

8. D.J. Andrews. J. Phys. Chem. Solids 34, 825, 1973.
9. Wallace and J. Boettger. Theoretical analysis of the Shock -Induced Phase Transition in Iron D., LASL, pp. 228-231, (1997).
10. Кузьмицкий И.В. Гетерогенная физическая точка. Равновесный, неравновесный и квазиравновесный режим фазового превращения. Основные уравнения эволюции// International Conference "Shock Wave in Condensed Matter". St.-Petersburg-Novgorod, Russia. 2010. С. 251-255// XIII Харитоновские тематические научные чтения. Сб. тезисов докладов. Саров, 2011. С.137-141., Труды XIII Харитоновских тематических научных чтений. Саров, 2011. С. 278-285.
11. Р.Ф. Трунин. Сжатие конденсированных веществ высокими давлениями ударных волн (Лабораторные исследования). в УФН, 2001, т. 171, № 4
12. Кузнецов Н.М. Некоторые вопросы фазовых превращений в ударных волнах// Сб. "Ударные волны и экстремальные состояния вещества", под ред. акад. Фортова В.Е., Альтшулера Л.В., Трунина Р.Ф., Фунтикова А.И. М.: Наука, 2000. С. 174-198.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ УДАРНОВОЛНОВОГО ПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ВБЛИЗИ НАЧАЛА ПЛАВЛЕНИЯ В ВОЛНЕ РАЗГРУЗКИ

А.В. Фёдоров, С.А. Финюшин, Е.А. Чудаков, Е.И. Бутусов, Д.А. Калашников

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

В докладе представлены результаты определения параметров начала плавления металлов в волне разгрузки после их ударно-волнового нагружения. Предложен метод регистрации пороговых величин давления при превышении которых происходит – резкое увеличение массы пыли, выброшенной с поверхности, что связано с началом плавления. Определены границы начала плавления ряда металлов (олово, уран, свинец, галлий) в волне разгрузки.

Ключевые слова: ударная волна, лазерная доплеровская интерферометрия, PDV-метод, плавление металлов, волна разгрузки, ударноволновое пыление.

Введение

Определение области ударноволнового плавления металлов является достаточно сложной и трудоёмкой задачей [1-11]. Для многих металлов до настоящего времени точные значения границ области плавления, как в ударной волне так и в волне разгрузки отсутствуют. Основным методом определения области плавления металлов в ударной волне является регистрация зависимости продольной – (C_l) и объёмной – (C_v) скоростей звука от давления. В работе [11] обобщены результаты разных групп исследователей и проведена для алюминия дополнительная серия экспериментов в области давлений 40 – 160 ГПа. Данные работы [11] представлены на рисунке 1.

На представленной зависимости видно, что последние значения на кривой $C_l(P)$ лежат в области давлений 110 – 125 ГПа и имеют значительный разброс. Это, по-видимому, связано с тем, что при указанных давлениях на поверхности алюминия может присутствовать область двухфазного (твёрдое/жидкое) состояния и, в зависимости от состояния материала под точкой лазерной регистрации, значение скорости звука лежит на кривой $C_l(P)$ для твёрдого вещества или существенно ниже этой кривой (жидкое состояние).

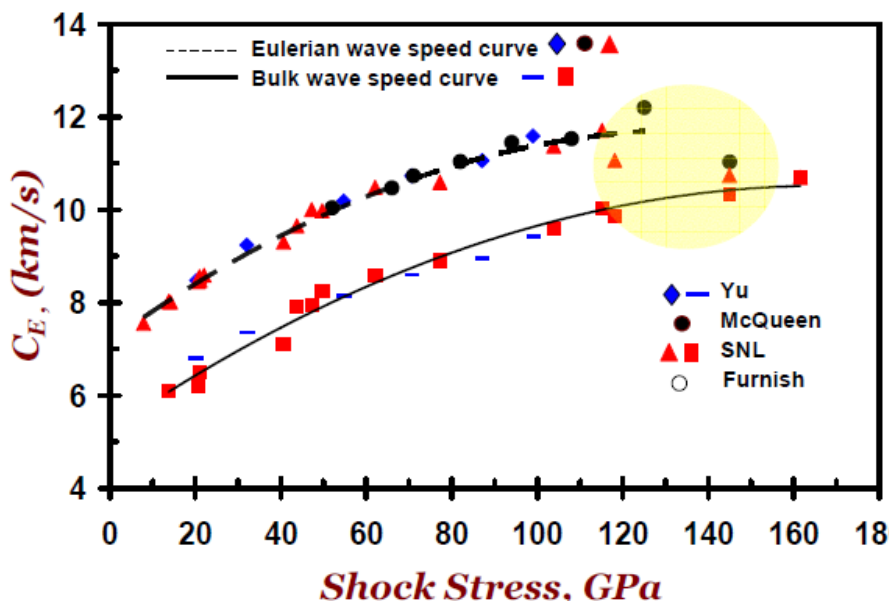


Рисунок 1. Зависимости продольной C_L (верхняя кривая) и объемной C_B (нижняя кривая) скоростей звука от давления в алюминии [11]

Общепринятой точкой зрения является то, что плавление начинается с границ зерен металла и распространяется внутрь зерен. В области давлений $P = 145 - 160$ ГПа значения скорости звука уже достаточно хорошо ложатся на кривую $C_B(P)$, из чего в работе [11] делается вывод о том, что при давлении $P = 145$ ГПа состояние материала близко к окончанию плавления.

Так же имеются экспериментальные значения давлений начала и окончания плавления для ряда металлов в работах: [12-18]. Так, например эти величины составили: для алюминия $P = 120 - 150$ ГПа, для железа $P = 243 - 300$ ГПа, для меди $P = 200 - 250$ ГПа, для тантала плавление начинается при $P = 290$ ГПа, для молибдена при $P = 390$ ГПа. Данные величины неплохо согласуются с расчетными значениями [17, 27].

Такую же экспериментально трудоемкую задачу представляет определение границ плавления металлов при разгрузке из ударно сжатого состояния [20-25]. Согласно расчетным данным [17, 27] значения начала и окончания плавления составили: для свинца $P = 26 - 36$ ГПа, алюминия $P = 69 - 102$ ГПа, железа $P = 137 - 192$ ГПа, меди $P = 137 - 185$ ГПа, молибдена $P = 237 - 332$ ГПа, тантала $P = 223 - 298$ ГПа. Следует отметить, что прочность металлов при нагревании и приближении к температуре плавления сохраняется практически до начала плавления. В экспериментах с твердым оловом при повышенных температурах [29, 30] было показано, что резкое падение его откольной прочности фактически началось с переходом через 0,99 температуры плавления.

В настоящей работе предложен метод определения границ начала плавления металлов в волне разгрузки основанный на определении давлений, при которых начинается интенсивный выброс частиц металла с поверхности исследуемых образцов.

1. Экспериментальные исследования

Для исследований выбраны металлы: олово, свинец, галлий и природный уран. Толщина исследуемых образцов составляла 2 - 4 мм, диаметр 40 - 90 мм. Ударная волна в образцах с известной шероховатостью создавалась либо непосредственно контактным нагружением от детонации заряда ВВ, который инициировался плосковолновым генератором, либо торможением на них высокоскоростных лайнеров из меди и стали. Это позволяло создавать в исследуемых образцах ударные волны амплитудой $P = 20 - 175$ ГПа. Для создания малых давлений ($P = 2 - 20$ ГПа) между ВВ и исследуемыми образцами помещался слой пенопласта различной толщины. После выхода ударной волны на свободную поверхность (СП) образца происходила разгрузка образцов в

вакуум или воздух. С помощью лазерного гетеродин интерферометра (метод PDV) [26] регистрировались скорости СП и потока пылевых частиц выбрасываемых с их поверхности. Параметры ударной волны в образцах определялись с помощью уравнений состояния исходя из зарегистрированных значений скорости СП. Шероховатость поверхности образцов измерялась с помощью лазерного профилометра.

2 Эксперименты с оловом

С оловом шероховатостью поверхности $Ra = 2,5 - 5$ проведена серия опытов в диапазоне давлений $P = 9 - 60$ ГПа. В области давления $P = 9 - 14$ ГПа метод регистрирует только скорость СП (рисунок 2а) и не регистрирует скорость пылевого потока. В диапазоне давлений $P = 16 - 60$ ГПа метод PDV регистрирует, как скорость СП в первые $0,2 - 1,5$ мкс (далее происходит экранирование лазерного луча плотным облаком частиц), так и скорость облака частиц (рисунок 2б).

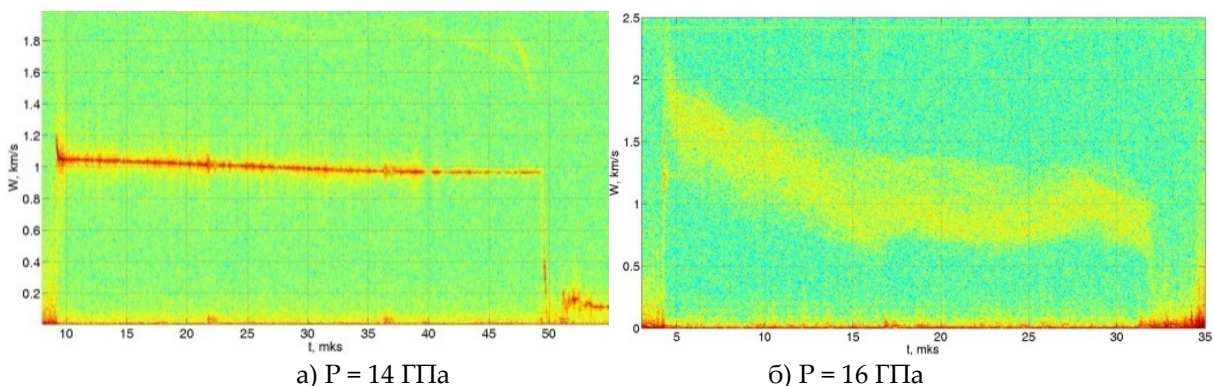


Рисунок 2.

На рисунке 2б видно уменьшение скорости частиц из-за их торможения в воздухе. В нашей работе [32] ранее было показано, что при шероховатости образцов $Ra = 0,32$ плавление начинается при давлении $P = 19$ ГПа. В работе [33] приведены результаты экспериментов и фазовая диаграмма олова, из которой следует, что плавление в волне разгрузки начинается при давлении $P > 20,5$ ГПа. В работе [34] показано, что при шероховатости $Ra = 0,16 - 0,32$, что интенсивный выброс частиц начинается при $P = 22$ ГПа, в работе [35] те же авторы при той же шероховатости уточнили свои данные при $P = 19,5$ ГПа. Таким образом, при шероховатости $Ra = 0,16 - 0,32$ границы начала плавления в волне разгрузки составляют $P = 19 \dots 20,5$ ГПа. При большей шероховатости ($Ra = 2,5 - 5$) интенсивный выброс частиц может начинаться при меньших давлениях $P = 16$ ГПа (рисунок 2б). Это, по-видимому, обусловлено реологическими свойствами (вязкость, пластичность, прочность) исследуемого материала. Проведенные нами эксперименты с медью показали, что в пластичной меди кумулятивный выброс частиц и чешуек из канавок начинается при давлениях $P = 30 - 40$ ГПа, что заведомо ниже расчетного давления плавления в волне разгрузки $P = 137$ ГПа.

3 Эксперименты с галлием

С образцами галлия ($Ra = 0,32$) проведено три эксперимента. При давлении $P = 7,5$ ГПа регистрируется только скорость СП (рисунок 3а). При давлении $P = 12$ ГПа регистрируется, как скорость СП ($W = 1,16$ км/с) так и скорость облака пыли ($W = 1,32$ км/с). Т.е. выброс частиц и плавление начинается в области давлений $P = 7,5 - 12$ ГПа. При давлении $P = 43$ ГПа (рисунок 3б) зарегистрировано интенсивное пыление поверхности галлия, скорость СП составила 3 км/с, максимальная скорость пыли при выходе ударной волны составила $W = 4,3$ км/с.

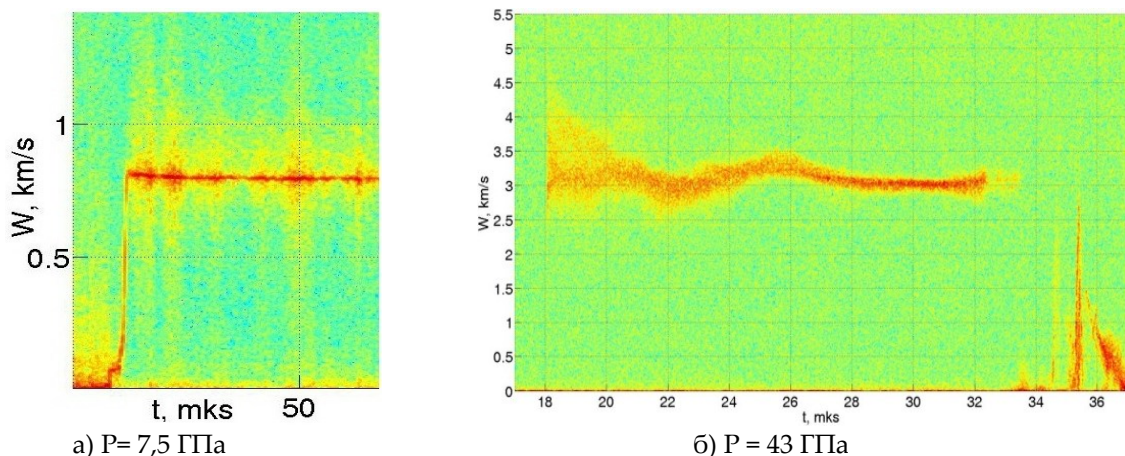


Рисунок 3

4 Эксперименты со свинцом

Ранее в работе [31] экспериментально было показано, что для свинца с полированной поверхностью ($Ra = 0,32$) до величины давления $P = 24$ ГПа регистрируется только скорость СП, а при $P > 25$ ГПа уже регистрируется скорость облака частиц, что с большой вероятностью связано с началом плавления металла в волне разгрузки. На (рисунок 4а) приведены результаты опыта с образцом свинца поверхность которого была зеркальной ($Ra = 0,08$). Амплитуда ударной волны составила $P = 31$ ГПа. Пылевой поток двигался в вакууме, и на спектрограмме торможение пыли практически не регистрируется. На спектрограмме видны скорость СП ($W = 1,6$ км/с) скорость потока пылевых частиц ($W = 2,2$ км/с).

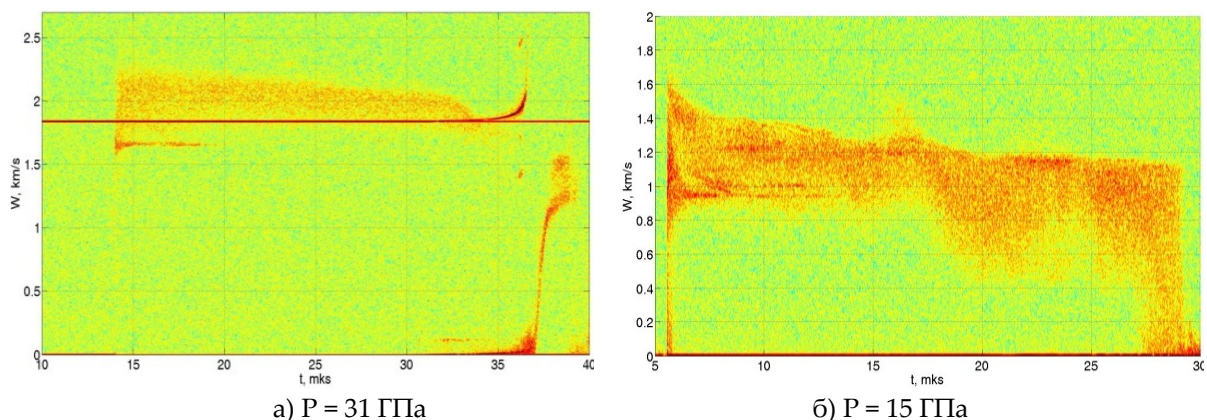


Рисунок 4.

При давлении ударной волны с амплитудой в диапазоне $P = 9 - 24$ ГПа для свинца с полированной поверхностью регистрируются спектрограммы аналогичные представленной на рисунке 4а. При шероховатости $Ra = 0,64$ и выше на спектрограммах во всем исследуемом диапазоне $P = 10 - 60$ ГПа наблюдается выброс пылевых частиц с поверхности. Для примера на рисунке 4б представлена спектрограмма скорости СП и пылевого потока для опыта с давлением $P = 15$ ГПа и шероховатостью $Ra = 5$. Видно что пылевой поток экранирует запись скорости СП, которая видна только в течении первых 5 мкс. Таким образом, в свинце с шероховатостью $Ra = 0,64$ и выше происходит выброс частиц как в твердом, так и в расплавленном состоянии [36]. Границы начала плавления свинца в волне разгрузки находятся в диапазоне $P = 24 - 25$ ГПа.

5 Эксперименты с природным ураном

В серии опытов с природным ураном получены следующие результаты. До давлений $P = 74$ ГПа ($Ra = 5$) не наблюдается выброса частиц с поверхности. На рисунке 5а представлена характерная спектрограмма для давления $P = 73$ ГПа, где пыление не регистрируется. В зависимости

от величины шероховатости ($Ra = 1,25 - 5$) в области давлений $P = 74 - 96$ ГПа начинается выброс частиц. Методом PDV регистрируются спектрограммы, как с выбросом, так и без выброса частиц, что обусловлено разной шероховатостью поверхности реологическими свойствами урана.

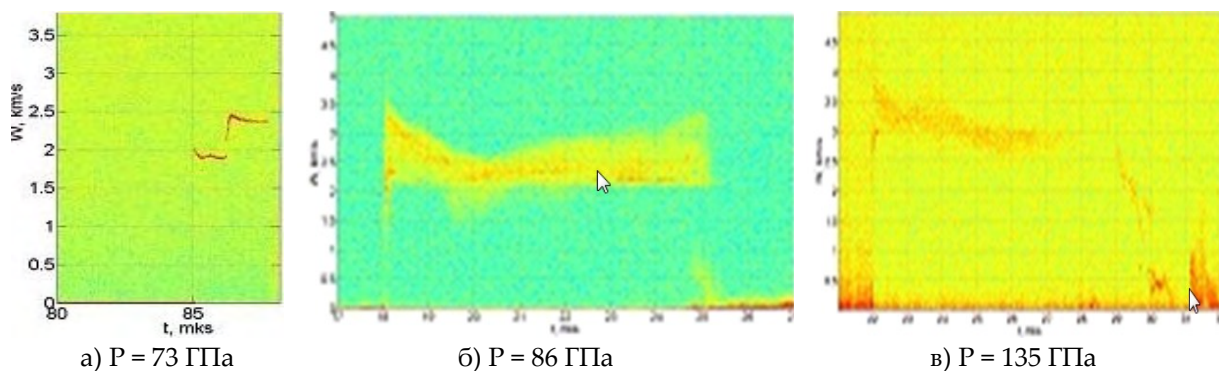


Рисунок 5.

Для примера на рисунке 5б представлена спектрограмма опыта с величиной давления $P = 86$ ГПа ($Ra = 5$), где зарегистрирован интенсивный выброс частиц. Спектрограммы, где всегда фиксируется пыление при любой шероховатости поверхности зарегистрированы в области давлений $P = 96 - 175$ ГПа (рисунок 5в). Таким образом, плавление урана в волне разгрузки может начинаться в области давлений $P = 74 - 96$ ГПа. Для более точного определения начала плавления необходимо провести опыты с шероховатостью поверхности образцов близкой к зеркальной ($Ra = 0,04 - 0,16$).

Выводы

В настоящей работе предложен метод определения границ начала плавления металлов в волне разгрузки. Суть метода заключается в том, что в металлах существуют некоторые пороговые значения давления, при превышении которых происходит резкое увеличение массы пыли выброшенной с поверхности, что связано с началом плавления металлов. Определены параметры начала плавления металлов в волне разгрузки: плавление олова начинается в области давлений $P = 19 - 20,5$ ГПа, свинца $P = 24 - 25$ ГПа, галлия $P = 7,5 - 12$ ГПа, природного урана $P = 74 - 96$ ГПа.

Список литературы

- 1 Catherine Mabire, Pierre L. Hereil. Shock induced polymorphic transition and melting of tin. Shock Compression of Condensed Matter. 1999. 93-96 p.
- 2 М.Н. Павловский, В.В. Комиссаров. Полиморфные превращения олова в ударных волнах сжатия и разгрузки. ЖЭТФ. 1990. т. 98. 1748-1751 с.
- 3 Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 632 с.
- 4 Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж. Уравнения состояния твердых тел по результатам исследования УВ. Высокоскоростные ударные явления. М. Мир. 1973. 299-427 с.
- 5 Catherine Mabire and Pierre L. Hérel. "Shock Induced Melting of Lead (Experimental Study)". AIP Conf. Proc. 620, 229. 2002.
- 6 E. B. Zaretsky and G. I. Kanel. "Impact response and dynamic strength of partially melted aluminum alloy". J. Appl. Phys. 112, 053511. 2012.
- 7 Yongtao Chen, Haibo Hu et. al. "Experimental study of ejecta on lead surface at different loading rates and amplitudes". AIP Conf. Proc. 1426, 1003. 2012.
- 8 D. Loison, T. de Resseguier et. al. "Laser shock-induced melting and fragmentation in metals". Proceedings of SCCM - 2001. Chicago. p. 1545-1548.

- 9 Kusubov A.S., Thiel M. van. Measurement of elastic and plastic unloading wave profiles in 2024-T4 aluminum alloy. // JAP, 1969, V.40, №9, P.3776.
- 10 T. de Rességuier, E. Lescoute, G. Morard, and F. Guyot. "Dynamic fragmentation as a possible diagnostic for high pressure melting in laser shockloaded iron". AIP Conf. Proc. 1195, 1007. 2009.
- 11 Reinhart W.D., Asay J.R., Chhabildas L.C., Alexander C.S. Investigation of 6061-T6 aluminum strength properties to 160GPa. Proceedings of Shock Compression of Condensed Matter – 2009. P.977 – 980.
- 12 McQueen R.G., Fritz J.N., Morris C.E. // Shock waves in condensed matter, 1983 / Ed. J.R. Assay et al. Amsterdam, 1984 Chap.95-98.
- 13 Brawn J.M., McQueen R.G. // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91, N B7. P. 7485-7494.
- 14 Hixon R.S., Bonnes D.A., Shaner J.W. // Phys. Rev. Lett. 1989 Vol. 62, N 6. P. 637-640.
- 15 Brown J.M., Shaner J.W. // Shock waves in condensed matter, 1983 / Ed. J.R. Assay et al. Amsterdam, 1984. Chap. 2. P. 91-94.
- 16 Bonnes D.A., Brown J.M., Shaner J.W. // Shock waves in condensed matter, 1987 / Ed. S.C. Schmidt, N.C. Holmes. Amsterdam, 1988. Chap. 2. P. 115-118.
- 17 V.P. Копышев, А.В. Медведев. Thermodynamic model of dense and heated matter.// Soviet Technology Reviews/ Section B. Thermal Physics Reviews. Edited by A.E. Sheindlin and V.E. Fortov. Vol. 5. 1993. P.37-93
- 18 Канель Г.И., Фортов В.Е. // Успехи механики. 1987. Т. 10, № 3. С. 3-81.
- 19 Степанов Г.В. Поведение конструкционных материалов в упругопластических волнах разгрузки. Киев: Наук. думка, 1978. 112с.
- 20 Grady D.E. // J. Phys. Ser. IV. 1991. Vol. 1. P. 653-660.
- 21 "Ejecta particle size distributions for shock-loaded Sn and Al targets". Proceedings of SCCM – 2001. Atlanta. p. 531-534.
- 22 D. Partouche-Sebban, J. L. Pelissier, F. G. Abeyta, W. W. Anderson et. al. "Measurement of the shock-heated melt curve of lead using pyrometry and reflectometry". 2007.
- 23 Yongtao Chen, Haibo Hu et. al. "Experimental study of ejecta on lead surface at different loading rates and amplitudes". AIP Conf. Proc. 1426, 1003. 2012.
- 24 Didier Loison, Thibaut de Rességuier et. al. "Laser shock-induced melting and fragmentation in metals". AIP Conf. Proc. 1426, 1545. 2012.
- 25 T. de Resseguier, L. Signor, A. Dragon, G. Roy. "Dynamic fragmentation of laser shock-melted tin: experiment and modelling". Int J Fract. 2010.
- 26 O.T. Strand, D.R. Goosman, C. Martinez, and T.L. Whitworth, «Compact system for high-speed Velocimetry using heterodyne techniques», «Rev. Sci. Instrum.», 77. 2006, p. 083108-1 - 083108-8.
- 27 А.Б. Медведев. Модель уравнения состояния с учетом испарения, ионизации и плавления. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Теоритическая и прикладная физика. 1992. Вып.1.12-19.
- 28 Е.А. Козлов, С.А. Бричков, Д.П. Кучко, М.А. Ральников, А.В. Ольховский, Н.С. Жиялева, Л.П. Брезгина, В.Н. Повышев, // Международная конференция "Ударные волны в конденсированном веществе" (SWCM-2012)? 16 – 21 сентября 2012, Киев, Украина.
- 29 E.V. Zaretsky and G.I. Kanel, in ДУМАТ 2009, EDP Sciences (2009), p.27.
- 30 С.В. Разоренов, // Письма в ЖЭТФ т.102 N7-8 2015.
- 31 А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.В. Назаров, Е.А. Чудаков, Д.А. Калашников, Е.И. Бутусов и др. // Исследование особенностей поведения свинца при ударно-волновом нагружении и последующей разгрузке, XV Харитоновские чтения, РФЯЦ-ВНИИЭФ, с. 274.
- 32 С.А. Финюшин, А.Л. Михайлов, А.В. Федоров, И.Р. Трунин, Д.В. Назаров, И.А. Терешкина, Д.А. Калашников, Е.А. Чудаков // Регистрация фазовых переходов в олове в ударной волне и волне

- разгрузки с помощью лазерного интерферометра, XV Харитоновские чтения, РФЯЦ-ВНИИЭФ, с. 282.
- 33 P. Shapron, P. Elias, B. Laurent. Experimental determination of the pressure inducing melting in release for shock-loaded metallic samples / SCCM- 1987, edited by S.C. Schmidt, N.C. Holmes, p. 171-173.
- 34 M.B. Zellner, M. Grover, J.E. Hammerberg, R.S. Hixson, A.J. Iverson, G.S. Macrum, K.B. Morley, A.W. Obst, R.T. Olson, J.R. Payton, P.A. Rigg, N. Routley, G.D. Stevens, W.D. Turley, L. Veaser, and W.T. Buttler, J.Appl.Phys.,102,013522 (2007).
- 35 M.B. Zellner, G. Dimonte, T.C. Germann, J.E. Yammerberg et al. Influence of shockwave profile on ejecta / SCCM-2009? Edited by M.I. Ellert, W.T. Buttler, M.D. Furnish, W.W. Anderson, W.G. Proud, p. 1047-1050.
- 36 Э.Э. Лин, А.Л. Михайлов, В.Н. Хворостин // Письма в ЖЭТФ т.42, вып. 15, с. 67-71. 2016.

ДИАГНОСТИКА ПЛАВЛЕНИЯ СВИНЦА МЕТОДОМ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОБРАЗЦОВ СОХРАНЕННЫХ ПОСЛЕ УДАРНОВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ И РАЗГРУЗКИ

*А.Н. Малышев, О.Н. Игнатова, Н.Ю. Илюшкина, В.И. Скоков,
А.В. Шиманов, А.Б. Георгиевская, А.С. Соколова*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

В данной работе приведены результаты исследования плавления свинца марки С1 при ударно-волновом нагружении и разгрузке методом металлографического анализа. Нагружение образцов свинца, расположенных внутри титановой капсулы, осуществлялось плоской ударной волной с помощью алюминиевого ударника толщиной 6 мм, который разгонялся продуктами взрыва ВВ. Приведены результаты металлографического анализа образцов в исходном состоянии, подвергнутых термической обработке при нормальных условиях и сохраненных после ударно-волнового нагружения. Обнаружены следы плавления в свинце после ударно-волнового нагружения давлением 25.6 ГПа и последующей разгрузки.

Введение

При исследовании поведения металлов под воздействием ударных волн различной интенсивности одними из важных характеристик являются значения давления и температуры, при которых происходит смена фазового состояния, связанная с плавлением. Физические и механические свойства при этом изменяются – происходит увеличение удельного объема, выделение скрытой теплоты фазового перехода, уменьшение вплоть до нуля сдвиговой прочности и др. Смена фазового состояния, связанная с плавлением, может проходить как во фронте ударной волны, так и при последующей изэнтропической разгрузке.

Таким образом, при построении уравнений состояния (УРС) и моделей прочности необходимо надежно знать величину давления начала фазового перехода, связанного с плавлением металла.

В литературе имеется некоторый разброс по экспериментальным значениям величины давления, при котором свинец переходит в жидкое состояние при разгрузке. Согласно данным работы [1] это давление находится в диапазоне 20-30 ГПа, в [2] отмечено, что плавление свинца возникает при давлениях $P=23-25$ ГПа, в [3] показано начало плавления при $P\geq 25$ ГПа, по результатам [4] плавление предполагается в диапазоне давлений 27-33 ГПа, а в [5] утверждается, что при 46 ГПа свинец находится в расплавленном состоянии, что также подтверждают расчетные оценки, сделанные в работе [6]. Таким образом, экспериментальный разброс давления ударно-