

Динамическая прочность расплавов олова и свинца

Г. И. Канель¹⁾, А. С. Савиных, Г. В. Гаркушин, С. В. Разоренов

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

Поступила в редакцию 9 июля 2015 г.

После переработки 28 августа 2015 г.

Найден способ и проведены измерения динамической прочности на разрыв (откольной прочности) расплавов олова и свинца. Сопоставление с аналогичными измерениями откольной прочности этих металлов при комнатной температуре показывает, что плавление уменьшает сопротивление разрыву по крайней мере на порядок. Откольная прочность жидких металлов составляет меньшую долю предельно возможной (“идеальной”) прочности, чем это имеет место для воды и органических жидкостей.

DOI: 10.7868/S0370274X15200138

Вопрос о динамической прочности расплавов металлов возникает при анализе работы жидкометаллических теплоносителей перспективных импульсных энергетических установок, расчетах функционирования противометеоритных защитных экранов космических аппаратов, анализе кинетики зарождения и роста паровой фазы и решении других подобных задач. В субмикросекундном диапазоне длительностей нагрузки прочность твердых тел и жидкостей на растяжение определяется путем анализа откольных явлений, возникающих при отражении импульса сжатия от свободной поверхности образца. При этом величина разрушающих напряжений при отколе определяется из анализа методом характеристик измеренного профиля скорости свободной поверхности как функции времени [1, 2].

Такого рода измерения проведены для широкого круга металлов и неметаллических материалов в твердом состоянии [1–3] в широком диапазоне длительностей нагрузки при нормальных и повышенных температурах, а также для воды [4, 5] и некоторых органических жидкостей [6]. При этом оказалось, что при отколе в жидкости реализуются весьма высокие отрицательные давления, достигающие 15–20 % предельно возможных значений – так называемой идеальной прочности [2, 6]. В этом отношении жидкости подобны гомогенным монокристаллам металлов. При откольном разрушении поликристаллических металлов обычно реализуется вдвое меньшая часть идеальной прочности вследствие наличия в них множества центров зарождения разрушений.

Опубликовано несколько работ [7, 8], в которых предпринимались попытки оценки откольной проч-

ности олова и свинца, нагретых до температуры плавления ударно-волновым сжатием до высоких давлений. С приближением остаточной (после разгрузки) температуры к температуре плавления откольная прочность олова падала практически до нуля. Опыты со свинцом также демонстрировали значительное падение его откольной прочности. С другой стороны, опыты с предварительно нагретым алюминиевым сплавом [9] обнаружили значительное сопротивление откольному разрушению в двухфазных (твердое тело + жидкость) состояниях при концентрациях жидкой фазы до 20 %. Недостаток экспериментальных данных стимулирует теоретические исследования импульсного разрушения жидкостей, в том числе с привлечением методов молекулярной динамики [10, 11].

Использование нагрева ударной волной сопряжено с рядом эффектов, затрудняющих измерения и увеличивающих их погрешность. Вхождение после ударного сжатия в двухфазную область и далее в область расплава сопровождается быстрым развитием неустойчивости поверхности исследуемого образца, что резко понижает ее отражательную способность и затрудняет регистрацию ее движения оптическими интерферометрическими методами. Совершенно неясен вопрос о степени термической гомогенности состояний, реализуемых после ударного сжатия твердого тела. Затруднено варьирование температуры расплава перед его откольным разрушением. Эти обстоятельства стимулируют поиск возможности экспериментирования непосредственно с расплавленными металлами.

В известных экспериментах по измерению откольной прочности воды и органических жидкостей для регистрации волновых профилей с при-

¹⁾e-mail: kanel@icp.ac.ru

менением лазерной доплеровской интерферометрической техники [12] для отражения зондирующего лазерного излучения использовалась тонкая металлическая фольга, из которой изготавливалась одна из стенок кюветы с исследуемой жидкостью. Силы смачивания, действующие между жидкостью и поверхностью фольги, обеспечивали их хороший контакт в течение всего времени эксперимента. Оказалось, однако, непросто подобрать материал фольги, который смачивался бы, например, оловом или свинцом без применения флюсов. Дело осложняется растворимостью металлов друг в друге. Вследствие нее, с одной стороны, трудно обеспечить время жизни фольгового отражателя, достаточное для достижения желаемой температуры и подготовки измерений. С другой стороны, в процессе предварительного нагрева изменяется химический состав исследуемого материала. Поэтому после многочисленных безуспешных попыток измерений профилей скорости свободной поверхности образцов расплавленных металлов с использованием фольговых отражателей из различных металлов с разными защитными покрытиями нами была реализована альтернативная схема измерений откольной прочности. Она основана на регистрации профиля скорости $u_i(t)$ контактной границы между образцом и преградой из материала с меньшим динамическим импедансом ρc .

Данная схема известна [1]. Ранее она использовалась экспериментаторами, не располагавшими техникой для регистрации профилей скорости свободной поверхности. Обычно в качестве низкоимпедансной преграды использовались полимеры или жидкости. В настоящей работе для измерений откольной прочности расплавов олова и свинца удалось использовать преграды из плавленого кварца. Динамический предел упругости плавленого кварца составляет 8.8 ГПа. До этого напряжения динамическая сжимаемость кварца является обратимой, что должно обеспечивать высокую точность получаемых результатов. Сжимаемость плавленого кварца аномальна до напряжений 2.5–3.0 ГПа: в этой области скорости звука уменьшаются по мере сжатия [13].

На рис. 1 показаны ударные адиабаты плавленого кварца при нормальной и повышенной температурах и ударные адиабаты свинца и олова в твердом и расплавленном состояниях. Детали диаграммы будут обсуждаться позже при анализе результатов измерений. Взаимное положение адиабат демонстрирует реальную возможность использования плавленого кварца в качестве преграды при измерениях откольной прочности свинца и олова.

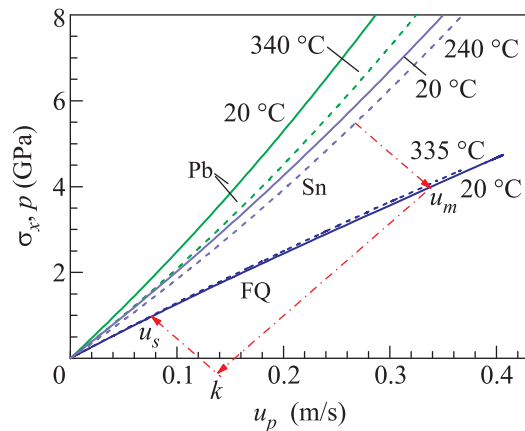


Рис. 1. (Цветной онлайн) Ударные адиабаты свинца, олова и плавленого кварца (FQ) и схема определения состояния в точке k откольной прочности методом характеристик по измеренным значениям скоростей u_m и u_s

В настоящей статье мы представляем первые предварительные результаты измерений динамической прочности на растяжение расплавов олова и свинца. Исследовались олово марки “С” и свинец технической чистоты. На рис. 2 показана схема экспериментов. Образец толщиной около 8 мм помещался в алюминиевую ампулу, в одну из стенок которой вклеивалось окно из плавленого кварца. Толщина второй стенки – дна ампулы – составляла 1.8 мм. Поверхность окна, обращенная к образцу, слегка протравливалась для обеспечения диффузного отражения. Затем на нее вакуумным напылением наносился отражающий слой алюминия. На воздухе алюминий самопроизвольно покрывался пленкой оксида, которая в эксперименте предотвращала непосредственный контакт алюминия с расплавленным металлом и их взаимное растворение. Перед измерениями ампула с образцом нагревалась резистивным нагревателем до температуры, слегка превышающей температуру плавления материала образца. Температура образца непрерывно контролировалась термопарой хромель-алюмель с точностью ± 3 °C. Импульс сжатия возбуждался в сборке ударом алюминиевой пластины толщиной 2 мм со скоростью 660 ± 20 м/с. В экспериментах с использованием лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [12] регистрировались профили скорости $u_i(t)$ контактной поверхности между плавленным кварцем и образцом.

На рис. 3 приведены в сопоставлении типичные волновые профили, измеренные в опытах с твердым оловом при комнатной температуре и с его расплавом при 240 °C. В эксперименте при комнатной тем-

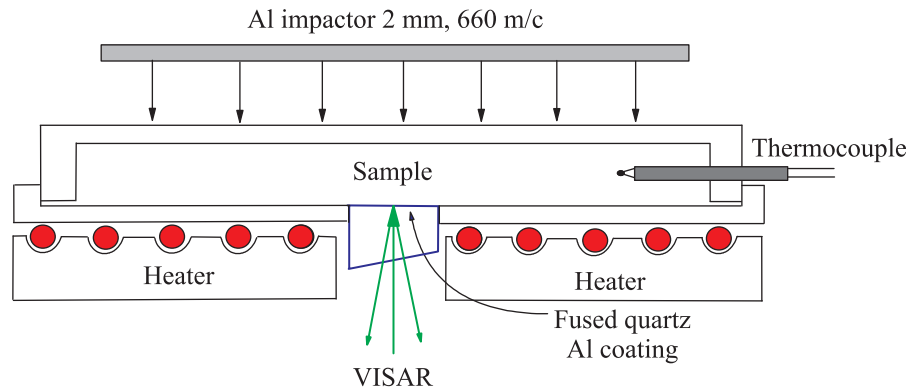


Рис. 2. (Цветной онлайн) Постановка опытов по определению откольной прочности расплавленных металлов

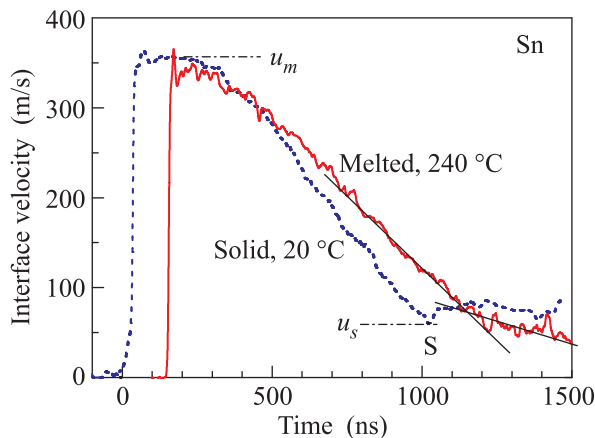


Рис. 3. (Цветной онлайн) Измеренные профили скорости поверхности контакта образцов твердого и расплавленного олова с окном из плавненого кварца. Температура расплавленного олова составляла 240 °С

пературе фиксируется выход на контактную поверхность упругопластической волны ударного сжатия и следующей за ней волны разгрузки. После отражения импульса сжатия в образце олова от поверхности контакта с плавленным кварцем внутри образца генерируются растягивающие напряжения, что приводит к его разрушению – отколу. Зона откольного разрушения не поддерживает растягивающие напряжения и не пропускает к поверхности контакта оставшуюся часть волны разрежения. Релаксация растягивающих напряжений при разрушении порождает в растянутом материале волну сжатия, которая выходит на контактную поверхность в момент времени, отмеченный на диаграмме буквой S, и вызывает увеличение скорости. С использованием измеренных значений максимальной скорости контактной поверхности за ударной волной u_m и скорости u_s непосредственно перед фронтом откольного импульса методом характеристик [1, 2] рассчитывается величина растяги-

вающего напряжения непосредственно перед разрушением (точка k на рис. 1), называемая откольной прочностью. Так как твердое олово обладает весьма существенным пределом упругости [14], при определении откольной прочности вводилась коррекция [1, 15] величины u_s , учитывающая искажение волнового профиля из-за различия скоростей распространения фронта откольного импульса и падающей волны разгрузки перед ним.

Рассчитанная таким образом откольная прочность олова при комнатной температуре составила 1,2 ГПа. Это значение практически совпадает с результатами измерений [14], основанных на регистрации профилей скорости свободной поверхности в близких условиях нагружения. Как было показано экспериментами с твердым оловом при повышенных температурах [14], уменьшение его откольной прочности с приближением к температуре плавления невелико. Ее резкое падение начиналось фактически с переходом через 0,99 температуры плавления.

Откольная прочность расплавленного олова, очевидно, меньше прочности твердого олова, вследствие чего в высокотемпературном опыте откольный импульс на волновом профиле четко не выражен. Соответствующее значение u_s искалось на пересечении линейных экстраполяций участка волнового профиля, соответствующего падающей волне разгрузки, и участка, формируемого после начала кавитации расплава под действием растягивающих напряжений. При этом соотношение наклонов указанных участков волнового профиля рассчитывалось на основе анализа динамики области кавитации при отражении импульса сжатия от границы раздела двух сред [16].

В расчетах использовались ударные адиабаты жидкого олова и плавненого кварца при температуре 240 °С. Адиабата плавненого кварца была построена в приближении простой волны по данным спе-

циально проведенного измерения профиля скорости свободной поверхности при 240°C с учетом теплового расширения с использованием табличной [17] зависимости скорости звука от температуры. Ударная адиабата расплавленного олова в виде $U_s = c_0 + bu_p$ строилась с использованием табличного [18, 19] значения скорости звука $c_0 = 2.46$ км/с и коэффициента $b = 1.76$, найденного из экспериментальной ударной адиабаты жидкого олова [20, 21] при 400°C . В данном диапазоне давлений вариации этого коэффициента оказывают незначительное влияние на положение ударной адиабаты. С учетом вышеизложенного значение откольной прочности расплавленного олова при 240°C оказалось равным 0.12 ± 0.02 ГПа, т.е. на порядок меньшим откольной прочности твердого олова. Идеальная прочность расплава олова составляет примерно $\sigma_{id} \approx \rho_0 c_0^2 / 4b = 6$ ГПа. Таким образом, при отколе в жидком олове реализуется значительно меньшая доля идеальной прочности, чем при отколе в воде и органических жидкостях: 2 против 15–20%.

На рис. 4 представлены результаты опытов с твердым и расплавленным свинцом. Для твердого техни-

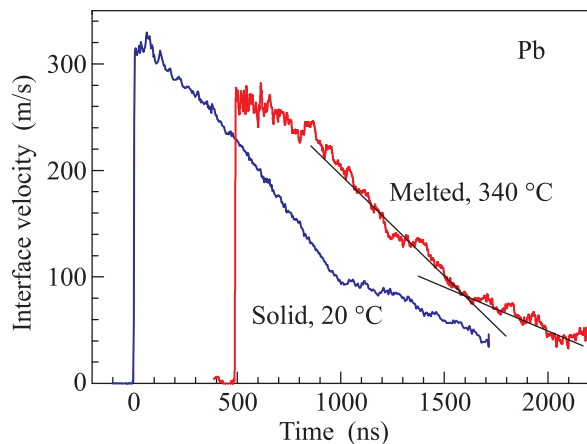


Рис. 4. (Цветной онлайн) Измеренные профили скорости поверхности контакта образцов твердого и расплавленного свинца с окном из плавленого кварца. Температура расплавленного свинца составляла 340°C

ческого свинца величина откольной прочности найдена равной 0.32 ± 0.08 ГПа, что находится в “полосе разброса” литературных данных для этого материала [1, 7, 22, 23]. После плавления откольная прочность свинца становится близкой к нулю и во всяком случае не превышает 0.03 ГПа. Оценка откольной прочности расплавленного свинца проводилась с использованием ударной адиабаты с табличным [18, 19] значением скорости звука $c_0 = 1.8$ км/с и коэффи-

циентом $b = 1.55$, найденным из экспериментальной ударной адиабаты жидкого свинца [21] при 400°C .

Таким образом, с плавлением откольная прочность олова и свинца падает на порядок величины. В соответствии с существующими теориями [24] прочность жидкости и время до ее кавитационного разрушения при растяжении определяются скоростью спонтанного зарождения пузырьков критического размера, которая, в свою очередь, сильно возрастает с температурой. С данной точки зрения низкая прочность расплавов металлов означает высокую скорость зарождения пузырьков при этих температурах. Введение в рассмотрение кинетики роста пузырьков понижает реализуемое сопротивление разрушению на 20–30% [11]. С другой стороны, в результате молекулярно-динамического моделирования кавитации в жидких металлах [10] динамическая прочность свинца на разрыв оценена равной 4–5 ГПа при скорости растяжения порядка 10^7 с $^{-1}$. Является ли столь большое расхождение с полученными здесь экспериментальными данными следствием меньшей скорости деформации, возможного вклада гетерогенного зарождения пузырьков на частицах примесей или результатом иных эффектов, предстоит выяснить в следующих работах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект # 14-50-00124).

1. T. Antoun, L. Seaman, D.R. Curran, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, and A.V. Utkin, *Spall Fracture*, Springer, N.Y. (2003), 404 p.
2. G.I. Kanel, *Int. J. Fract.* **163**(1, 2), 173 (2010).
3. С.И. Ашитков, П.С. Комаров, Е.В. Струлева, М.Б. Агранат, Г.И. Канель, *Письма в ЖЭТФ* **101**(4), 294 (2015).
4. А.А. Богач, А.В. Уткин, *ПМТФ* **41**(4), 198 (2000).
5. J.M. Boteler and G.T. Sutherland, *J. Appl. Phys.* **96**(11), 6919 (2004).
6. A.V. Utkin, V.A. Sosikov, A.A. Bogach, and V.E. Fortov, *AIP Conf. Proc.* **706**, 765 (2004).
7. G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin, and D.E. Grady, *AIP Conf. Proc.* **370**, 503 (1996).
8. T. de Resseguier, L. Signor, A. Dragon, M. Boustie, G. Roy, and F. Llorca, *J. Appl. Phys.* **101**, 013506 (2007).
9. E.V. Zaretsky and G.I. Kanel, *J. Appl. Phys.* **112**, 053511 (2012).
10. T.T. Bazhurov, G.E. Norman, and V.V. Stegailov, *J. Phys.: Cond. Mat.* **20**, 114113 (2008).
11. Yu. Kuksin, G.E. Norman, V.V. Pisarev, V.V. Stegailov, and A.V. Yanilkin, *Phys. Rev. B* **82**, 174101 (2010).

12. L. M. Barker and R. E. Hollenbach, *J. Appl. Phys.* **43**, 4669 (1972).
13. L. M. Barker and R. E. Hollenbach, *J. Appl. Phys.* **41**(10), 4208 (1970).
14. E. V. Zaretsky and G. I. Kanel, in *DYMAT 2009*, EDP Sciences (2009), p. 27.
15. Г. И. Канель, *ПМТФ* **42**(2), 194 (2001).
16. Г. И. Канель, А. В. Уткин, *ПМТФ* **4**, 23 (1991).
17. H. J. McSkimin, *J. Acoust. Soc. Amer.* **31**(3), 287 (1959).
18. М. Б. Гиттис, И. Г. Михайлов, *Акустический журнал* **12**(2), 145 (1966).
19. O. J. Kleppa, *J. Chem. Phys.* **18**(10), 1331 (1950).
20. К. В. Волков, В. А. Сибилев, *ПМТФ* **4**, 125 (1981).
21. Р. Ф. Трунин, М. В. Жерноклетов, Н. Ф. Кузнецов, В. В. Шутов, *ТВТ* **33**(2), 222 (1995).
22. В. К. Голубев, С. А. Новиков, Ю. С. Соболев, Н. А. Юкина, *ПМТФ* **6**, 108 (1982).
23. C. S. Speight and P. F. Taylor, in *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena (Explomet-85)*, ed. by L. E. Murr, K. P. Staudhammer, and M. A. Meyers, Marcel Dekker, Inc. (1987), p. 805.
24. S. Balibar and F. Caupin, *J. Phys.: Cond. Mat.* **15**, S75 (2003).