

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА ВИСМУТ–СВИНЕЦ В ТВЕРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ

Г. В. Гаркушин^{a*}, А. С. Савиных^a, Г. И. Канель^b, С. В. Разоренов^a

^a Институт проблем химической физики Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия

^b Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
125412, Москва, Россия

Поступила в редакцию 22 мая 2018 г.,
после переработки 8 августа 2018 г.
Принята к публикации 30 августа 2018 г.

Проведены измерения динамической прочности на разрыв (откольной прочности) эвтектического сплава висмут–свинец в твердом и жидком состояниях при температурах от комнатной до 102 °С для твердой фазы и 130 °С–150 °С для расплава. Найдено, что плавление сопровождается уменьшением динамической прочности на разрыв почти на порядок. Динамический предел упругости и откольная прочность сплава в твердом состоянии уменьшаются при увеличении температуры испытаний.

DOI: 10.1134/S004445101902010X

1. ВВЕДЕНИЕ

В атомной энергетике расплавы свинца с висмутом, главным образом эвтектический сплав Bi (56.5%), Pb (43.5%) (Lead–Bismuth Eutectic, LBE), используются в качестве теплоносителей в атомных реакторах и рассматриваются как перспективные теплоносители для импульсных термоядерных реакторов. Кроме того, тяжелые металлы используются в качестве мишеней в мощных импульсных источниках нейтронов, основанных на реакции скалывания (Spallation neutron source, SNS). Исследования теплофизических свойств жидкометаллических теплоносителей начаты в 1950-х гг. [1] и продолжаются до настоящего времени [2–6]. Импульсное энерговыделение в жидких теплоносителях сопровождается возбуждением волн сжатия и кавитационными явлениями, что делает актуальным определение также прочностных свойств этих материалов.

Прочность твердых тел и жидкостей при малых длительностях нагрузки определяется путем анализа откольных явлений, возникающих при отражении импульса сжатия от поверхности тела. При этом величина разрушающих напряжений при отколе определяется из анализа измеренного профиля

скорости свободной поверхности как функции времени $u_{fs}(t)$ методом характеристик [7, 8]. В настоящее время такие измерения проведены для широкого круга материалов в твердом состоянии в широком диапазоне длительностей нагрузки, при нормальных и повышенных температурах [7, 8], а также для воды [9, 10] и некоторых органических жидкостей [11]. В самое последнее время удалось измерить откольную прочность расплавленных металлов как в субмикросекундном диапазоне длительностей ударной нагрузки [12, 13], так и в пикосекундном диапазоне [14]. В работе [12] откол в расплавах свинца и олова реализовывался при отражении импульса сжатия от окна из плавленого кварца, имеющего меньший динамический импеданс, а откольная прочность определялась по результатам измерения профиля скорости поверхности контакта расплава с окном из низкоимпедансного материала. Подобный подход был ранее реализован в работе [15] при измерении динамической прочности ртути. В работе [13] удалось провести надежные измерения профилей скорости свободной поверхности расплавов свинца, олова и цинка. Оказалось [12, 13], что при относительно больших временах откольная прочность жидких олова, свинца и цинка на порядок меньше прочности этих металлов в твердом состоянии и составляет значительно меньшую долю предельно возможной («идеальной») прочности,

* E-mail: garkushin@ficp.ac.ru

чем это имеет место для воды и других жидкостей при комнатной температуре. Под идеальной прочностью понимается значение растягивающего напряжения, при котором объемный модуль обращается в нуль: $dp/dV = 0$, что соответствует абсолютной потере устойчивости конденсированного состояния. Приблизительно значение идеальной прочности σ_{id} оценивается как давление в минимуме ударной адиабаты вещества, экстраполированной в область растяжения; погрешность такой оценки составляет примерно 20 % [7]. Реальное сопротивление разрушению приближается к идеальной прочности с сокращением времени растяжения, однако даже в пикосекундном диапазоне длительностей нагрузки [14] откольная прочность расплавленного олова равна 1.9 ± 0.3 ГПа, что составляет менее 30 % от идеальной прочности. Для металлов в твердом состоянии откольная прочность, измеренная в пикосекундном диапазоне длительностей, обычно превышает 70 % идеальной прочности. Для неметаллических жидкостей свыше 10 % идеальной прочности реализуется уже в субмикросекундном диапазоне длительностей [7, 9, 11]. Различие в откольной прочности обусловлено различием механизмов и кинетических закономерностей зарождения и роста несплошностей в твердой и жидкой фазах, что в настоящее время является предметом теоретических исследований (см., например, [16, 17]). Ограниченность объема имеющихся экспериментальных данных стимулирует дальнейшие сравнительные исследования динамической прочности металлических материалов в твердом и расплавленном состояниях.

Основная трудность при измерении профилей скорости свободной поверхности жидкости заключается в следующем. Поверхность жидкости при выходе на нее ударной волны теряет устойчивость с образованием струй и эжектированных частиц [18–20]. Если в случае твердых тел струи образуются преимущественно путем микрокумуляции из шероховатостей поверхности [18, 19] и эффект минимизируется ее выглаживанием, то для жидкостей возмущение гладкой поверхности и формирование струй связано с развитием неустойчивости Рихтмайера – Мешкова [20]. При этом уменьшается ее отражательная способность, что затрудняет или делает невозможной регистрацию профилей скорости свободной поверхности интерференционным методом. В опытах с водой [9] и органическими жидкостями [11] для стабилизации поверхности использовалась тонкая алюминиевая фольга, которая служила в качестве отражателя зондирующего лазерного излучения. Хорошая смачиваемость фольги обеспечивала сохране-

ние ее сцепления с поверхностью жидкости в процессе выхода на нее всего импульса ударного сжатия. В случае жидкометаллических образцов при высоких температурах смачиваемость сопряжена с растворением материала фольги в исследуемом расплавленном металле. Растворение уменьшает время жизни отражающей поверхности и изменяет состав исследуемого вещества. Автору работы [13] удалось подобрать материал отражающей фольги и технологию ее подготовки, обеспечивающие достаточную смачиваемость при минимальной растворимости.

В настоящей работе проведены измерения динамического предела упругости и динамической прочности на разрыв эвтектического свинцово-висмутного сплава в твердом и в расплавленном состояниях.

2. МАТЕРИАЛ И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Проведены ударно-волновые испытания эвтектического сплава, содержащего номинально 56.648 % висмута и 43.34 % свинца. В табл. 1 указаны химические примеси в сплаве по данным изготовителя — ООО «Тинком». Исходные заготовки представляли собой стержни диаметром 50 мм и длиной 200 мм. Материал был однороден, видимых несплошностей и крупных включений не содержал. Измеренное значение продольной скорости звука составило 2200 ± 10 м/с. Плотность при 20 °С равна 10660 кг/м³. Температура плавления 124 °С, температура кипения 1670 °С. Для обработки результатов измерений требуется также знать величину объемной скорости звука c_b при нулевом давлении. В данной работе использовалось оценочное значение $c_b = 1900$ м/с, полученное по закону аддитивности [21] из значений скоростей звука в свинце и висмуте. Оценки проведены как в предположении аддитивности удельных объемов, так и в предположении аддитивности сжимаемостей и в обоих случаях получены близкие результаты.

Откольная прочность материала определялась из анализа профиля скорости свободной поверхности $u_{fs}(t)$ плоского образца в процессе отражения от нее импульса одномерного ударного сжатия. Как показал опыт, для обеспечения возможности измерений и получения надежных и воспроизводимых результатов важно исключить появление возмущений, вызванных наличием механических примесей, несплошностей и шероховатостью поверхности. По

Таблица 1. Химический состав сплава

Химический состав, %										
Sn	Pb	Sb	Cu	Bi	As	Fe	Ni	S	Zn	Al
0.002	43.34	0.001	0.001	Ост.	0.002	0.002	0.002	0	0.002	0

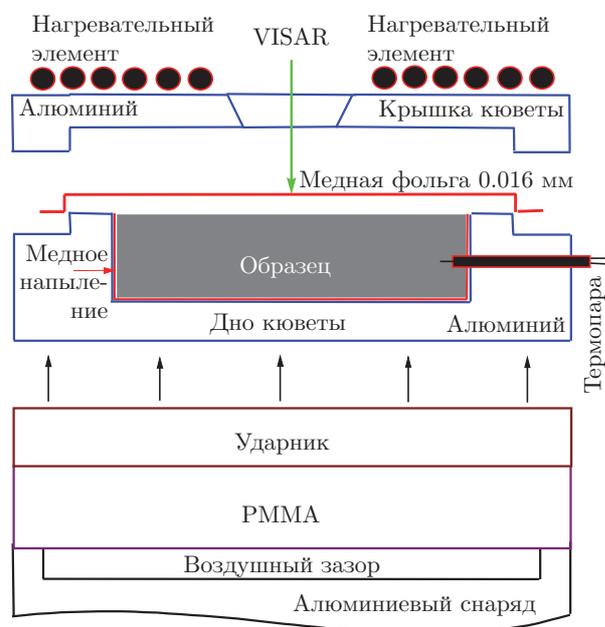


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной сборки «контейнера» в разобранном виде и метод ее нагружения

этой причине подготовке образцов уделялось повышенное внимание.

Образцы в виде дисков толщиной от 1 мм до 8 мм вырезались из заготовки методом электроэрозионной резки и подвергались ручной шлифовке и химической обработке. Шлифовка проводилась на абразивной бумаге с различной зернистостью с добавлением водно-спиртового раствора. После шлифовки образцы протравливались в растворе 30-процентной азотной кислоты в течение 5–7 мин, далее промывались в проточной воде и выдерживались в этиловом спирте в течение 1–2 мин. Финишная полировка плоских поверхностей осуществлялась на мягкой ткани, увлажненной спиртом. Боковые поверхности обрабатывались с целью очищения их от окислов и загрязнения. Данная операция проводилась непосредственно перед экспериментом с целью предотвращения образования оксидов на поверхности. В экспериментах при температуре выше точки плавления сплава очищенный образец помещался

в герметичный алюминиевый контейнер (кювету) с внутренним диаметром номинально 50 мм, несущественно превышающим диаметр образца. Крышка и дно кюветы представляли собой подобие «пальцев». Схематическое изображение сборки в разобранном виде представлено на рис. 1. В центре крышки находилось отверстие диаметром приблизительно 12 мм для прохода зондирующего и отраженного излучения лазера. Как показал опыт, для экспериментов с расплавом очень важно обеспечить хорошую смачиваемость им всех элементов кюветы, с которыми расплав находится в контакте. Опытным путем было установлено, что очищенная медь хорошо смачивается свинцово-висмутовым расплавом и при этом сравнительно медленно растворяется в нем. В соответствии с этим на очищенную внутреннюю поверхность дна алюминиевой кюветы вакуумным напылением наносился слой меди. Перед напылением дно кюветы выдерживалось 3–4 мин в щелочном насыщенном растворе КОН с последующим промыванием в воде.

В экспериментах при температурах ниже плавления зондирующее излучение отражалось непосредственно от свободной поверхности образца. С расплавами для отражения лазерного излучения использовалась очищенная медная фольга толщиной 0.016 мм, контактирующая с эвтектическим расплавом. Помимо прочего, медь имеет более высокий динамический импеданс ρc^2 , чем расплав, (ρ — плотность вещества, c — скорость звука в веществе) и это исключало «отскок» фольги в процессе отражений ударной волны. Для улучшения смачивания фольга предварительно обрабатывалась ортофосфорной кислотой. Натяжение фольги осуществлялось «пальцами» при плотном прижимании крышки кюветы к основной части кюветы (дно); в результате натяжения отражающая медная фольга оказывалась прижатой к образцу. После плавления образца натяжение фольги не изменялось, лазерное отражение оставалось постоянным.

Нагрев кюветы осуществлялся с помощью резистивного нагревателя. Температуру контролировали с помощью термопары ТХА (тип К) диаметром

0.2 мм, вмонтированной в корундовую соломку диаметром 0.3 мм, которую углубляли на 3–5 мм в образец. Погрешность измерения температуры оценивается в $\pm 2^\circ\text{C}$, что проверялось по известной температуре плавления сплава. Скорость нагрева образца примерно составляла $0.2\text{--}0.3^\circ\text{C}/\text{с}$. В опытах с расплавом после перехода через температуру плавления сплава $T_{melt} \approx 124^\circ\text{C}$ нагрев продолжался до температуры $150\text{--}170^\circ\text{C}$, после чего нагреватель выключался и сборка остывала в течение одной-полутора минут до температуры $129\text{--}150^\circ\text{C}$. В процессе этих предварительных операций отражательная способность фольги сохранялась практически неизменной.

Плоские ударные волны в исследуемых образцах генерировались алюминиевыми пластинами-ударниками толщиной 0.7 мм или 2 мм, разогнанными до скорости $160\text{--}230\text{ м/с}$ с помощью пневматической ствольной метательной установки калибром 50 мм. Пластины-ударники размещались на торце метаемого снаряда (рис. 1) с дополнительной прокладкой из полиметилметакрилата (РММА), благодаря которой обеспечивалась жесткость конструкции и исключался прогиб ударника в процессе разгона. При данном соотношении динамических импедансов образца, ударника и прокладки и для полученных значений откольной прочности результаты регистрируемого импульса ударного сжатия полностью определяются параметрами соударения алюминиевого ударника с образцом [8]. Эксперименты проводились в вакууме при остаточном давлении воздуха $0.02\text{--}0.04\text{ мбар}$. В экспериментах проводилась непрерывная регистрация скорости движения свободной поверхности как функции времени $u_{fs}(t)$, для чего использовался лазерный доплеровский интерферометрический измеритель скорости VISAR [22] с наносекундным разрешением по времени. Постоянная интерферометра во всех опытах составляла 95.9 м/с , что соответствует временному разрешению около 3 нс.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены результаты измерений профилей скорости свободной поверхности $u_{fs}(t)$ образцов сплава при комнатной температуре. Параметры постановки экспериментов указаны в табл. 2. Скорость ударников из алюминия или магния в этих опытах варьировалась от 150 м/с до 250 м/с , полное давление ударного сжатия перед выходом им-

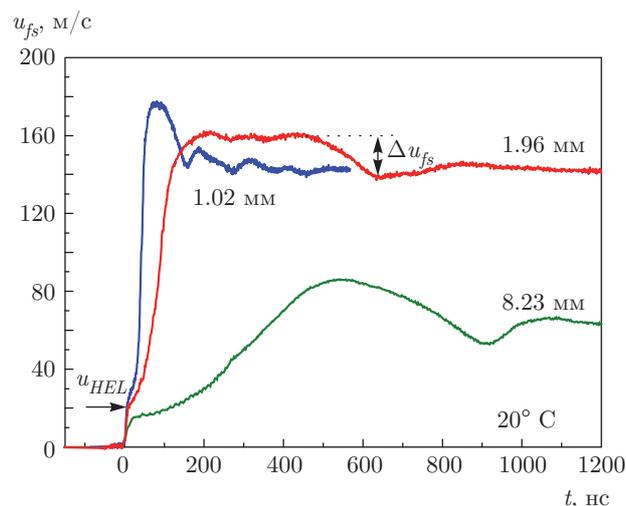


Рис. 2. Экспериментальные профили скорости свободной поверхности образцов сплава при комнатной температуре. Приведены толщины исследуемых образцов сплава. Параметры экспериментов приведены в табл. 2

пульса ударного сжатия на поверхность составляло $0.85\text{--}1.8\text{ ГПа}$.

На волновых профилях регистрируется выход на поверхность упругоупругой волны сжатия и части следующей за ней волны разрежения. Напряжение сжатия в упругом предвестнике равно динамическому пределу упругости σ_{HEL} (HEL — Hugoniot elastic limit). Значения σ_{HEL} , приведенные в табл. 2, рассчитаны по измеренной скорости поверхности u_{fs}^{HEL} на фронте предвестника (см. рис. 2): $\sigma_{HEL} = \rho_0 c_l u_{fs}^{HEL} / 2$, где ρ_0 — плотность материала, c_l — продольная скорость звука в материале. Результаты измерений демонстрируют затухание упругого предвестника по мере распространения, вызываемое развитием пластической деформации и релаксацией напряжений непосредственно за его фронтом. Вслед за упругим предвестником регистрируется выход на поверхность пластической волны сжатия. При данных параметрах нагрузки пластическая ударная волна имеет вполне измеримое время возрастания, которое уменьшается с увеличением конечного напряжения сжатия. Значительное время возрастания параметров характерно для слабых ударных волн. Полное давление ударного сжатия определяется по максимальному значению скорости свободной поверхности с использованием ударной адиабаты материала. Плавное возрастание параметров между упругой и пластической волнами связано с релаксацией напряжений и деформационным упрочнением материала [8]. При выбран-

Таблица 2. Постановка и результаты измерений динамической прочности эвтектического сплава Bi–Pb в твердом и расплавленном состояниях

Номер рисунка	T , °C	Толщина образца, мм	Материал и толщина ударника, мм	Толщина дна кюветы, мм	σ_{HEL} , МПа	σ_{sp} , МПа
2	20	1.02	Al 0.44	Опыт без кюветы	250	350
2	20	1.96	Al 2.02	2.02	230	230 240
2	20	8.23	Al 2.00	2.00	160	350
Не показан	20	7.89	Mg 2.9	2.00	150	310
3	20	2.98	Al 2.01	2.01	260	360
3	52	2.98	Al 1.93	1.92	210	310
3	102	3.02	Al 1.89	1.99	180	250
4	150	8.13	Al 1.95	1.83	нет	55
4	149	8.01	Mg 2.17	1.79	нет	40

ном соотношении толщин ударника и образца условия нагружения вблизи свободной тыльной поверхности образца в двух опытах из трех соответствуют началу затухания ударной волны под действием нагоняющей ее волны разрежения. После отражения импульса сжатия от свободной поверхности внутри образца генерируются растягивающие напряжения, которые инициируют его разрушение — откол. При этом происходит релаксация растягивающих напряжений и формируется волна сжатия (откольный импульс), выход которой на поверхность образца вызывает второй подъем ее скорости. Декремент скорости поверхности Δu_{fs} при ее уменьшении от максимума до значения перед фронтом откольного импульса пропорционален величине разрушающего напряжения — откольной прочности материала в данных условиях. В линейном (акустическом) приближении $\sigma_{sp} = 1/2\rho_0c_b(\Delta u_{fs} + \delta)$, где δ — поправка на искажение профиля скорости вследствие различия скоростей фронта откольного импульса и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним [23]. Последующие колебания скорости поверхности — это результат многократных отражений волн внутри откалывающегося слоя между свободной тыльной поверхностью образца и поверх-

ностью разрушения. Период осцилляций скорости определяется толщиной откола и скоростью звука.

Полученные значения откольной прочности сплава в твердом состоянии приведены в табл. 2. Результат опыта с образцом 1.96 мм и ударником толщиной 2.02 мм, параметры которого представлены во второй строке табл. 2, оказался намного ниже значений откольной прочности по данным остальных измерений, что, по-видимому, связано со слишком большим искажением волнового профиля и неопределенностью в этом опыте коррекции δ . Величина откольной прочности сплава по данным опытов с затухающим импульсом сжатия 310–360 МПа близка к откольной прочности свинца по литературным данным [12, 24]. Профиль скорости свободной поверхности образца толщиной 1.02 мм демонстрирует затянутый характер откольного разрушения: в течение длительного времени после начала разрушения откалывающийся поверхностный слой остается связанным с остальной частью образца и, вследствие этого, его средняя скорость уменьшается, он продолжает тормозиться в течение примерно 400 нс. Отличие этого опыта от остальных, показанных на рис. 2, заключается в меньшем запасе кинетической энергии в откалывающемся от-

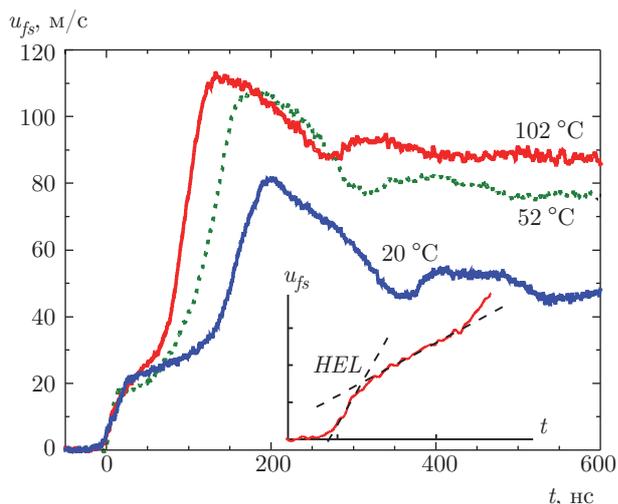


Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности образцов эвтектического сплава висмут–свинец с номинальной толщиной 3 мм при комнатной и повышенных температурах. Вставка иллюстрирует определение динамического предела упругости в опыте при максимальной температуре

кольном слое, который расходуется на завершение разрушения [8].

На рис. 3 представлены экспериментальные профили скорости свободной поверхности сплава при различных начальных температурах. Толщина образцов в данных опытах составляла 3 ± 0.02 мм. Видно, что повышение температуры до 102 °C приводит к уменьшению амплитуды упругого предвестника с 260 МПа до 180 МПа. При этом откольная прочность уменьшается с 360 МПа до 250 МПа. Время возрастания параметров в пластической ударной волне с ростом температуры изменяется незначительно. Увеличение температуры образцов привело к уменьшению интервала времени между фронтом предвестника и пластической ударной волной вследствие уменьшения продольной скорости звука от 2200 м/с при комнатной температуре до 2100 м/с при 102 °C при незначительном изменении объемной скорости звука и, соответственно, скорости пластической ударной волны. С увеличением температуры уменьшается затухание полного импульса сжатия. Скорость поверхности за пластической ударной волной тем выше, чем выше температура, что, по крайней мере отчасти, также связано с уменьшением продольной скорости звука и равной ей скорости распространения фронтальной части разгрузки.

На рис. 4 показаны два наиболее надежных результата опытов с расплавом. В случае расплава импульс ударного сжатия не содержит упругих предвестников ни при сжатии, ни при разгрузке, что объ-

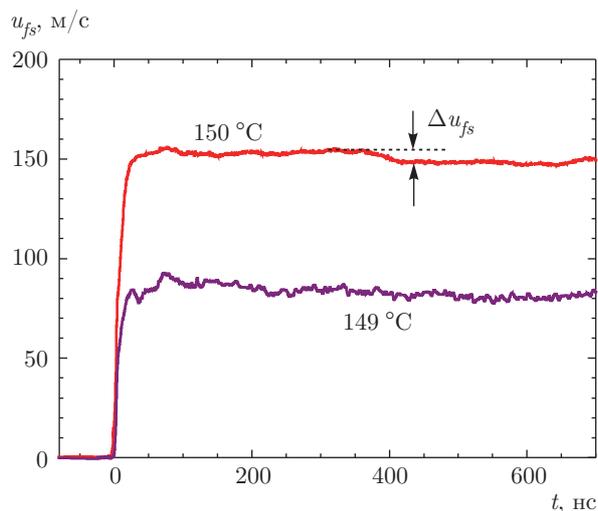


Рис. 4. Результаты измерений профилей скорости свободной поверхности слоя свинцово-висмутового расплава с номинальной толщиной 8 мм и температурой 150 °C

ясняет различие волновых профилей и положение на них откольных импульсов. Поскольку откольная прочность расплава явно невелика, даже небольшие шумы и другие искажения регистрируемого профиля вносят значительную погрешность в результаты измерений. Для определенности результаты измерений сопоставлялись с данными гидродинамических расчетов, моделирующих эксперименты; регистрируемое начало торможения поверхности при выходе на нее волны разрежения соответствует ожидаемому из расчетов.

Из обработки приведенных волновых профилей следует, что откольная прочность расплава находится в интервале 40–55 МПа, т.е. почти на порядок меньше откольной прочности сплава в твердом состоянии. Для сравнения укажем, что откольная прочность расплавленного свинца не превышает 30 МПа по данным работы [12] и составляет 109 МПа по данным [13]. Различие в данных работ [12] и [13], возможно, вызвано разным содержанием примесей, в том числе растворенного материала кюветы и отражающей фольги, но во всяком случае видно, что измеренные разными авторами значения динамической прочности этих расплавов являются величинами одного порядка.

В расчетах динамической прочности расплава использовали данные из справочника [2], где значение плотности при температуре 150 °C равно 10550 кг/м³. Скорость звука в расплаве при этой температуре по данным [21] принята равной 1765.4 м/с. При этом использовалась ударная адiabата расплава в виде $U_S = 1765.4 + 1520u$.

В табл. 2 представлены параметры экспериментальных сборок, а также значения динамического предела упругости σ_{HEL} и откольной прочности сплава в твердом и в расплавленном состояниях.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных измерений демонстрируют существенное уменьшение динамического предела упругости и откольной прочности свинцово-висмутового сплава при увеличении температуры испытаний от комнатной до 102 °С. С переходом через плавление предел упругости, как и следовало ожидать, исчезает, а динамическая прочность материала на разрыв (откольная прочность) уменьшается почти на порядок. Сопротивление откольному разрушению определяется скоростью зарождения несплошностей и скоростью их роста. В твердом теле зарождение разрушения может происходить на границах зерен, микропорах и других изначально существующих дефектах структуры. В расплавленном состоянии вещество является гомогенным. Зарождение пузырьков при растяжении гомогенной жидкости происходит по термофлуктуационному механизму и характеризуется некоторым временем ожидания. С другой стороны, сопротивление росту пузырьков в расплаве, определяемое поверхностным натяжением и вязкостью жидкости, много меньше сопротивления росту пор и других несплошностей в твердом теле, определяемого его пределом текучести. Повидимому, можно определенно утверждать, что кинетика роста несплошностей контролирует динамическую прочность в большей степени, чем скорость их зарождения или активации.

Работа выполнена по проекту Государственного контракта от 20 февраля 2017 г. № Н.4х.241.9Б.17.1013 «Базы данных для анализа динамических процессов с интенсивным энерговыделением», номер госрегистрации АААА-А17-117051710002-5, с использованием оборудования Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Кутателадзе, В. М. Борیشانский, И. И. Новиков и др., *Жидкометаллические теплоносители*, Атомиздат, Москва (1958).
2. В. С. Чиркин, *Термофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник*, Атомиздат, Москва (1968).

3. K. Morita, V. Sobolev, and M. Flad, *J. Nucl. Mat.* **362**, 227 (2007).
4. П. С. Попель, Д. А. Ягодин, А. Г. Мозговой и др., *ТВТ* **48**(2), 198 (2010).
5. V. Sobolev, *J. Nucl. Mat.* **362**, 235 (2007).
6. V. P. Sobolev, P. Schuurmans, and G. Benamati, *J. Nucl. Mat.* **376**, 358 (2008).
7. G. I. Kanel, *Int. J. Fract.* **163**(1–2), 173 (2010).
8. Г. И. Канель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин и др., *Ударно-волновые явления в конденсированных средах*, Янус-К, Москва (1996).
9. А. А. Богач, А. В. Уткин, *ПМТФ* **41**(4), 198 (2000).
10. J. M. Boteler and G. T. Sutherland, *J. Appl. Phys.* **96**, 6919 (2004).
11. A. V. Utkin, V. A. Sosikov, A. A. Bogach et al., in *Shock Compression of Condensed Matter–2003*, ed. by M. D. Furnish, *AIP Conf. Proc.* **706**, 765 (2004).
12. Г. И. Канель, А. С. Савиных, Г. В. Гаркушин и др., *Письма в ЖЭТФ* **102**, 615 (2015).
13. E. V. Zaretsky, *J. Appl. Phys.* **120**, 025902 (2016).
14. С. И. Ашитков, П. С. Комаров, А. В. Овчинников и др., *Письма в ЖЭТФ* **103**, 611 (2016).
15. G. A. Carlson, *J. Appl. Phys.* **46**, 4069 (1975).
16. E. N. Hahn, T. C. Germann, R. Ravelo et al., *Acta Mater.* **126**, 313 (2017).
17. P. N. Mayer and A. E. Mayer, *J. Appl. Phys.* **120**, 075901 (2016).
18. В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов и др., *Физика горения и взрыва* **34**(6), 103 (1998).
19. Y. Chen, H. Hu, T. Tang et al., *J. Appl. Phys.* **111**, 053509 (2012).
20. S. Dyachkov, A. Parshikov, and V. Zhakhovsky, *AIP Conf. Proc.* **1793**, 100024 (2017); DOI:10.1063/1.4971649.
21. П. С. Попель, Д. А. Ягодин, А. Г. Мозговой и др., *ТВТ* **48**(2), 198 (2010).
22. L. M. Barker and R. E. Hollenbach, *J. Appl. Phys.* **43**, 4669 (1972).
23. G. I. Kanel, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures* **22**, 1011 (1999).
24. G. I. Kanel, S. V. Razorenov, A. V. Utkin et al., in *Shock Compression of Condensed Matter–1995*, ed. by S. C. Schmidt and W. C. Tao, *AIP Conf. Proc.* **370**, 503 (1996).