

УДК 533.6.011.72; 539.389.1

ПЕРЕОТРАЖЕНИЯ УПРУГОГО ПРЕДВЕСТНИКА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

© 2021 г. Член-корреспондент РАН Г. И. Канель^{1,2,*}, А. С. Савиных^{1,2,**},
Г. В. Гаркушин^{1,2}, С. В. Разоренов^{1,2}

Поступило 22.12.2020 г.

После доработки 24.12.2020 г.

Принято к публикации 25.12.2020 г.

На примере экспериментальных данных по отражению упругопластической волны ударного сжатия от поверхности пластины из стали или алюминиевого сплава обсуждаются условия и закономерности формирования переотраженной упругой волны. Обнаружено, что возможность ее образования, а также ее амплитуда и затухание связаны с релаксационными свойствами материала в состоянии перед пластической ударной волной.

Ключевые слова: высокоскоростная деформация, ударные волны, динамический предел текучести, высокие температуры

DOI: 10.31857/S2686740021010065

Исследования эволюции упругопластических волн ударного сжатия различных материалов ведутся с целью получения информации о зависимости напряжения пластического течения от скорости деформации в диапазоне от $\sim 10^3$ до 10^7 с⁻¹ [1, 2]. В экспериментах ударом пластины или иным способом в образце исследуемого материала генерируется плоская волна сжатия, структура и эволюция которой регистрируются путем измерения профиля напряжения сжатия $\sigma_x(t)$ или массовой скорости $u(t)$ как функций времени t . В наиболее простой и наиболее часто используемой постановке проводится измерение профиля скорости свободной поверхности образца $u_f(t)$ в процессе выхода на нее волны сжатия. Исследования такого рода актуальны для построения и проверки определяющих соотношений и моделей деформации в экстремальных условиях, о чем свидетельствует их частое цитирование.

На рис. 1 показаны результаты серии подобных опытов с образцами стали различной толщины. Эксперименты проведены с использованием лазерного доплеровского интерферометрического измерителя скорости VISAR [3] для регистра-

ции формируемых ударом волновых профилей. Детальное описание экспериментов будет представлено в отдельной статье, посвященной динамическим прочностным характеристикам стали. На профилях скорости свободной поверхности фиксируется последовательно выход на поверхность упругого предвестника волны сжатия (первая “ступенька”) и следующей за ним пластической ударной волны. Скорость распространения упругого предвестника практически равна продольной скорости звука $c_l = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho}$, а скорость пластической ударной волны определяется объемной сжимаемостью материала и, соответственно, близка к объемной скорости звука $c_b = \sqrt{K/\rho}$ [2, 4]. Амплитуда упругого предвестника определяется динамическим пределом упругости материала HEL (Hugoniot elastic limit):

$$\sigma_{\text{HEL}} = 0.5u_{\text{HEL}}\rho_0c_l, \quad (1)$$

где u_{HEL} – скачок скорости свободной поверхности в предвестнике. На части представленных волновых профилях видны также дополнительные ступеньки RR, которые появились после отражения упругого предвестника от свободной поверхности и взаимодействия образовавшейся отраженной упругой волны разгрузки с пластической ударной волной [2]. Такое переотражение наблюдается не всегда и, в частности, не регистрируется на приведенных профилях скорости свободной поверхности образцов стали толщиной менее 2 мм.

На рис. 2 сопоставлены волновые профили, измеренные для образцов стали толщиной 4 мм

¹ Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт проблем химической физики Российской
академии наук, Черноголовка, Московская обл., Россия

*E-mail: kanel@icp.ac.ru

**E-mail: savas@icp.ac.ru

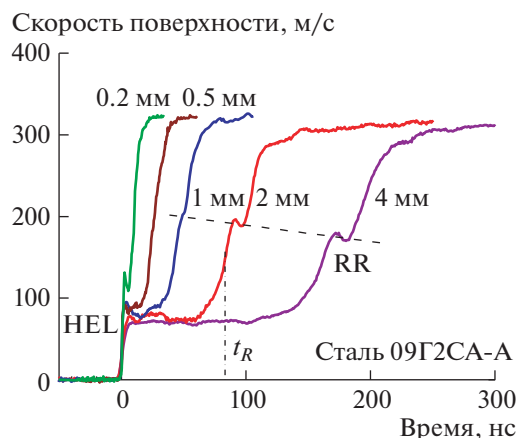


Рис. 1. Профили скорости свободной поверхности образцов стали 09Г2СА-А различной толщины, измеренные при ударе медной пластиной со скоростью 340 ± 10 м/с. Показаны номинальные значения толщины образца. RR – результат переотражения упругой волны. HEL – динамический предел упругости, t_R – момент выхода переотраженной упругой волны на поверхность.

при нормальной и повышенной температурах. Несмотря на четкое выделение упругого предвестника ударной волны в стали при повышенной температуре переотражение упругой волны в этом случае не регистрируется. Эти обстоятельства (появление или отсутствие переотражения упругой волны в зависимости от температуры и геометрических или временных характеристик процесса) позволяют ожидать, что более детальный анализ явления должен обеспечить получение дополнительной информации о поведении материалов в этих условиях, необходимой для построения определяющих соотношений и моделей [5, 6] высокоскоростной деформации.

Для идеального упругопластического материала с постоянным пределом текучести детальный анализ отражений упругого предвестника можно найти в [2]. После выхода упругого предвестника на свободную поверхность появляется отраженная волна, которая является упругой волной разрежения. В отраженной волне, распространяющейся в обратном направлении навстречу пластической ударной волне, напряжение сжатия возвращается к нулю. В результате, после встречи отраженной волны разгрузки с падающей пластической ударной волной напряжение сжатия перед последней оказывается равным нулю, и становится вновь возможным и необходимым выделение упругого предвестника – “переотраженной” упругой волны. В случае идеального упругопластического тела скорость поверхности в точке RR должна быть практически равна удвоенной скорости поверхности за фронтом предвестника, а параметры упругого предвестника и переотра-

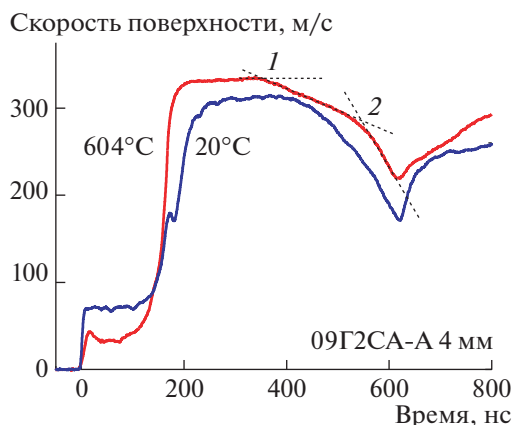


Рис. 2. Результаты опытов с образцами стали 09Г2СА-А толщиной 4 мм при комнатной температуре и 604°C.

женной упругой волны должны сохраняться неизменными по мере их распространения. Заметим также, что при постоянном пределе текучести неупругая деформация имеет место только в пластической ударной волне и не происходит за фронтом упругого предвестника.

В экспериментах подобное переотражение упругого предвестника наблюдается часто, но отнюдь не всегда, а его характер отличается тем, что параметры в переотраженной волне, как правило, выше ожидаемых для неизменного предела текучести и могут изменяться по мере распространения волнового комплекса, как это видно, в частности, на рис. 1. Более внимательное сопоставление волновых профилей на рис. 1 четко демонстрирует затухание упругого предвестника по мере его распространения на расстоянии до 1 мм. Затухание происходит вследствие релаксации напряжений при развитии пластической деформации за фронтом предвестника [1, 2, 7]. При этом, как показывает анализ подобных экспериментов с различными металлами и сплавами [1, 8], зависимости скорости пластической деформации от напряжения оказываются значительно более сильными, чем линейные, что дает основание для утверждения об интенсивном размножении подвижных дислокаций на самых ранних стадиях процесса в упругом предвестнике. Прекращение затухания предвестника на расстояниях, в данном случае более 1 мм, означает прекращение пластической деформации и, соответственно, прекращение размножения дислокаций за его фронтом. Таким образом, переотражение на больших расстояниях и его отсутствие на малых расстояниях находятся в корреляции с плотностью подвижных дислокаций перед пластической ударной волной. Малая плотность дислокаций означает, что состояние материала перед пластической ударной волной близко к исходному и процесс его сжатия должен быть подобен процессу упругопластического

ударного сжатия исходного материала. Увеличенная плотность подвижных дислокаций, по-видимому, переводит материал в вязкоупругое состояние с пониженным пределом текучести. При высокой температуре затухание предвестника имеет место в более широком диапазоне толщин образцов, поэтому переотражение в высокотемпературном опыте на рис. 2 не фиксируется.

Ситуация с формированием затухающей переотраженной упругой волны анализировалась и получила подтверждение при исследовании ударного и безударного сжатия ванадия [9]. Ожидаемая амплитуда переотраженного предвестника должна соответствовать расстоянию его распространения $h^* = c_l t_R / 2$, где t_R – момент выхода на поверхность переотраженной упругой волны, как показано на рис. 1; время отсчитывается от выхода на поверхность упругого предвестника. Для образца толщиной 4 мм $h^* = 0.47$ мм, а для двухмиллиметрового образца $h^* = 0.24$ мм. В соответствии с данными по затуханию предвестника амплитуда переотраженной волны должна на 30% в первом случае или на 60% во втором превышать NEL, что в общем соответствует представленным волновым профилям.

В экспериментах не наблюдается четкого выделения упругого предвестника конечной амплитуды при разгрузке. Вместо этого формируется так называемая квазиупругая волна разгрузки, в которой скорость распространения возмущения плавно уменьшается от продольной скорости звука c_l до скорости звука c_b , соответствующей объемной сжимаемости материала. В работах [10, 11] предложен и реализован упрощенный способ оценки напряжения пластического течения при разгрузке, который основан на приближении простой волны и включает аппроксимацию квазиупругой части волны прямой линией 1–2, как показано на рис. 2, предположение о постоянстве коэффициента Пуассона и линейное соотношение между скоростью звука в лагранжевых координатах и массовой скоростью. Разность в величинах сдвиговых напряжений, соответствующих значениям массовой скорости на фронте квазиупругой волны разгрузки u_{p1} (точка 1 на рис. 2) и в ее конце u_{p2} (точка 2) в приближении простой волны описывается соотношением [12]

$$\begin{aligned} \tau(u_{p1}) - \tau(u_{p2}) = \\ = \frac{3}{4} \rho_0 \int_{u_{p2}}^{u_{p1}} [a^2(u_p) - a_b^2(u_p)] \frac{du_p}{a(u_p)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ρ_0 – плотность вещества в исходном состоянии при нулевом давлении, скорость распространения возмущений в квазиупругой волне a берется в координатах Лагранжа (т.е. отнесена к начальной плотности материала ρ_0), a_b – объемная скорость звука. Остальные детали расчета

можно найти в [8, 9]. Так как при разгрузке из ударно-сжатого состояния сдвиговое напряжение переходит через нуль и выходит на напряжение пластического течения с обратным знаком, соотношение (2) фактически определяет предел текучести ударно-сжатого материала. Применение этого анализа к профилю скорости свободной поверхности образца стали толщиной 4 мм при температуре 604°C дало значение предела текучести при разгрузке из ударно-сжатого состояния $\sigma_T = 164$ МПа, тогда как в упругом предвестнике $\sigma_T = 390$ МПа в точке минимума. Таким образом, налицо значительное падение предела текучести после высокоскоростной деформации в ударной волне. Возможно этот эффект и является причиной того, что переотраженная упругая волна в высокотемпературных опытах и в экспериментах с тонкими образцами при комнатной температуре не фиксируется.

На рис. 3 показаны профили скорости свободной поверхности при ступенчатом ударном сжатии образцов алюминиевого сплава Д16Т толщиной номинально 5 мм в состоянии поставки и в отожженном состоянии. Организация опытов подобна описанной в работе [13]. Эти эксперименты интересны тем, что в опыте с неотожженным прокатанным материалом мы видим переотражение упругой волны от второй пластической волны сжатия, т.е. заведомо после некоторой пластической деформации. Проведенные ранее измерения показали отсутствие затухания упругого предвестника в неотожженном сплаве на расстояниях больше ста микрон. Нарастание параметров за фронтом упругого предвестника в неотожженном сплаве есть результат деформационного упрочнения. Другой особенностью ступенчатого сжатия является наличие слабого упругого предвестника E2 перед второй ударной волной в обоих материалах, что является проявлением упруго-вязких свойств ударно-сжатого сплава.

Вязкоупругое поведение материалов за ударной волной говорит о наличии некоторого количества подвижных дислокаций, обеспечивающих релаксацию напряжений, и в отожженном, и в исходном материале. Тем не менее, переотражение упругой волны регистрируется только в неотожженном сплаве. Иными словами, существует некоторый критерий, определяющий возможность переотражения упругой волны по плотности дислокаций или времени релаксации напряжений.

Таким образом, показано, что формирование переотраженной упругой волны при отражении упругопластической волны ударного сжатия от поверхности тела, ее амплитуда и затухание связаны с релаксационными свойствами материала в состоянии перед пластической ударной волной. Даже качественный анализ подобных переотра-

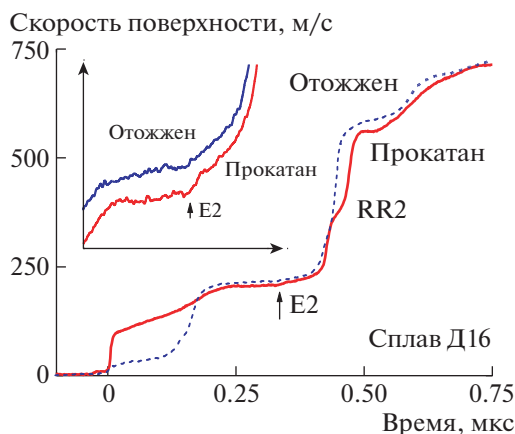


Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности при ступенчатом ударном сжатии образцов алюминиевого сплава Д16Т толщиной 5 мм в состоянии поставки (сплошная линия) и в отожженном состоянии (штриховая линия). RR2 – переотражение от второй пластической ударной волны. E2 – упругий предвестник второй волны сжатия. Вставка показывает область фронта предвестника второй волны в увеличенном масштабе.

жений может быть информативен с точки зрения оценки состояния материала перед пластической ударной волной.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по темам Государственного задания, номера государственной регистрации АААА-А19-119071190040-5 и АААА-А19-119030590034-7. Ударно-волновые эксперименты проведены на оборудовании Московского регионального взрывного ЦКП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канель Г.И., Зарецкий Е.Б., Разоренов С.В. и др. Необычные пластичность и прочность металлов при

ультракоротких длительностях нагрузки // УФН. 2017. Т. 187. № 5. С. 525–545.

2. Канель Г.И. Ударные волны в физике твердого тела. М.: Физматлит, 2018. 208 с.
3. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. № 11. P. 4669–4675.
4. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
5. Meyers M.A., Benson D.J., Vohringer O., et al. Constitutive description of dynamic deformation: physically-based mechanisms // Mater. Sci. Eng. A. 2002. V. 322. P. 194–216.
6. Popova T.V., Mayer A.E., Khishchenko K.V. Evolution of shock compression pulses in polymethylmethacrylate and aluminum // J. Appl. Phys. 2018. V. 123. 235902.
7. Duvall G.E. Propagation of plane shock waves in a stress-relaxing medium / In: Stress Waves in Anelastic Solids / Ed. H. Kolsky, W. Prager. B.: Springer-Verlag, 1964. P. 20.
8. Kanel G.I. Rate and temperature effects on the flow stress and tensile strength of metals // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1426. P. 939–944.
9. Kanel G.I., Razorenov S.V., Garkushin G.V., et al. Stress relaxation in vanadium under shock and shockless dynamic compression // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. № 4. 045901.
10. Канель Г.И., Савиных А.С. Оценка напряжения пластического течения твердых тел при разгрузке из ударно-сжатого состояния // ДАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 490. № 1. С. 29–32.
11. Kanel G.I., Savinykh A.S., Garkushin G.V., et al. Effects of temperature on the flow stress of aluminum in shock waves and rarefaction waves // J. Appl. Phys. 2020. V. 127. 035901.
12. Brown J.L., Alexander C.S., Asay J.R., et al. Extracting strength from high pressure ramp-release experiments // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. 223518.
13. Kanel G.I., Savinykh A.S., Garkushin G.V., et al. Step-wise shock compression of aluminum at room and elevated temperatures // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. 075901.

RE-REFLECTIONS OF AN ELASTIC PRECURSOR OF SHOCK WAVE IN SOLIDS

Corresponding Member of the RAS G. I. Kanel^{a,b}, A. S. Savinykh^{a,b},
G. V. Garkushin^{a,b}, and S. V. Razorenov^{a,b}

^a Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation

Using experimental data on the reflection of an elastic-plastic shock wave from the free surface of a steel or aluminum alloy plate, the conditions and regularities of the formation of a re-reflected elastic wave are discussed. It is shown that the possibility of its formation, as well as its amplitude and attenuation, are related to the relaxation properties of the material in the state in front of the plastic shock wave.

Keywords: high strain rates, shock waves, dynamic yield stress, high temperatures