

УДК 536.2.023; 532.591

УДАРНОЕ СЖАТИЕ МОЛИБДЕНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

© 2023 г. С. И. Ашитков¹, Е. В. Струлева^{1, *}, П. С. Комаров¹, С. А. Евлашин²¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

*E-mail: struleva.evgenia@yandex.ru

Поступило в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 20.06.2023 г.

Принято к публикации 03.10.2023 г.

В эксперименте исследовано поведение молибдена под действием импульсов нагрузки пикосекундной длительности. Методом спектральной интерферометрии в режиме однократного воздействия в пикосекундном диапазоне регистрировалось изменение фазы и амплитуды диагностического импульса, отраженного от свободной поверхности образца. В пленочном образце молибдена субмикронной толщины реализованы напряжения сжатия, достигающие 89 ГПа и сопровождающиеся существенным ростом коэффициента отражения поверхности.

DOI: 10.31857/S0040364423050010

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты со сжатием вещества в сильных ударных волнах (УВ) первоначально проводились для получения сведений об уравнениях состояния активных и конструкционных материалов в мегабарном (миллионы атмосфер) диапазоне давлений, а в уникальных экспериментах с использованием ядерных взрывов — до ста миллионов атмосфер [1]. В настоящее время существует широкая область задач, в которых применяется техника ударно-волнового нагружения, характеризующаяся не только широким диапазоном достижимых давлений и температур, но и чрезвычайно высокими скоростями их изменения. Структура и эволюция УВ связаны с процессами упругопластического деформирования, физико-химических превращений и разрушения в материале, которые сопровождаются изменениями сжимаемости материала и, соответственно, приводят к образованию характерных особенностей на профилях волн сжатия и разрежения. Разработаны современные методы генерации УВ, регистрации волновых профилей с высоким пространственным и временным разрешением, а также интерпретации ударно-волновых явлений в конденсированных средах, позволившие получить сведения об упругопластических и прочностных свойствах различных материалов [1–9].

Молибден является тугоплавким, высокопрочным конструкционным материалом, широко применяемым в промышленности. Исследование температурно-прочностных свойств молибдена в субмикросекундном диапазоне проводилось в ряде работ [10–14]. Значительный экспериментальный

и теоретический интерес связан с развитием лазерных технологий селективной обработки слоев солнечных элементов [15], в том числе состоящих из молибдена [16].

Целью данной работы является исследование поведения молибдена при высоком давлении и условиях ударной нагрузки пикосекундной длительности.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения экспериментальных исследований смещения свободной поверхности $z_{fs}(t)$ пленочных образцов использовалась pump-probe-методика спектральной интерферометрии. В качестве источника излучения применялась фемтосекундная титан-сапфировая система, реализованная по принципу усиления чирпированных импульсов. Длина волны излучения — 800 нм, длительность чирпированного импульса — 300 пс, энергия в импульсе — до 2 мДж. В качестве экспериментального образца использовалась пленка молибдена толщиной 740 ± 10 нм, нанесенная на стеклянную подложку методом магнетронного напыления.

В эксперименте нагревающее лазерное излучение фокусировалось на мишень со стороны стеклянной подложки, наблюдение зондирующим импульсом проходило со стороны тыльной поверхности. Нагревающее излучение фокусировалось в эллиптическое пятно с гауссовым распределением интенсивности и параметрами $r_{0x} = 42$ мкм, $r_{0y} = 36$ мкм по уровню e^{-1} . Энергия достигала 300 мкДж, а интенсивность — 2×10^{12} Вт/см².

Для диагностики использовалась другая часть chirпированного импульса длительностью 300 пс и шириной спектра 40 нм на центральной длине волны 800 нм. Диагностической схемой являлся интерферометр Майкельсона, совмещенный с дифракционным спектрометром. Временное разрешение схемы измерений равно 1 пс. Пространственное разрешение в плоскости мишени составляло 3 мкм [17]. Более подробно экспериментальная схема и методики обработки интерферограмм представлены в работах [17–19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а приведены график изменения фазы диагностического импульса при выходе УВ на тыльную свободную поверхность образца молибдена и профиль скорости $u_{fs}(t)$, полученный путем дифференцирования зависимости смещения $z(t)$. На рис. 1б профиль скорости $u_{fs}(t)$ соотносится с графиком изменения коэффициента отражения образца R/R_0 ($R_0 = 0.67$ – начальный коэффициент отражения Мо на длине волны 800 нм

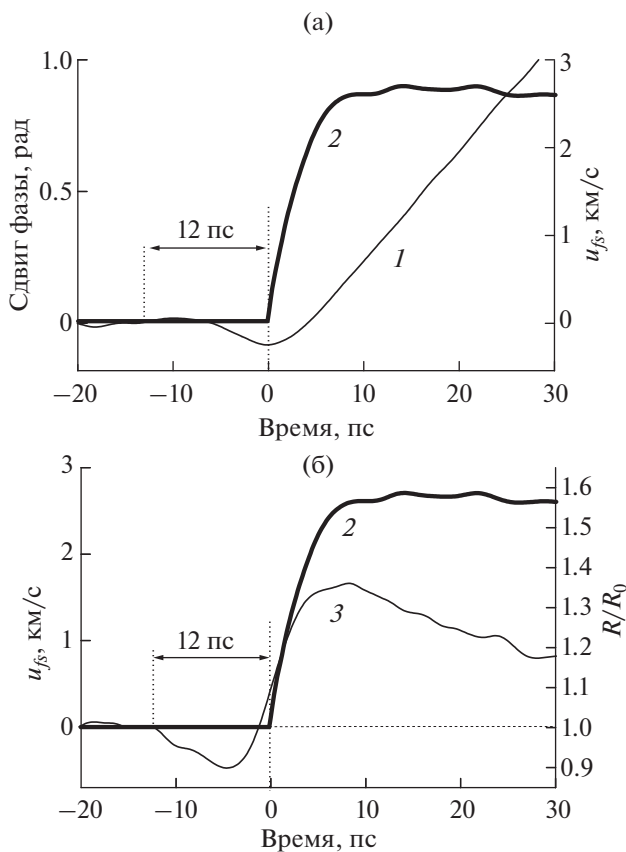


Рис. 1. Временные профили (а) смещения (1) и скорости движения свободной поверхности (2); (б) – изменения коэффициента отражения (3) образца молибдена субмикронной толщины при $F = 2$ Дж/см².

[20]). Профили построены для центральной части области взаимодействия при плотности энергии лазерного импульса $F = 2$ Дж/см². Начальный момент времени $t = 0$ на графиках соответствует началу движения границы при выходе УВ.

Измеренное максимальное значение скорости свободной поверхности за фронтом УВ составило $u_{fs} = 2.6$ км/с. Согласно известной ударной адиабате молибдена $U_S = 5.14 + 1.22u_p$ (здесь $u_p = u_{fs}/2$) [10], скорость ударной волны в данном случае составляет $U_S = 6.7$ км/с. С использованием уравнений Рэнкина–Гюгоньо по известным значениям скорости U_S и u_p можно рассчитать значения давления за фронтом УВ по соотношению $p = \rho_0 U_S u_p = 89$ ГПа, где плотность молибдена $\rho_0 = 10.2$ г/см³. Соответствующее изменение удельного объема, согласно приведенной на рис. 2 p – V -диаграмме, при этом равно $V/V_0 = 0.81$.

Примерно за 12 пс до выхода УВ в эксперименте регистрировались изменения амплитуды и фазы диагностического импульса (рис. 1), которые не могут быть связаны только с изменением оптических констант скин-слоя за фронтом УВ. Действительно, толщина скин-слоя $l = \lambda/(4\pi k_0) = 17$ нм (здесь $k_0 = 3.6$ [20]), время прохождения УВ скин-слоя равно $t^* = l/U_S \approx 2$ –3 пс. При этом наблюдаемый “отрицательный” сдвиг фазы и уменьшение коэффициента отражения примерно на 10%, скорее всего, связаны с тепловым предвестником [21], обгоняющим фронт УВ вследствие высокой теплопроводности металла.

Кроме того, выход УВ сопровождается ростом коэффициента отражения примерно на 35% $R/R_0 = 1.35$, который, очевидно, связан с оцененным увеличением плотности молибдена при сжатии на 19%.

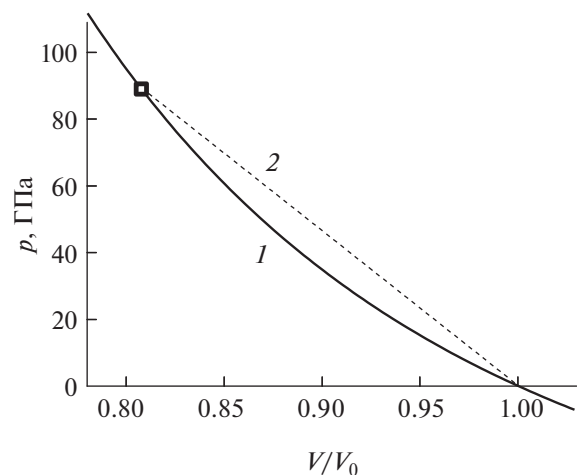


Рис. 2. p – V -диаграмма молибдена: 1 – ударная адиабата, 2 – линия Рэлея.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерферометрическим методом непрерывной диагностики с пикосекундным разрешением исследована динамика движения свободной (тыльной) поверхности молибдена при выходе упругой ударной волны, генерируемой лазерными импульсами длительностью 20 пс. Зарегистрированное экспериментально максимальное значение напряжения сжатия молибдена при пиковой скорости $u_{fs} = 2.6$ км/с составляет 89 ГПа и сопровождается увеличением коэффициента отражения поверхности при выходе УВ на 35%. Результаты исследований представляют интерес для уточнения уравнений состояния, создания оптических моделей металлов, молекулярно-динамического моделирования сжатия молибдена в пикосекундном диапазоне длительности нагрузки, развития лазерных технологий обработки материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19_19_00697-П) на оборудовании ЦКП “Лазерный фемтосекундный комплекс” ОИВТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. Ударные волны в физике конденсированного состояния // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 809.
2. Whitley V.H., McGrane S.D., Eakins D.E. et al. The Elastic–Plastic Response of Aluminum Films to Ultrafast Laser-generated Shocks // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. № 1. P. 013505.
3. Demaske B.J., Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A., Oleynik I.I. Ultrashort Shock Waves in Nickel Induced by Femtosecond Laser Pulses // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. № 5. P. 054109.
4. Crowhurst J.C., Armstrong M.R., Knight K.B. et al. Invariance of the Dissipative Action at Ultrahigh Strain Rates above the Strong Shock Threshold // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 144302.
5. Ашитков С.И., Комаров П.С., Агранат М.Б. и др. Реализация предельных значений объемной и сдвиговой прочности железа при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами // Письма ЖЭТФ. 2013. Т. 98. № 7–8. С. 439.
6. Crowhurst J.C., Reed B.W., Armstrong M.R. et al. The $\alpha \rightarrow \epsilon$ Phase Transition in Iron at Strain Rates up to $\sim 10^9$ s $^{-1}$ // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. № 11. P. 113506.
7. Струлёва Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Откольная прочность титана при высокоскоростном растяжении // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 823.
8. Струлёва Е.В., Комаров П.С., Евлашин С.А., Ашитков С.И. Поведение магниевых сплавов при высокоскоростной деформации под действием ударно-волновой нагрузки // ТВТ. 2022. Т. 60. № 5. С. 793.
9. Ashitkov S., Komarov P., Romashevskiy S., Struleva E., Evlashin S. Shock Compression of Magnesium Alloy by Ultrashort Loads Driven by Sub-picosecond Laser Pulses // J. Appl. Phys. 2022. V. 132. № 17. P. 175104.
10. Hixson R.S., Fritz J.N. Shock Compression of Tungsten and Molybdenum // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. № 4. P. 1721.
11. Duffy T.S., Ahrens T.J. Dynamic Response of Molybdenum Shock Compressed at 1400°C // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. № 2. P. 835.
12. Furnish M.D., Chhabildas L.C. The Minerals, Metals, and Materials Society, High Strain Rate Behavior of Refractory Metals and Alloys / Eds. Asfahani R. et al. Warrendale: Acad. Press, 1992. P. 229.
13. Chhabildas L.C., Barker L.M., Asay J.R., Trucano T.G. Relationship of Fragment Size to Normalized Spall Strength for Materials // Int. J. Impact Eng. 1990. V. 10. № 1–4. P. 107.
14. Senchenko V.N., Belikov R.S., Popov V.S. Experimental Investigation of Thermophysical Properties of Eutectic Mo–C, Graphite, and Tantalum at High Temperatures // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 774. 012020.
15. Heise G., Domke M., Konrad J., Sarrach S., Sotrop J., Huber H.P. Laser Lift-off Initiated by Direct Induced Ablation of Different Metal Thin Films with Ultrashort Laser Pulses // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. № 31. P. 315303.
16. Chang T.-L., Chen C.-Yu, Wang C.-P. Precise Ultrafast Laser Micromachining in Thin-film CIGS Photovoltaic Modules // Microelectron. Eng. 2013. V. 110. P. 381.
17. Струлёва Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Интерферометрическая диагностика нанодетонаций поверхности мишени в пикосекундном диапазоне при импульсном лазерном воздействии // Вестник Объединенного института высоких температур. 2018. Т. 1. № 1. С. 130.
18. Geindre J.P., Audebert P., Rebibo S., Gauthier J.C. Single-shot Spectral Interferometry with Chirped Pulses // Opt. Lett. 2001. V. 26. № 20. P. 1612.
19. Temnov V.V., Sokolovski-Tinten K., Zhou P., von der Linde D. Ultrafast Imaging Interferometry at Femtosecond Laser-excited Surfaces // J. Opt. Soc. Am. B. 2006. V. 23. № 9. P. 1954.
20. Query M.R. Optical Constants of Minerals and Other Materials from the Millimeter to the Ultraviolet. Chemical Research, Development & Engineering Center, US Army Armament, Munitions, Chemical Command. Kansas City, 1987.
21. Batani D., Koenig M., Benuzzi A., Krasnyuk I.K., Pashinin P.P., Semenov A.Yu., Lomonosov I.V., Fortov V.E. Problems in the Optical Measurement of Dense Plasma Heating in Laser Shock Wave Compression // Plasma Phys. Control. Fusion. 1999. V. 41. P. 93.