ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ФИЗИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ, 2020, том 490, с. 29–32

ФИЗИКА

УДК 533.6.011.72: 539.389.1

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ РАЗГРУЗКЕ ИЗ УДАРНО-СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ

© 2020 г. Член-корреспондент РАН Г. И. Канель[1], А. С. Савиных[2,*]

Поступило 14.10.2019 г.
После доработки 14.10.2019 г.
Принято к публикации 30.10.2019 г.

Предложен, протестирован и апробирован простой способ оценки предела текучести ударно-сжатого материала по измеренному единичному профилю скорости свободной поверхности. Впервые проведена экспериментальная оценка динамического предела текучести σ_T ударно-сжатого металла (алюминия) при повышенной температуре. Найдено, что его величина меньше, чем при комнатной температуре, и ниже начального значения динамического предела текучести при высокой температуре.

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

DOI: 10.31857/S2686740020010071

Сопротивление высокоскоростному пластическому деформированию твердых тел при длительностях нагрузки порядка микросекунды или менее исследуется путем анализа эволюции профилей массовой скорости $u_p(t)$ или напряжения сжатия $\sigma_x(t)$ как функции времени t по мере распространения импульса ударного сжатия в исследуемом материале [1–6]. В данной работе предлагается простой способ оценки напряжения пластического течения ударно-сжатого материала по измеренному единичному профилю скорости свободной поверхности $u_{fs}(t)$. Измерение $u_{fs}(t)$ является наиболее доступным и точным способом регистрации волн сжатия и разрежения, пригодным также для экспериментов при повышенных температурах.

Предлагаемый способ оценки протестирован на примере показанного на рис. 1 профиля скорости свободной поверхности, который получен путем численного моделирования соударения алюминиевых пластин. Расчет проведен с использованием двухэлементной модели Мазинга [7], детали которой приведены в [8]. Модель Мазинга воспроизводит эффект Баушингера, расчеты ударно-волновых явлений с ее использованием дают хорошее согласие с экспериментальными данными. Показанный на рис. 1 профиль $u_{fs}(t)$ демонстрирует четкое выделение упругого предвестника в волне сжатия, амплитуда которого равна динамическому пределу упругости (HEL, Hugoniot Elastic Llimit). Предел текучести σ_T связан с величиной динамического предела упругости σ_{HEL} соотношением

$$\sigma_T = \frac{3}{2}\sigma_{\mathrm{HEL}}\left(1 - \frac{c_b^2}{c_l^2}\right), \qquad (1)$$

где c_l – продольная скорость звука, $c_b = \sqrt{K/\rho}$ – объемная скорость звука, K – объемный модуль упругости, ρ – плотность. В идеальном упругопластическом теле упругий предвестник должен выделяться также в волне разгрузки, распространяющейся вслед за волной сжатия. Его амплитуда должна быть равна удвоенному значению HEL. На практике переход от упругой к пластической деформации обычно размыт из-за сильного эффекта Баушингера. Лидирующую часть волны разрежения в таких случаях часто называют квазиупругой волной.

Будем анализировать квазиупругую волну разрежения в приближении простой волны. Согласно [9], разность в величинах сдвиговых напряжений, соответствующих двум значениям массовой скорости u_{p1} и u_{p2} в простой волне разрежения, выражается соотношением

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

[1]*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия*
[2]*Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Московская обл., Россия*
**E-mail: savas@ficp.ac.ru*

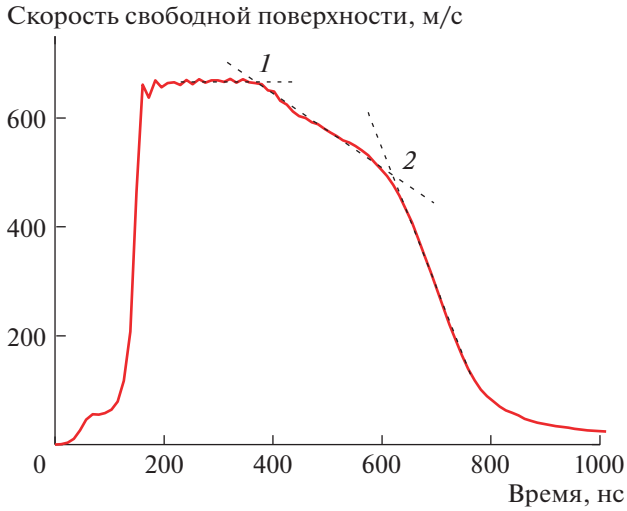

Рис. 1. Профиль скорости свободной поверхности алюминиевой пластины, рассчитанный с использованием модели Мазинга.

Здесь фазовая скорость a и объемная скорость звука a_b взяты в координатах Лагранжа, напряжение $\sigma_x(\varepsilon)$ и деформация ε принимаются положительными при сжатии. 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. Для простых оценок сделаем следующие допущения. Зависимость $a_b(u_p)$ опишем соотношением, которое получается в предположении совпадения ударной адиабаты и римановой изэнтропы в координатах p–u_p [2, 10]:

$$a_b = c_0 + 2bu_p, \tag{3}$$

где c_0, b – коэффициенты линейного выражения для ударной адиабаты, связывающего скорость ударной волны U_s и массовую скорость: $U_s = c_0 + bu_p$. Возьмем для оценки зависимость $a(u_p)$ также в форме соотношения (3) с коэффициентами c_x и b_x. Тогда соотношение (2) принимает вид

$$\tau(u_{p1}) - \tau(u_{p2}) = \\ = \frac{3}{4}\rho_0 \int_{u_{p2}}^{u_{p1}} \frac{(c_x + 2b_x u_p)^2 - (c_0 + 2bu_p)^2}{c_x + 2b_x u_p} du_p. \tag{4}$$

Точность соотношения (4) оценена сопоставлением с непосредственными результатами компьютерного моделирования, в котором напряжение пластического течения перед началом разгрузки и после ее завершения составило σ_T = 0.215 ГПа. Квазиупругая часть волны разрежения на рассчитанном профиле скорости свободной поверхности аппроксимирована прямой линией *1–2* на рис. 1. Скорость фронта волны разрежения (точка *1*) равна продольной скорости звука a_l, которую мы определяем в предположении постоянства коэффициента Пуассона как $a_l(u_{p1}) = a_b(u_{p1})c_l/c_0$.

Ранее было показано [2, 10], что это приближение хорошо согласуется с экспериментальными данными. В конце квазиупругого участка (точка *2*) скорость волны разрежения равна объемной скорости звука $a_b(u_{p2})$. Величина массовой скорости определяется по измеренному профилю скорости свободной поверхности в соответствии с правилом удвоения как

$$u_p = \frac{u_{fs} + \delta_{ep}}{2},$$

где δ_{ep} – поправка, учитывающая гистерезис цикла упругопластического сжатия и разгрузки. Поправка к величине u_{p1} равна $\delta_{ep} = \frac{\sigma_{\text{HEL}}}{\rho}\left(\frac{1}{c_b} - \frac{1}{c_l}\right)$ [11] и в данном примере составляет 5.5 м/с. Поправка к величине u_{p2} равна нулю вследствие взаимодействия падающей и отраженной волн разрежения. Линейная зависимость $a(u_p)$ проведена через найденные значения $a_l(u_{p1})$ и $a_b(u_{p2})$. Подстановка этих данных в соотношение (4) дала величину $\tau(u_{p1}) - \tau(u_{p2})$ = 0.209 ГПа, т.е. весьма близко к реальному значению 0.215 ГПа, задаваемому использовавшейся в расчетах моделью.

Апробированный выше способ оценки предела текучести ударно-сжатого материала применен к результатам опытов с алюминием АД1, показанным на рис. 2. В проведенных экспериментах импульсы сжатия в плоских образцах толщиной 2.9 мм генерировались ударом пластины из алюминия А5М толщиной 0.72 мм, разогнанной до скорости 355 ± 10 м/с с помощью газовой пушки. Соотношение толщин ударника и образца специально выбрано таким малым, чтобы параметры волны разрежения, регистрируемой на профиле скорости свободной поверхности, определялись свойствами образца, а вклад материала ударника был незначителен. Для регистрации профилей скорости свободной поверхности $u_{fs}(t)$ использовался лазерный интерферометрический измеритель скорости VISAR [12]. Эксперименты проведены при комнатной температуре и 498°С. Видно, что амплитуда упругого предвестника при высокой температуре в несколько раз выше, чем при комнатной, что объясняется большим вкладом фононной вязкости при высоких скоростях деформации [2, 3, 13]. Квазиупругие участки волн разрежения при нормальной и повышенной температурах зрительно примерно одинаковы. Второй подъем скорости свободной поверхности на представленных волновых профилях связан с откольным разрушением и вызванной им релакса-

цией растягивающих напряжений внутри образца [2].

Оценки проведены с учетом температурных зависимостей плотности и модулей упругости алюминия по данным работы [14]. Ударная адиабата алюминия АД1 по данным работы [15] при комнатной температуре была взята в виде $U_s = 5.32 + 1.37u_p$, $\rho_0 = 2.71$ г/см^3, $c_l = 6.4$ км/с. Ударная адиабата алюминия при температуре ~500°C и плотности $\rho_0 = 2.59$ г/см^3 взята с использованием объемного модуля упругости из [14] в виде $U_s = 5.05 + 1.37u_p$ км/с, $c_l = 5.88$ км/с. Коэффициент b при массовой скорости здесь тот же, что и при комнатной температуре; для ударных волн малой интенсивности его неточность не может привести к существенным погрешностям.

При комнатной температуре величина σ_{HEL} составила 0.12 ГПа, соответствующее значение $\sigma_T = 0.056$ ГПа. При 498°C величина σ_{HEL} составила 0.28 ГПа, $\sigma_T = 0.11$ ГПа. Квазиупругая часть волны разрежения определялась пересечением прямых, аппрокимирующих два режима деформации при разгрузке, как показано на рис. 2. При комнатной температуре она соответствует падению скорости свободной поверхности от 336 до 270 м/с. Оценка в описанном выше приближении дает величину динамического предела текучести ударно-сжатого алюминия 0.077 ГПа. Превышение начальной величины $\sigma_T = 0.056$ ГПа вполне объясняется деформационным упрочнением и влиянием высокого давления. Деформационное упрочнение проявляется также в нарастании параметров за фронтом упругого предвестника волны сжатия. При температуре 498°C квазиупругая часть волны разрежения соответствует уменьшению u_{fs} от 350 до 286 м/с, что дает величину предела текучести в ударно-сжатом состоянии 0.054 ГПа, т.е. в 5 раз ниже величины в упругом предвестнике сжатия и существенно меньше, чем при комнатной температуре.

Таким образом, впервые проведена экспериментальная оценка динамического предела текучести ударно-сжатого металла при высокой температуре. В то время, как параметры упругопластических волн сжатия демонстрируют аномальное возрастание напряжения высокоскоростного пластического течения увеличением температуры, подобная аномалия при разгрузке из ударно-сжатого состояния не зафиксирована. Полученный результат позволяет сделать некоторые предварительные заключения относительно динамики дислокаций. Скорость пластической деформации, как известно, пропорциональна произведению плотности подвижных дислокаций и их скорости, причем последняя возрастает с увеличением действующего напряжения. В процессе деформации происходит размножение дислокаций, вследствие чего высокая скорость деформации становится возможной при меньшей скорости дислокаций и, соответственно, меньшем напряжении. Сопоставление полученных результатов при 20 и 498°C дает основание для утверждения о более быстром размножении дислокаций при высоких температурах.

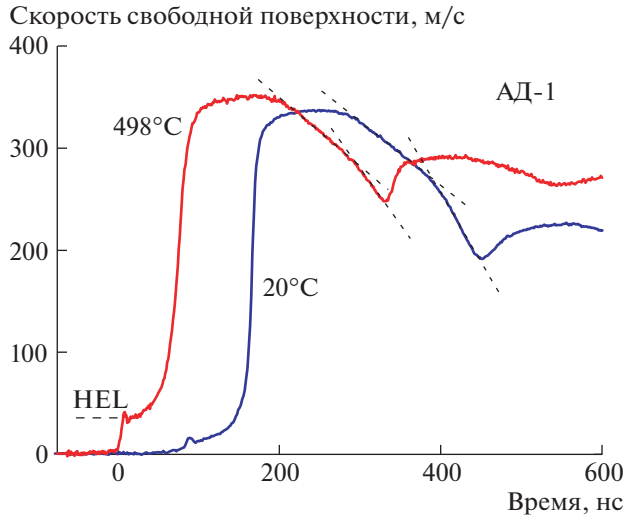

Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности образцов алюминия АД1 при комнатной температуре и 498°C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
2. *Канель Г.И.* Ударные волны в физике твердого тела. М.: Физматлит, 2018.
3. *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. https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.12.038004
4. *Дремин А.Н., Канель Г.И.* Волны сжатия и разрежения в ударно-сжатых металлах // ПМТФ. 1976. № 2. С. 146–153.
5. *Asay J.R., Lipkin J.* A Self-Consistent Technique for Estimating the Dynamic Yield Strength of a Shock-Loaded Material // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. № 7. P. 4242–4247. https://doi.org/10.1063/1.325340
6. *Vogler T.J.* On Measuring the Strength of Metals at Ultrahigh Strain Rates // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. № 5. 053530. https://doi.org/10.1063/1.3204777
7. *Гохвельд Д.А., Садаков О.С.* Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. М.: Машиностроение, 1984.

8. *Kanel G.I., Razorenov S.V., Bogach A., et al.* Simulation of Spall Fracture of Aluminum and Magnesium over a Wide Range of the Load Duration and Temperature // Int. J. Impact Eng. 1997. V. 20. № 6–10. P. 467–478. https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)87435-0
9. *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. № 22. 223518. https://doi.org/10.1063/1.4847535
10. *Воробьев А.А., Дремин А.Н., Канель Г.И.* Зависимость коэффициентов упругости алюминия от степени сжатия в ударной волне // ПМТФ. 1974. № 5. С. 94–100.
11. *Kanel G.I., Savinykh A.S., Garkushin G.V., et al.* Stepwise Shock Compression of Aluminum at Room and Elevated Temperatures // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. № 7. 075901. https://doi.org/10.1063/1.5099214
12. *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. https://doi.org/10.1063/1.1660986
13. *Альшиц В.И., Инденбом В.Л.* Динамическое торможение дислокаций // УФН. 1975. Т. 115. № 1. С. 3–39. https://doi.org/10.3367/UFNr.0115.197501a.0003
14. *Gerlich D., Fisher E.S.* The High Temperature Elastic Moduli of Aluminum // J. Phys. Chem. Solids. 1969. V. 30. № 5. P. 1197–1205. https://doi.org/10.1016/0022-3697(69)90377-1
15. *Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Трунин Р.А., и др.* Экспериментальные данные по ударной сжимаемости и адиабатическому расширению конденсированных веществ при высоких плотностях энергии. Черноголовка: Изд-во ИХФЧ, 1996.

EVALUATION OF THE YIELD STRESS OF SOLIDS AT UNLOADING FROM THE SHOCK-COMPRESSED STATE

Corresponding Member of the RAS G. I. Kanel[1] and A. S. Savinykh[2]

[1]*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[2]*Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, Russian Federation*

Received October 14, 2019

A simple method for estimating the yield stress of shock-compressed material from the measured unit free surface velocity history is proposed, verified and approbated. For the first time, an experimental evaluation of the dynamic yield stress of a shock-compressed metal (aluminum) at an elevated temperature was carried out. It has been found that its value is less than that at room temperature and less than the initial value of the dynamic yield stress at high temperature.

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