (1,655 \pm 0,144)$ ГПа при $L = 5$ мм (четыре опыта); $\sigma_{\text{HEL1}} = (1,512 \pm 0,056)$ ГПа при $L = 8$ мм (семь опытов).

В таблице 1 представлены исходные данные экспериментов, амплитуды первого

и второго упругих предвестников, величина динамического предела упругости σ_{HEL1} и рассчитанные значения скорости ударной волны D , массовой скорости частиц U за фронтом УВ.

Определение массовой скорости частиц за ударным скачком обычно основывается на анализе распада разрыва на контактной границе между ударником и образцом. В случае если ударник и образец изготовлены из одного материала, то, согласно симметрии, величина массовой скорости должна равняться половине скорости соударения: $U = W_{\text{уд}}/2$ [9].

Таблица 1

Исходные данные и результаты обработки экспериментов

№	$W_{\text{уд}}$, м/с	L , мм	W_{HEL1} , м/с	W_{HEL2} , м/с	σ_{HEL1} , ГПа	D , км/с	U , км/с	σ , ГПа	ρ , г/см ³
1	247	7,944	63,95	153,86	1,48	4,61	0,123	4,81	8,053
2	293	8,000	70,00	158,90	1,61	4,70	0,146	5,71	8,092
3	306	7,959	64,00	150,05	1,47	4,73	0,153	5,92	8,103
4	343	7,890	67,85	159,03	1,57	4,74	0,172	6,63	8,133
5	370	7,938	63,24	151,08	1,46	4,76	0,185	7,20	8,156
6	430	7,937	65,34	160,30	1,51	4,81	0,215	8,39	8,207
7	514	7,900	–	160,23	–	4,92	0,257	10,15	8,274

В таблицу 1 добавлены результаты обработки трех опытов №2, 4, 7 (см. рис. 3), проведенных в аналогичной с опытами №1, 3, 5, 6 постановке с обоймами из стали Ст3 толщиной $L \approx 8$ мм, в которых также измерялась скорость движения свободной поверхности обоймы.

На рис. 5 ромбами отмечены данные из таблицы 1 и показана аппроксимация $D(U)$ линейной зависимостью $D = c_0 + \lambda U$, кружки соответствуют результатам из [17], для большинства из которых $D < C_b$. При построении линейной аппроксимации учитывались полученные в экспериментах [18] значения скоростей, соответствующие началу фазового перехода α – ϵ в железе при давлении $P \sim 13$ ГПа (на рис. 5 – черный квадрат: $U_{\alpha-\epsilon} \sim 0,32$ км/с, $D_{\alpha-\epsilon} \sim 5,01$ км/с). Значение $D = 4,61$ км/с, полученное при обработке опыта №1 с $W_{\text{уд}} = 247$ м/с, близко к значению объемной скорости звука в стали Ст3 ($C_b = 4,616$ км/с) и, как следует из рис. 5, точка, соответствующая этой скорости, отклоняется от линейной зависимости $D(U)$.

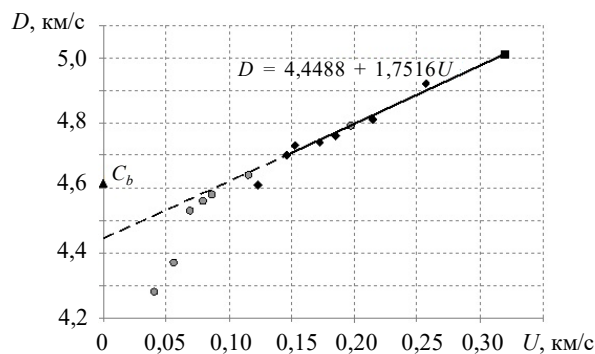


Рис. 5. Зависимость скорости ударной волны D от массовой скорости за фронтом волны U в стали Ст3

Отклонение значения D для заданного уровня нагружения можно объяснить

распространением по образцу простой волны сжатия в отличие от сверхзвукового распространения УВ и наибольшим влиянием реологии материала (прочность, пластичность, вязкость и т.д.) на волновые процессы.

В диапазоне скоростей $C_b < D < D_{\alpha-\varepsilon}$ и $0,15 \text{ км/с} < U < 0,3 \text{ км/с}$ полученные для стали Ст3 значения $c_0 = 4,45 \text{ км/с}$ и $\lambda = 1,75$ хорошо согласуются с параметрами зависимости $D(U)$ из [17], построенной для железа Агтсо, $c_0 = 4,43 \text{ км/с}$ и $\lambda = 1,75$. Отклонение значений D от усредненной линейной зависимости $D(U)$ составляет не более $\pm 0,02 \text{ км/с}$.

Однако c_0 и λ не совпадают с аналогичными параметрами из [4, 5]: $c_0 = 3,664 \text{ км/с}$, $\lambda = 1,79$, $q = -0,034$ [4] и $c_0 = 3,574 \text{ км/с}$, $\lambda = 1,92$, $q = -0,068$ [5]. В [4, 5] экспериментальные данные аппроксимировались квадратичными зависимостями вида $D = c_0 + \lambda U + qU^2$, которые определялись при амплитудах ударного сжатия больше 20 ГПа. Поэтому оправдываются предупреждения, высказанные в [9], что нельзя экстраполировать данные об ударном сжатии из области высоких давлений к малым значениям амплитуд УВ, тем более если экстраполяция происходит по данным, полученным для другого фазового состояния вещества.

Зная ударную адиабату, построенную по результатам экспериментов по ударному сжатию стали Ст3 «слабой» УВ, согласно законам сохранения массы и импульса, можно представить УА в виде, например, $\sigma(\rho)$, $\sigma(V)$, $\sigma(U)$, где σ – напряжение в ударной волне, ρ – плотность сжатого вещества, V – удельный объем.

В качестве примера на рис. 6 приведены:

– вычисленные значения напряжения σ и плотности ρ (см. табл. 1)

$$\sigma = \sigma_{\text{HEL1}} + \rho_{\text{HEL1}} \left(D - \frac{W_{\text{HEL1}}}{2} \right) \left(U - \frac{W_{\text{HEL1}}}{2} \right),$$

$$\rho_{\text{HEL1}} = \rho_0 \frac{C_L}{C_L - W_{\text{HEL1}}/2},$$

$$\rho = \rho_{\text{HEL1}} \left(D - \frac{W_{\text{HEL1}}}{2} \right) (D - U);$$

– адиабата Гюгонио [19]

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} \frac{1}{h - \delta} \left[\delta^n \left(h - \frac{n+1}{n-1} \right) + \delta \frac{2n}{n-1} - (h-1) \right], \quad \delta = \frac{\rho}{\rho_0};$$

– упругая ударная адиабата [20]

$$\sigma_{\text{упр}} = P_H + \frac{4}{3} \mu_0 \frac{\delta \ln \delta}{h - \delta} (h - \delta - \ln \delta),$$

для построения которых использовали параметры c_0 , n , h , определенные из коэффициентов соотношения $D(U)$ (см. рис. 5). При этом параметр c_0 (скорость звука, определяемая сжимаемостью) находится непосредственно из соотношения $D = c_0 + \lambda U$ и имеет значение меньше объемной скорости звука C_b , $n = 4\lambda - 1$, а $h = 1 + 2/\Gamma$, где коэффициент Грюнайзена Γ оценивается по формуле Слэтера – Ландау [9] при равенстве нулю линейного коэффициента теплового расширения

$$\Gamma(V) = -\frac{2}{3} - \frac{V}{2} \frac{(P_x(V))''}{(P_x(V))'} = -\frac{2}{3} + \frac{n+1}{2} = \frac{3n-1}{6}$$

при описании $P_x(V)$ интерполяционной функцией вида

$$P_x = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta^n - 1).$$

Приведенные на рис. 6 ударные адиабаты для стали Ст3 построены со следующими параметрами: $\rho_0 = 7,85 \text{ г/см}^3$, $\mu_0 = 82 \text{ ГПа}$, $c_0 = 4,45 \text{ км/с}$, $n = 6$, $h = 1,705$.

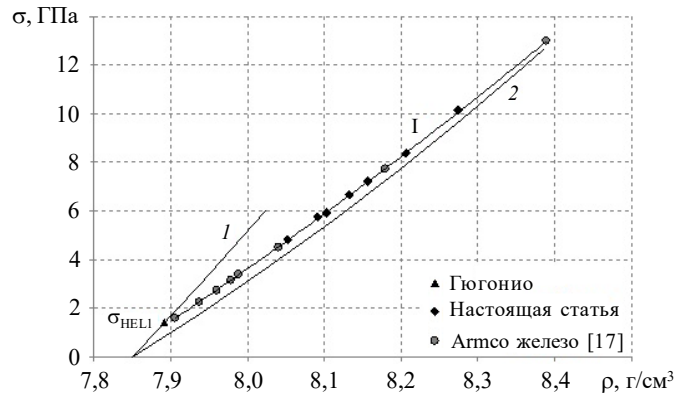


Рис. 6. Ударные адиабаты стали: 1 – упругая адиабата, 2 – адиабата Гюгоньо, I – реальная ударная адиабата

Таким образом, имея экспериментальные зависимости скорости движения свободной поверхности $W(t)$ ударно нагруженных образцов, полученные для различных интенсивностей плоской УВ, в плоскости $\sigma(\rho)$ можно определить положение реальной ударной адиабаты I. При этом упругий фронт УВ с амплитудой σ_{HEL1} будет соответствовать «упругой» ударной адиабате, а пластический тыл стремиться к ударной адиабате Гюгоньо.

Отметим также, что для опытов с относительно слабым ударным нагружением, когда ударник и образец изготовлены из одного материала, измеренные максимальные значения скорости движения свободной поверхности образцов W меньше, чем скорости ударников $W_{\text{уд}}$ (см. рис. 3). В действительности при низких давлениях эти скорости должны быть равны. Здесь уменьшение скорости W связано с повышением плотности дефектов структуры материала (дислокаций, двойников) при сжатии и с соответствующим увеличением поглощаемой энергии. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению плотности сжатого вещества за счет образованных дефектов, поэтому, как показано на рис. 6, реальная УА располагается левее адиабаты Гюгоньо. В [21] такое несоответствие скоростей определено как «дефект» массовой скорости $\delta U_{\text{деф}} = W_{\text{уд}} - W_{\text{макс}}$, который характеризует интенсивность энергообмена между различными масштабными структурными уровнями (мезо-, микро-, макро-) при динамическом воздействии на вещество. Эффект подобного рода проявляется слабее в более сильных УВ.

Заключение

Согласно представленному экспериментальному подходу построены ударные адиабаты $D(U)$ и $\sigma(\rho)$ в диапазоне ударно-волнового нагружения, соответствующего исходной α -фазе железа, где существует двухволновая конфигурация ударной волны ($D < C_L$).

В этом диапазоне динамических нагрузок сведения о сжимаемости материалов,

обладающих прочностью, отсутствуют или ограничены единичными экспериментальными данными.

Определенные параметры уравнения состояния в форме Ми – Грюнайзена стали СтЗ позволяют использовать это уравнение состояния для численного моделирования поведения вещества в низкой области ударного нагружения, где наиболее полно проявляются реологические и прочностные свойства вещества.

Авторы выражают благодарность В.Г. Симакову, В.А. Брагунцу, А.Е. Сафронову, А.О. Яговкину за помощь в проведении и обработке результатов экспериментов.

Список литературы

1. Альшутлер Л.В., Кормер С.Б., Бражник М.И. и др. Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях. *ЖЭТФ*. 1960. Т. 38. Вып. 4. С. 1061–1073.
2. Альшутлер Л.В., Кормер С.Б., Баканова А.А., Трунин Р.Ф. Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений. *ЖЭТФ*. 1960. Т. 38. №3. С. 790–798.
3. Альшутлер Л.В., Кулешова Л.В., Павловский М.Н. Динамическая сжимаемость, уравнение состояния и электропроводность хлористого натрия при высоких давлениях. *ЖЭТФ*. 1960. Т. 39. Вып. 1(7). С. 16–24.
4. *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ*. Под ред. Р.Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2006. 530 с.
5. Marsh S.P. *LASL Shock Hugoniot Data*. Berkeley: University of California Press, 1980. 658 p.
6. *Поведение веществ под воздействием сильных ударных волн*: Сб. научн. статей. Под ред. Р.Ф. Трунина, М.В. Жерноклетова Т. 1–5. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2007–2017.
7. Альшутлер Л.В., Крупников К.К., Бражник М.И. Динамическая сжимаемость металлов при давлениях от четырехсот тысяч до четырех миллионов атмосфер. *ЖЭТФ*. 1958. Т. 34. Вып. 4. С. 886–893.
8. Альшутлер Л.В., Крупников К.К., Леденев Б.Н., Жучихин В.И., Бражник М.И. Динамическая сжимаемость и уравнение состояния железа при высоких давлениях. *ЖЭТФ*. 1958. Т. 34. Вып. 4. С. 874–885.
9. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Физматлит, 2008. 656 с.
10. Танборг С., Ингрэм Г., Грехем Р. Пневматическая пушка для исследования твердых тел в широком диапазоне скоростей. *Приборы для научных исследований*. 1964. №1. С. 13–17.
11. Jones A.H., Isbell W.M., Maiden C.M. Measurement of the very high pressure properties of materials using a light gas gun. *Journal of Applied Physics*. 1966. Vol. 37. Iss. 11. P. 3493–3499.
12. Златин Н.А., Мишин Г.И. *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях*. М.: Наука, 1974. 344 с.
13. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *Journal of Applied Physics*. 1972. Vol. 43. Iss. 11. P. 4669–4675. <https://doi.org/10.1063/1.1660986>.
14. Strand O.T., Goosman D.R., Martinez C., Whitworth T.L., Kuhlow W.W. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Review of Scientific Instruments*. 2006. Vol. 77. Iss. 8. P. 083198-1–083108-8. <https://doi.org/10.1063/1.2336749>.
15. Grady D.E. Steady-wave risetime and spall measurements on uranium (3–15 GPa). In: *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*. New York: CRC Press, 1986. P. 763–780.
16. Канель Г.И. *Ударные волны в физике твердого тела*. М.: Физматлит, 2018. 208 с.
17. Arnold W. Dynamisches Werkstoffverhalten von Armco-Eisen bei Strasswellenbelastung. *Fortschr.-Ber. VDI. Reihe 5*. Dusseldorf, Germany: VDI-Verlag, 1992. No 247. 248 S. (Auf Deutsch).

18. Hollenbach R.E. Shock wave study of the α - ϵ phase transition in iron. *Journal of Applied Physics*. 1974. Vol. 45. Iss. 11. P. 4872–4887. <https://doi.org/10.1063/1.1663148>.
19. Глушак Б.Л. *Начала физики взрыва*. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011. 308 с.
20. Макаров П.В. Сдвиговая прочность и вязкость металлов в ударных волнах. В кн.: *Ударные волны и экстремальные состояния вещества*. Под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера и др. М.: Наука, 2000. С. 219–254.
21. Мещеряков Ю.И. *Многомасштабные ударно-волновые процессы в твердых телах*. СПб.: Нестор-История, 2018. 480 с.

References

1. Al'tshuler L.V., Kormer S.B., Brazhnik M.I. et al. The isentropic compressibility of aluminum, copper, lead, and iron at high pressures. *Soviet Physics*. 1960. Vol. 11. No 4. P. 766–775.
2. Al'tshuler L.V., Kormer S.B., Bakanova A.A., Trunin R.F. Equation of state for aluminum, copper, and lead in the high pressure region. *Soviet Physics*. 1960. Vol. 11. No 3. P. 573–579.
3. Al'tshuler L.V., Kuleshova L.V., Pavlovskii M.N. The dynamic compressibility, equation of state, and electrical conductivity of sodium chloride at high pressures. *Soviet Physics*. 1960. Vol. 11. No 1. P. 9–15.
4. *Eksperimentalnye dannye po udarno-volnovomu szhatiyu i adiabaticheskomu rasshireniyu kondensirovannykh veshchestv* [Experimental Data on Shock Wave Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Substances]. Ed. R.F. Trunin. Sarov. RFYaTs–VNIIEF Publ. 2006. 530 p. (In Russian).
5. Marsh S.P. *LASL Shock Hugoniot Data*. Berkeley. University of California Press. 1980. 658 p.
6. *Povedenie veshchestv pod vozdeystviem silnykh udarnykh voln*. Sbornik nauchnykh statey. Pod red. R.F. Trunina, M.V. Zhernokletova. Tom. 1–5 [Behavior of Substances Under the Influence of Strong Shock Waves. Collection of scientific articles. Eds. R.F. Trunin, M.V. Zhernokletov. Vol. 1–5]. Sarov. RFYaTs–VNIIEF Publ. 2007–2017 (In Russian).
7. Al'tshuler L.V., Krupnikov K.K., Brazhnik M.I. Dynamic compressibility of metals under pressures from 400,000 to 4,000,000 atmospheres. *Soviet Physics*. 1958. Vol. 34(7). No 4. P. 614–619.
8. Al'tshuler L.V., Krupnikov K.K., Ledenev B.N., Zhuchikhin V.I., Brazhnik M.I. Dynamic compressibility and equation of state of iron under high pressure. *Soviet Physics*. 1958. Vol. 34(7). No 4. P. 606–614.
9. Zeldovich Ya.B., Rayzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 656 p. (In Russian).
10. Thunborg S., Ingram G., Graham R. Compressed gas gun for controlled planar impacts over a wide velocity range. *Review of Scientific Instruments*. 1964. Vol. 35. No 1. P. 11–14.
11. Jones A.H., Isbell W.M., Maiden C.M. Measurement of the very high pressure properties of materials using a light gas gun. *J. Appl. Phys.* 1966. Vol. 37. Iss. 11. P. 3493–3499.
12. Zlatin N.A., Mishin G.I. *Ballisticheskie ustanovki i ikh primenenie v eksperimentalnykh issledovaniyakh* [Ballistic Installations and their Use in Experimental Research]. Moscow. Nauka Publ. 1974. 344 p. (In Russian).
13. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *J. Appl. Phys.* 1972. Vol. 43. Iss. 11. P. 4669–4675. <https://doi.org/10.1063/1.1660986>.
14. Strand O.T., Goosman D.R., Martinez C., Whitworth T.L., Kuhlow W.W. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Rev. Sci. Instrum.* 2006. Vol. 77. Iss. 8. P. 083198-1–083198-8. <https://doi.org/10.1063/1.2336749>.
15. Grady D.E. Steady-wave risetime and spall measurements on uranium (3–15 GPa). In: *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*. New York. CRC Press. 1986. P. 763–780.
16. Kanel G.I. *Udarnye volny v fizike tverdogo tela* [Shock Waves in Solid State Physics]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2018. 208 p. (In Russian).

17. Arnold W. Dynamisches Werkstoffverhalten von Armco-Eisen bei Strasswellenbelastung. *Fortschr.-Ber. VDI*. Reine 5. Dusseldorf, Germany: VDI-Verlag. 1992. No 247. 248 S. (Auf Deutsch).
18. Hollenbach R.E. Shock wave study of the α - ε phase transition in iron. *J. Appl. Phys.* 1974. Vol. 45. Iss. 11. P. 4872–4887. <https://doi.org/10.1063/1.1663148>.
19. Glushak B.L. *Nachala fiziki vzryva [The Beginnings of Explosion Physics]*. Sarov. RFYaTs–VNIIEF Publ. 2011. 308 p. (In Russian).
20. Makarov P.V. Sdvigovaya prochnost i vyazkost metallov v udarnykh volnakh. *V kn.: Udarnye volny i ekstremalnye sostoyaniya veshchestva*. Pod red. V.E. Fortova, L.V. Altshulera i dr. [*Shock Waves and Extreme States of Matter*. Eds. V.E. Fortov, L.V. Altshuler et al.] Moscow. Nauka Publ. 2000. P. 219–254 (In Russian).
21. Meshcheryakov Yu.I. *Mnogomasshtabnye udarno-volnovye protsessy v tverdykh telakh [Multiscale Shock Wave Processes in Solids]*. Saint Petersburg. Nestor-Istoriya Publ. 2018. 480 p. (In Russian).

COMPRESSION OF STEEL St3 BY A “WEAK” SHOCK WAVE*

Nazarov D.V.¹, Trunin I.R.^{1,2}, Bazhenov D.A.¹, Shestakov E.E.¹, Gnutov I.S.¹

¹*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russian Federation*

²*Sarov Institute of Physics and Technology of the NRNU “MEPhI”, Sarov, Russian Federation*

staff@vniief.ru

Received by the Editor 2025/03/26

An experimental approach is presented that makes it possible to consider the pattern of wave interactions near the free surface of shock-loaded samples and their effect on the movement of the free surface.

Shock wave experiments were conducted in which samples of steel St3 of different thicknesses were loaded with impactors made of the same material. The experiments were carried out on a light-gas “cannon” (working helium gas), the impactor was accelerated to speeds of 500 m/s; wave processes were diagnosed by recording the velocity of the free surface using a laser heterodyne interferometer. In the frontal section of the dependence of the velocity of the free surface of the sample on time, features in the form of “steps” are distinguished, which correspond to the exits to the free surface of an elastic wave (the first elastic precursor) propagating through the sample at the longitudinal speed of sound, and a re-reflected elastic wave from a plastic shock wave (the second elastic precursor). It is proposed to estimate the value of the velocity of the shock wave in the case of its elastic-plastic configuration by recording the time of the release of elastic precursors on the free surface of the sample.

The shock adiabats of steel St3 are constructed, depending on the velocity of the shock wave on the mass velocity behind the wave front and the stress on the density of steel in the loading range up to a pressure of 13 GPa, corresponding to the beginning of the α - ε phase transition in iron.

The parameters of the equation of state of steel St3 in the Mi – Gruneisen form are determined, which make it possible to use this equation of state for numerical modeling of the behavior of matter in the low region of shock loading.

Keywords: steel St3, free surface velocity, elastic precursor, shock wave, shock adiabetic, equation of state.

* The article was implemented in the framework of the scientific program of the National Center of Physics and Mathematics under the State Contract No H.4ts.241.4D.23.1085.