

06

## Влияние температуры на динамический предел упругости и откольную прочность свинцово-висмутевого сплава при давлении ударного сжатия до 2.4 GPa

© А.С. Савиных,<sup>1,2</sup> Г.В. Гаркушин,<sup>1,2</sup> С.В. Разоренов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия  
e-mail: savas@ficp.ac.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 19 января 2023 г.

Принято к публикации 23 января 2023 г.

Проведены измерения динамического предела упругости и откольной прочности эвтектического сплава Bi — 56.5 mass%, Pb — 43.5 mass% при температуре образцов в диапазоне 20–109°C на основе регистрации и анализа эволюции импульсов ударного сжатия различной амплитуды. Показано, что увеличение температуры образцов приводит к уменьшению динамического предела упругости на 25%, а откольной прочности исследуемого сплава — на 30% независимо от скорости деформирования. Увеличение скорости деформирования на два порядка приводит к росту откольной прочности примерно в три раза. Построены аппроксимационные степенные зависимости затухания упругого предвестника от толщины образцов и откольной прочности от скорости деформирования перед разрушением при нормальной и повышенной температурах.

**Ключевые слова:** свинцово-висмутевоый эвтектический сплав, ударные волны, деформация, температура, динамический предел упругости, откольная прочность.

DOI: 10.21883/JTF.2023.03.54849.269-22

### Введение

Расплавы свинца с висмутом, главным образом эвтектический сплав Bi — 56.5 mass%, Pb — 43.5 mass%, применяются в качестве теплоносителей в реакторах специального назначения [1,2]. Исследования теплофизических свойств жидкометаллических теплоносителей начаты в 50-х годах прошлого века [3] и продолжаются до настоящего времени [4–7]. Кроме того, тяжелые металлы используются в качестве мишеней в мощных импульсных источниках нейтронов, основанных на реакции скалывания (SNS — Spallation Neutron Source) [8]. Импульсное энерговыделение сопровождается возбуждением волн сжатия и кавитационными явлениями в подобных расплавах, что делает актуальным определение прочностных свойств этих материалов как в твердом, так и в жидком состояниях при импульсных воздействиях субмикросекундной длительности. Экспериментальные исследования свойств материалов при ударных нагрузках микросекундной длительности в большинстве случаев основаны на измерениях и анализе эволюции упругопластических волн ударного сжатия при различных температурах [9–11]. В упругопластическом материале в волне сжатия выделяется упругий предвестник, амплитуда которого пропорциональна значению предела текучести, а скорость его затухания пропорциональна начальной скорости пластической деформации. Изме-

рения скорости сжатия в пластической ударной волне дают сведения о скоростной зависимости напряжения течения на последующих стадиях процесса.

Прочность твердых тел и жидкостей на растяжение при микросекундных и субмикросекундных длительностях нагрузки определяется путем анализа откольных явлений, возникающих при отражении импульса сжатия от свободной или контактной поверхности образца. При этом величина разрушающих напряжений при отколе в большинстве случаев определяется из анализа измеренного профиля скорости свободной поверхности как функции времени методом характеристик [12,13]. Измерения разрушающих напряжений (откольной прочности) в этих условиях при различных длительностях импульсной нагрузки и разных температурах дают сведения о кинетике разрушения. Полученные экспериментальные данные по откольному разрушению являются основой для построения моделей разрушения материала под действием механических напряжений в субмикросекундном диапазоне разрушающих нагрузок. Это, в свою очередь, требует надежных экспериментальных результатов и понимания процессов деформации и разрушения материалов в экстремальных условиях.

Целями настоящей работы являются измерения откольной прочности и динамического предела упругости эвтектического сплава Bi — 56.5 mass%, Pb — 43.5 mass% при температуре образцов в диапазоне

**Таблица 1.** Химический состав эвтектического сплава Bi–Pb

Химический состав, %						
Sn	Pb	Sb	Cu	Bi	Fe	Zn
0.01	43.7	0.046	0.004	Ост.	0.001	0.001

20–109°C, максимальной амплитуде ударного сжатия до 2.4 GPa и скоростях деформирования перед разрушением в диапазоне  $10^4$ – $10^6$  s<sup>-1</sup> путем регистрации и анализа полных волновых профилей, и на основе полученных данных построение скоростных и температурных зависимостей сопротивления этого сплава высокоскоростному деформированию и разрушению в исследуемом диапазоне скоростей деформирования при комнатной и повышенных температурах образцов.

## 1. Исследуемый материал. Постановка ударно-волновых экспериментов

Исходные заготовки эвтектического сплава, состоящего из висмута (56.3 mass%) и свинца (43.7 mass%), были изготовлены в вакуумной печи по заказу (ООО „Тинком“) в виде прутков диаметром 50 mm и длиной 150 mm. Химический состав исследуемого сплава представлен в таблице. Поставленный материал однороден, видимых несплошностей и крупных включений не содержит. Измеренное значение продольной скорости звука  $c_l$  составило  $2200 \pm 10$  m/s. Плотность сплава при 20°C равна 10.660 g/cm<sup>3</sup>. Температура плавления — 124°C.

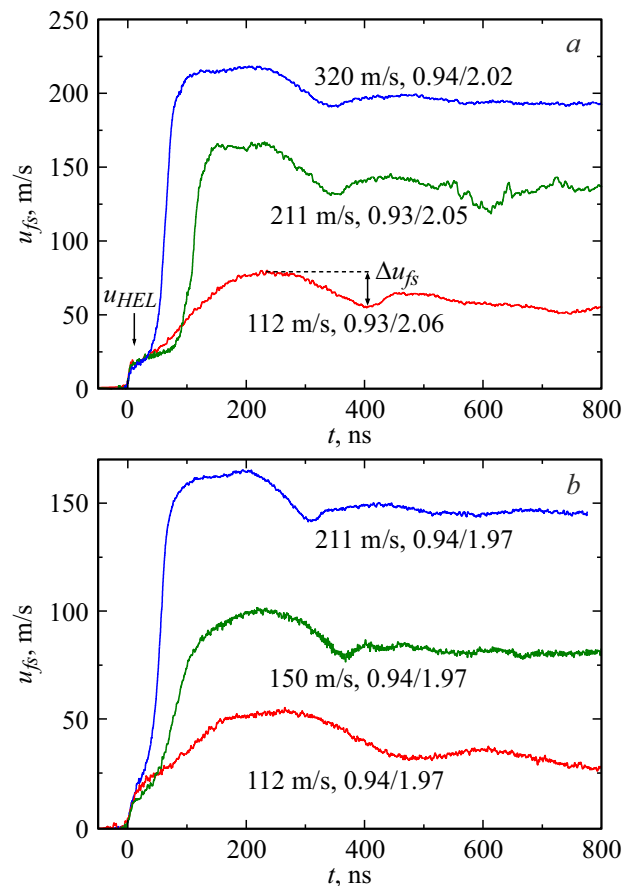
Плоскопараллельные образцы для ударно-волновых экспериментов толщиной от 0.2 до 8 mm вырезались электроэрозионным методом с последующей ручной механической обработкой (шлифовка и полировка) поверхности до необходимой для регистрации скорости образца лазерным интерферометром отражающей способности. Доводка поверхности образца осуществлялась ручной шлифовкой на абразивной бумаге с различной зернистостью с добавлением водно-спиртового раствора.

Ударные волны сжатия различной амплитуды генерировались в исследуемых образцах при нагружении алюминиевыми ударниками толщиной от 0.1 до 4 mm со скоростью от  $112 \pm 10$  до  $320 \pm 10$  m/s. Разгон ударников осуществлялся с помощью газовой пушки калибром 50 mm. Для исключения прогиба ударника в процессе его ускорения в стволе пушки последний монтировался на подложку из полиметилметакрилата толщиной 5 mm, которая наклеивалась на торец пустотелого снаряда диаметром 50 mm и длиной 100 mm, изготовленного из дюралюминия марки Д16. Скорость ударников регистрировалась электроконтактными датчиками только в экспериментах при комнатной температуре. Ствол пушки и пространство вокруг образца перед опытом вакуумировались. Нагрев образцов перед

ударным сжатием осуществлялся резистивными нагревателями, изготовленными из фехральной проволоки, расположенными на расстоянии 2–2.5 mm от поверхности образца. Скорость нагрева образца составляла  $\sim 0.05$ – $0.1^\circ\text{C/s}$ . Температура контролировалась двумя термопарами хромель–алюмель. Разница между показаниями термопар не превышала 1–2°C. В каждом эксперименте осуществлялась непрерывная регистрация профиля скорости свободной поверхности образца  $u_{fs}(t)$  в процессе его нагружения с помощью лазерного доплеровского интерферометрического измерителя скорости VISAR [14] с высоким пространственным и временным разрешением.

## 2. Результаты измерений профилей скорости свободной поверхности

На рис. 1 показаны профили скорости свободной поверхности образцов исследуемого сплава Bi–Pb толщиной 2 mm при комнатной и повышенной до 96°C начальных температурах. Скорость алюминиевых ударников варьировалась от 112 до 320 m/s при комнатной температуре и от 112 до 211 m/s при начальной темпера-

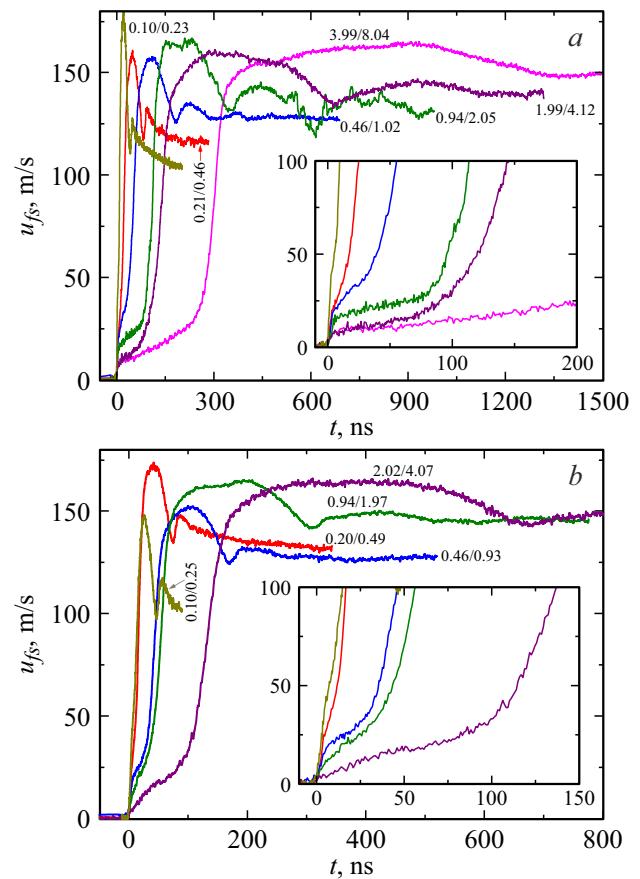


**Рис. 1.** Профили скорости свободной поверхности образцов сплава толщиной 2 mm при начальных температурах 20 (a) и 96°C (b) и различных скоростях удара. Приведены скорость ударника и соотношения толщин ударника и образца.

туре  $96^\circ\text{C}$ . Реализуемые в экспериментах максимальные напряжения сжатия при комнатной температуре составили  $0.8\text{--}2.4\text{ GPa}$ , при  $96^\circ\text{C}$  —  $0.6\text{--}1.7\text{ GPa}$ .

Исходный импульс сжатия в момент соударения имел форму, близкую к прямоугольной, и амплитуду, соответствующую скорости соударения пары материалов образец—ударник. По мере прохождения ударной волны по образцу происходит ее эволюция — изменение формы в соответствии со свойствами материала образца. В данном случае (рис. 1) на профиле скорости свободной поверхности регистрируется выход упругой волны сжатия амплитудой  $u_{HEL}$ , распространяющейся со скоростью, равной продольной скорости звука  $c_l$ . За упругой волной сжатия на свободную поверхность выходит пластическая волна. В исследуемом диапазоне давлений ударного сжатия пластическая волна имеет заметное время возрастания, зависящее как от давления ударного сжатия, так и от температуры образцов. С ростом давления как при комнатной температуре, так и при  $96^\circ\text{C}$  время возрастания скорости свободной поверхности в пластической волне значительно уменьшается, кроме того, с ростом давления уменьшается и время между выходом упругой и пластической волнами. При начальной температуре  $96^\circ\text{C}$  время между выходом упругой и пластических волн заметно ниже, чем при комнатной температуре. Плавное нарастание скорости свободной поверхности между упругой и пластической волнами свидетельствует о деформационном упрочнении материала [11]. После достижения максимальной скорости поверхности регистрируется выход части волны разрежения, предшествующей откольному разрушению с амплитудой  $\Delta u_{fs}$  и сформированного в процессе откола слабого импульса сжатия. Для исследуемого в настоящей работе эвтектического сплава на профилях скорости практически всегда наблюдается его быстрое затухание, а последующие осцилляции скорости поверхности, связанные с его реверберацией в откольной пластине, не регистрируются. Влияния максимального напряжения сжатия на амплитуду упруго предвестника  $u_{HEL}$  и величину спада скорости  $\Delta u_{fs}$  в волне разгрузки как при комнатной температуре, так и при  $96^\circ\text{C}$  не выявлено.

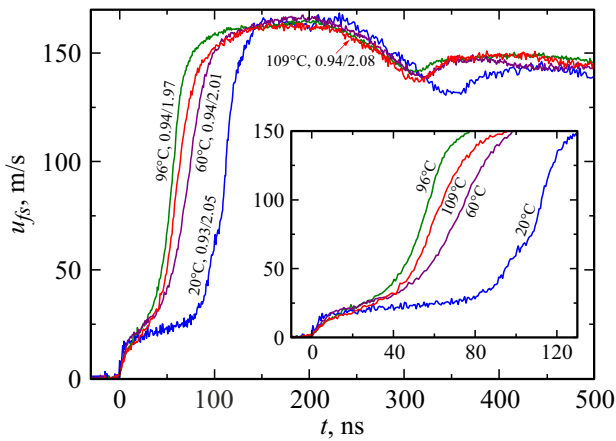
На рис. 2 представлены профили скорости свободной поверхности образцов толщиной  $0.2\text{--}8\text{ mm}$  при комнатной температуре и  $0.2\text{--}4\text{ mm}$  при  $96^\circ\text{C}$ , полученные в экспериментах с алюминиевым ударником, разогнанным до скорости  $211 \pm 10\text{ m/s}$ . Результаты измерений, представленных на рис. 2, *a*, демонстрируют затухание амплитуды упругой волны  $u_{HEL}$  по мере ее распространения в образце, вызываемое развитием пластической деформации и релаксацией напряжений непосредственно за его фронтом. На профилях скорости свободной поверхности образцов различной толщины наблюдается увеличение амплитуды спада скорости  $\Delta u_{fs}$  в волне разгрузки с уменьшением толщины образца. Повышение начальной температуры образцов до  $96^\circ\text{C}$  (рис. 2, *b*)



**Рис. 2.** Профили скорости свободной поверхности образцов эвтектического сплава Bi—Pb. *a* — нагружение образцов толщиной  $0.2\text{--}8\text{ mm}$  алюминиевым ударником со скоростью  $211\text{ m/s}$  при  $20^\circ\text{C}$ ; *b* — нагружение образцов толщиной  $0.2\text{--}4\text{ mm}$  алюминиевым ударником со скоростью  $211\text{ m/s}$  при  $96^\circ\text{C}$ . У профилей указаны толщина ударника и образца.

сохранило те же тенденции изменения амплитуды упруго предвестника  $u_{HEL}$  и амплитуды спада скорости  $\Delta u_{fs}$  с изменением толщины образца.

На рис. 3 представлены профили скорости свободной поверхности эвтектического сплава висмут—свинец толщиной  $2\text{ mm}$  при начальной температуре образцов  $20\text{--}109^\circ\text{C}$ . Нагружение образцов осуществлялось алюминиевым ударником со скоростью  $211 \pm 10\text{ m/s}$ . Повышение температуры образцов с  $20$  до  $109^\circ\text{C}$  привело к незначительному уменьшению амплитуды упругой волны  $u_{HEL}$ . Время нарастания скорости в упругой волне увеличилось с  $4\text{ ns}$  при  $20^\circ\text{C}$  до  $10\text{ ns}$  при начальной температуре  $109^\circ\text{C}$ . С ростом температуры регистрируется уменьшение времени нарастания в пластической волне, что свидетельствует об уменьшении вязкости исследуемого материала. Разница во времени между выходом упругой и пластической волн значительно меньше в эксперименте с температурой образца  $60^\circ\text{C}$  в сравнении с комнатной температурой. С дальнейшим увеличением температуры разница во времени уменьшается. Большое



**Рис. 3.** Профили скорости свободной поверхности образцов эвтектического сплава Bi–Pb толщиной 2 mm при начальных температурах 20–109°C. Нагружение алюминиевым ударником со скоростью 211 m/s. У профилей указана температура, толщина ударника и образца.

значение разницы во времени между выходом упругой и пластической волн в эксперименте при 109°C в сравнении с экспериментом при 96°C связано с большей толщиной исследуемого образца, нагретого до 109°C. Амплитуда спада скорости в волне разгрузки перед отколом  $\Delta u_{fs}$  имеет наибольшее значение при комнатной температуре и с дальнейшим ростом температуры уменьшается.

### 3. Упруго-пластические и прочностные свойства сплава висмут-свинец

Анализ полных волновых профилей позволяет получать не только качественную информацию о характере отклика исследуемого материала на воздействие динамических нагрузок субмикросекундной длительности, но и рассчитать его прочностные характеристики для этих условий нагружения — динамические пределы упругости и текучести, критические растягивающие напряжения при отколе, кинетику эволюции импульса сжатия и т.д. Напряжение, соответствующее динамическому пределу упругости материала  $\sigma_{HEL}$ , рассчитывается по измеренной из профиля скорости свободной поверхности  $u_{fs}$  амплитуды упругой волны сжатия  $u_{HEL}$  как

$$\sigma_{HEL} = \rho_0 c_l u_{HEL} / 2,$$

где  $c_l$  — продольная скорость звука,  $\rho_0$  — начальная плотность. Значения динамического предела текучести  $\sigma_T$  в условиях одномерной деформации рассчитываются из соотношения

$$\sigma_T = 3/2 \sigma_{HEL} (1 - c_b^2 c_l^2),$$

где  $c_b$  — объемная скорость звука.

Измеренная плотность эвтектического сплава висмут–свинец при комнатной температуре составила  $10.660 \text{ g/cm}^3$ . В работе [15] плотность эвтектического сплава висмут–свинец от 273.17 K до температуры плавления описывается формулой

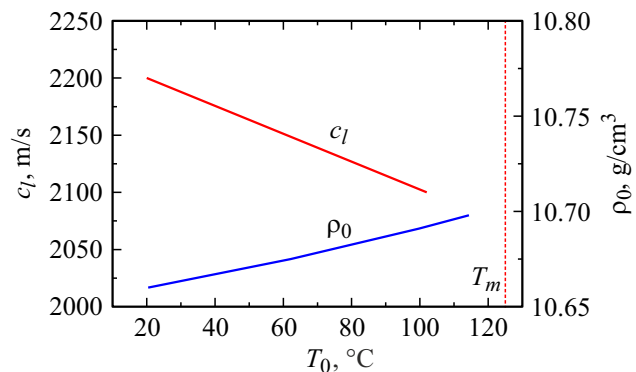
$$\rho_0 = 10.52177 + 0.00046026T \quad (273.17 < T).$$

Зависимость плотности приведена на рис. 4. Измеренное для исследуемого сплава значение продольной скорости звука  $c_l$  при комнатной температуре на образцах толщиной 8 mm составило  $2200 \pm 10 \text{ m/s}$ . В работе [16] проведена оценка изменения продольной скорости звука до температуры 102°C, результаты этой оценки приведены на рис. 4. По данным этой же работы объемная скорость звука  $c_b$  эвтектического сплава висмут–свинец принималась равной 1900 m/s в исследуемом диапазоне температур. Продольная скорость звука при начальной температуре 109°C рассчитывалась путем экстраполяции приведенной на рис. 4 зависимости.

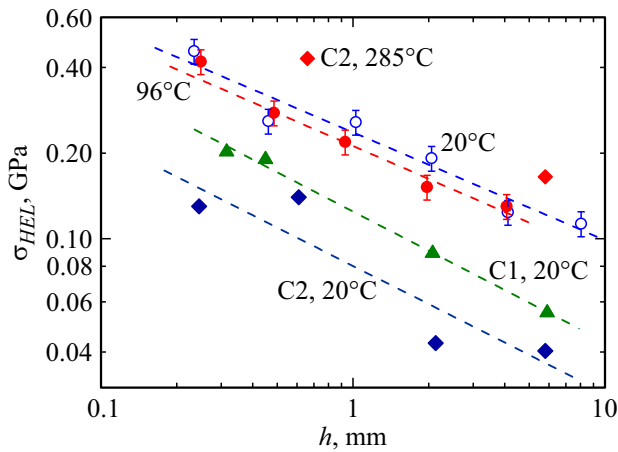
За ударной волной на поверхность образца выходит волна разрежения, снижая скорость свободной поверхности (рис. 1). Первый минимум скорости совпадает по времени с образованием внутри образца откольной трещины, когда при взаимодействии падающей и отраженной от свободной поверхности волн разрежения генерируются растягивающие напряжения, превышающие прочность образца. В момент откола растягивающие напряжения релаксируют от величины, равной критическим растягивающим напряжениям (откольной прочности материала), до нуля, вследствие чего формируется слабая волна сжатия — откольный импульс. Величина спада скорости поверхности  $\Delta u_{fs}$  (рис. 1) от ее максимума до первого минимума перед фронтом откольного импульса пропорциональна откольной прочности материала  $\sigma_{sp}$ . В акустическом приближении величина откольной прочности определяется как

$$\sigma_{sp} = 1/2 \rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \delta),$$

где  $\delta$  — поправка на искажение профиля скорости вследствие различия скорости фронта откольного импульса,



**Рис. 4.** Зависимость плотности [15] и продольной скорости звука [14] эвтектического сплава висмут–свинец от начальной температуры.  $T_m$  — температура плавления сплава.



**Рис. 5.** Зависимости динамического предела упругости от толщины образца эвтектического сплава висмут–свинец при комнатной и повышенной до 96°C температурах. Треугольники — свинец С1 при 20°C, темные ромбы — свинец С2 при 20°C, красные ромбы — свинец С2 при 285°C [18].

равного  $c_l$ , и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним, движущейся с объемной скоростью звука  $c_b$  [12,17].

Скорость деформации материала перед отколом фактически является скоростью расширения вещества в волне разрежения и равна

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = -\frac{\dot{u}_{fsr}}{2c_b},$$

где  $V_0$  — удельный объем при нулевом давлении,  $\dot{V}$  — скорость изменения объема,  $\dot{u}_{fsr}$  — скорость спада скорости свободной поверхности в волне разгрузки перед отколом, определяемая из волнового профиля.

На рис. 5 представлены зависимости динамического предела упругости от толщины образца при комнатной и повышенной до 96°C начальных температурах. Зависимости, показанные на рисунке, получены из экспериментов при нагружении образцов разной толщины алюминиевым ударником со скоростью  $211 \pm 10$  м/с, что соответствует максимальному напряжению ударного сжатия  $\sim 1.7$  ГПа. Как при комнатной, так и при повышенной до 96°C температуре образца регистрируется сильное затухание упругой волны с пройденным расстоянием. Полученные значения  $\sigma_{HEL}$  в экспериментах при комнатной температуре незначительно выше, чем при начальной температуре 96°C во всем измеряемом диапазоне толщин образца. Там также приведены данные для свинца марок С1 и С2, отличающиеся друг от друга наличием примесей [18]. Измеренные значения  $\sigma_{HEL}$  для более чистого свинца С1 лежат выше, чем для свинца С2 в исследованном диапазоне толщин образцов. Измеренные значения динамического предела текучести исследуемого сплава в 2 раза выше, чем для свинца С2. Нагрев свинца С2 до температур, близких к температуре его плавления, приводит к росту динамического предела

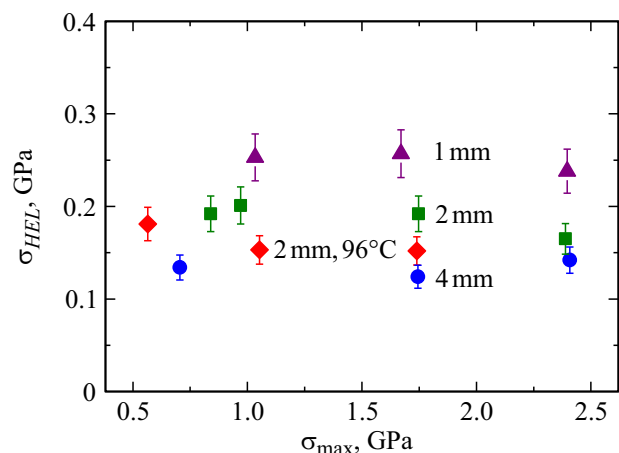
упругости в 4 раза вследствие так называемого атермического упрочнения [10], в то время как нагрев эвтектического сплава, наоборот, незначительно снижает его величину.

Представленные на рис. 5 зависимости рассчитанных значений динамического предела упругости для эвтектического сплава висмут–свинец от толщины образцов при нормальной и повышенной температурах аппроксимируются степенной функцией

$$\sigma_{HEL} = S(h/h_0)^{-\alpha}$$

где  $h$  — начальная толщина образца при температуре испытания,  $h_0 = 1$  мм,  $S$  — коэффициент, принимающий значение  $\sigma_{HEL}$  при  $h_0 = 1$  мм на полученной зависимости,  $\alpha$  — показатель степенной зависимости. Использование для описания зависимостей такой аппроксимирующей функции показало, что коэффициент  $S$  принимает значение 237 и 212 МПа для зависимостей  $\sigma_{HEL}$  от толщины образцов для эвтектического сплава Вi–Рb при комнатной и повышенной до 96°C температуре соответственно. Степенной показатель  $\alpha = 0.38$  — один и тот же как при комнатной температуре, так и при 96°C. По данным работы [18] степенной показатель  $\alpha$  для свинца С1 при комнатной температуре и С2 при комнатной и повышенной температурах также одинаков и равен 0.55.

На рис. 6 суммированы полученные данные для динамического предела упругости образцов исследуемого сплава толщиной 1, 2 и 4 мм при комнатной температуре и толщиной 2 мм при температуре 96°C в зависимости от максимального напряжения сжатия. Затухание упругой волны наблюдается во всем диапазоне реализованных максимальных напряжений сжатия (0.7–2.4 ГПа) при комнатной температуре. Регистрируется заметный разброс экспериментальных данных для каждой толщины исследуемых образцов, который не позволяет однозначно трактовать влияние максимального



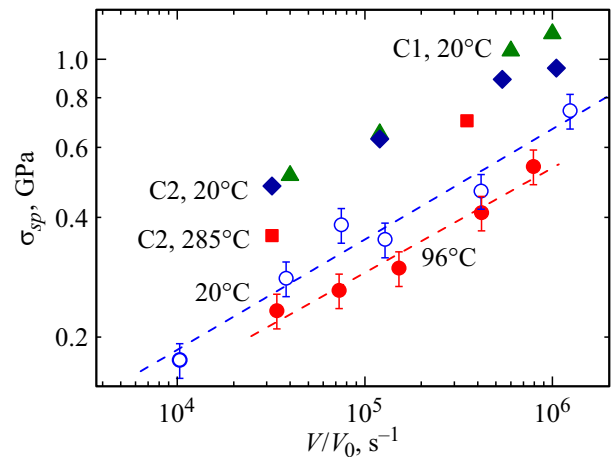
**Рис. 6.** Зависимости динамического предела упругости от максимального напряжения сжатия образцов толщиной 1, 2 и 4 мм при комнатной температуре и толщиной 2 мм при 96°C эвтектического сплава висмут–свинец.

напряжения сжатия на величину динамического предела упругости.

Результаты измерения динамического предела упругости, текучести и откольной прочности образцов толщиной 2 мм эвтектического сплава висмут–свинец в диапазоне начальных температур от 20 до 109°C при максимальном напряжении сжатия 1.7 ГПа показаны на рис. 7. Плавное уменьшение динамического предела упругости и текучести при повышении температуры от 20 до 109°C составляет ~ 25%. Падение откольной прочности с ростом температуры до температуры, близкой к температуре плавления, не превышает 30%. На рис. 7 также представлены данные по откольной прочности этого сплава в жидком состоянии при температуре 150°C, полученные в [16]. Как видно из рисунка, откольная прочность сплава в жидком состоянии примерно на порядок ниже, чем в твердом состоянии при 20°C.

Зависимости откольной прочности эвтектического сплава висмут–свинец от скорости деформирования в волне разрежения при комнатной и повышенной до 96°C температуре представлены на рис. 8. Повышение начальной температуры образцов до 96°C независимо от максимального давления ударного сжатия приводит к уменьшению откольной прочности в исследуемом диапазоне скоростей деформирования приблизительно на 20%. Значения откольной прочности свинца С1 и С2 [18] в два раза выше, чем откольная прочность исследованного сплава Bi–Pb, а с ростом температуры свинца также наблюдается уменьшение его откольной прочности.

Представленные на рис. 8 зависимости откольной прочности от скорости деформирования в волне разгрузки можно аппроксимировать степенной зависимостью в



**Рис. 8.** Зависимости откольной прочности от скорости деформирования образцов эвтектического сплава висмут–свинец толщиной 2 мм при комнатной и повышенной до 96°C температурах. Треугольники — свинец С1 при 20°C, ромбы — свинец С2 при 20°C, квадраты — свинец С2 при 285°C. Данные для свинца взяты из [18].

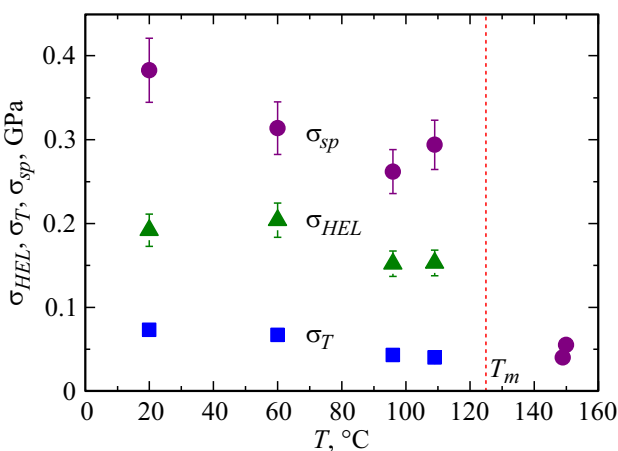
виде

$$\sigma_{sp} = \left( \frac{V/V_0}{\varepsilon_0} \right)^\beta,$$

где  $\varepsilon_0 = 10^5 \text{ s}^{-1}$ ,  $A$  — коэффициент, принимающий значение  $\sigma_{sp}$  при  $\varepsilon_0 = 10^5 \text{ s}^{-1}$ ,  $\beta$  — показатель степенной зависимости. При комнатной температуре коэффициент  $A$  принимает значение 351 МПа, что выше, чем при 96°C ( $A = 290 \text{ МПа}$ ). При комнатной температуре показатель степени  $\beta = 0.277$ , при повышении температуры до 96°C его значение незначительно снижается до  $\beta = 0.263$ . В работе [18] степенной показатель  $\beta$  для свинца С1 и С2 при комнатной температуре равен 0.225, что несколько ниже, чем для эвтектического сплава висмут–свинец.

## Заключение

Проведенные эксперименты по измерению эволюции (формоизменению) волновых профилей образцов эвтектического низкотемпературного сплава Pb–Bi (43.7/56.3) толщиной 0.2–8 мм при температуре 20, 60, 96 и 109°C в диапазоне давлений ударного сжатия 0.8–2.4 ГПа, впервые измерены его динамический предел упругости и откольная прочность в этих условиях, и показано следующее. С ростом температуры образцов от 20 до 109°C наблюдается плавное уменьшение динамического предела упругости и текучести на ~ 25%. При увеличении скорости деформирования на два порядка (от ~ 10<sup>4</sup> до 10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup>) откольная прочность сплава возрастает примерно в три раза. Повышение температуры образцов до температуры, близкой к температуре плавления приводит к уменьшению откольной прочности сплава примерно на 30%. На основе полученных данных



**Рис. 7.** Зависимости динамического предела упругости, текучести и откольной прочности образцов эвтектического сплава висмут–свинец толщиной 2 мм от начальной температуры.  $T_m$  — температура плавления сплава. Значения откольной прочности при 150°C взяты из работы [16].

построены аппроксимационные степенные зависимости затухания упругого предвестника по мере его распространения в образце и роста откольной прочности с увеличением скорости деформирования перед разрушением при нормальной и повышенной температуре. Поученные результаты могут войти в базу данных по свойствам реакторных материалов и быть использованы для предсказательных численных расчетов поведения исследованного эвтектического сплава в диапазоне температур вплоть до температур плавления при импульсных воздействиях.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках НИОКР по договору № 17706413348210001380/226/3464-Д от 22 июня 2021 г. с использованием оборудования Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН по теме Государственного задания № АААА-А19-119071190040-5, подготовка образцов проводилась в рамках Государственного задания № 075-00460-21-00.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Е.О. Адамов (ред.). *Машиностроение ядерной техники (Энциклопедия „Машиностроение“)* (Машиностроение, М., 2005), том IV-25, кн. 1.
- [2] В.И. Субботин, М.Н. Арнольд, Ф.А. Козлов, А.Л. Шимкевич. *Атомная энергия*, **92** (1), 31 (2002). [V.I. Subbotin, M.N. Arnold, F.A. Kozlov, A.L. Shimkevich. *Atomic Energy*, **92** (1), 29 (2002). DOI: 10.1023/A:1015050512710]
- [3] С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский, И.И. Новиков, О.С. Федынский. *Жидкометаллические теплоносители* (Атомиздат, М., 1958)
- [4] В.С. Чиркин. *Термофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник* (Атомиздат, М., 1968)
- [5] K. Morita, V. Sobolev, M. Flad. *J. Nucl. Mater.*, **362**, 227 (2007). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2007.01.048
- [6] П.С. Попель, Д.А. Ягодин, А.Г. Мозговой, М.А. Покрасин. *ТВТ*, **48** (2), 198 (2010). [P.S. Popel, D.A. Yagodin, A.G. Mozgovoï, M.A. Pokrasin. *High Temp.*, **48**, 181 (2010). DOI: 10.1134/S0018151X10020070]
- [7] V.P. Sobolev, P. Schuurmans, G. Benamati. *J. Nucl. Mater.*, **376**, 358 (2008). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.02.030
- [8] T.E. Mason, T.A. Gabriel, R.K. Crawford, K.W. Herwig, F. Klose, J.F. Ankner. *The Spallation Neutron Source: A Powerful Tool for Materials Research*. arXiv:physics/0007068 [physics.acc-ph]. DOI: 10.48550/arXiv.physics/0007068
- [9] Г.И. Канель, Е.Б. Зарецкий, С.В. Разоренов, С.И. Ашитков, В.Е. Фортов. *УФН*, **187**, 525 (2017). DOI: 10.3367/UFNr.2016.12.038004 [G.I. Kanel, E.B. Zaretsky, S.V. Razorenov, S.I. Ashitkov, V.E. Fortov. *Phys. Usp.*, **60** (5), 490 (2017). DOI: 10.3367/UFNe.2016.12.038004]
- [10] G.I. Kanel. *Shock Waves in Solid State Physics* (CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, NY., 2019)
- [11] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov. *Shock-Wave Phenomena and Properties of Condensed Matter* (Springer, NY., 2004)
- [12] G.I. Kanel. *Int. J. Fract.*, **163** (1–2), 173 (2010). DOI: 10.1007/s10704-009-9438-0
- [13] T. Antoun, L. Seaman, D.R. Curran, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin. *Spall Fracture* (Springer, NY., 2003)
- [14] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.*, **43**, 4669 (1972). DOI: 10.1063/1.1660986
- [15] А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф. Очков. *Свойства и процессы рабочих тел и материалов атомной энергетики* (Издат. дом МЭИ, М., 2012)
- [16] Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. *ЖЭТФ*, **155** (2), 306 (2019). DOI: 10.1134/S004445101902010X [G.V. Garkushin, A.S. Savinykh, G.I. Kanel, S.V. Razorenov. *J. Exp. Theor. Phys.*, **128** (2), 268 (2019). DOI: 10.1134/S1063776119010114]
- [17] Г.И. Канель. *ПМТФ*, **42** (2), 194 (2001). [G.I. Kanel. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **42**, 358 (2001). DOI: 10.1023/A:1018804709273]
- [18] A.S. Savinykh, G.I. Kanel, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov. *J. Appl. Phys.*, **128**, 025902 (2020). DOI: 10.1063/5.0009812