

УДК 536.2.023;532.591

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ РАСПЛАВА ТИТАНА ПРИ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ РАСТЯЖЕНИЯ

© 2019 г. Е. В. Струлева<sup>1</sup>\*, П. С. Комаров<sup>1</sup>, С. И. Ашитков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

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

Поступило в редакцию 22.04.2019 г.

После доработки 22.04.2019 г.

Принято к публикации 16.05.2019 г.

Представлены результаты исследования разрушения жидкого титана при предельно высокой скорости деформации. Определено значение растягивающих напряжений, приводящих к нарушению сплошности расплава титана при скорости деформации  $\sim 10^9$  с<sup>-1</sup>. Для исследования движения поверхности титановой мишени, вызванного воздействием фемтосекундных лазерных импульсов, применялась интерферометрия с использованием частотно-модулированного диагностического импульса с пикосекундным разрешением.

DOI: 10.1134/S0040364419060164

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из актуальных задач является исследование динамической прочности жидких металлов, которые могут быть использованы в качестве теплоносителей в импульсных энергетических установках. Также важным направлением исследований остается разработка лазерных технологий обработки материалов и получения наноразмерных частиц. Помимо нужд широкого практического применения, исследования прочностных свойств необходимы для развития физики метастабильных состояний, изучения особенностей поведения конденсированного вещества вблизи теоретического предела прочности в гидродинамических и молекулярно-динамических расчетах для металлов в двухтемпературном состоянии [1–3], проявляющихся при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ). Жидкости, включая расплавы металлов при отрицательном давлении, находятся в метастабильном состоянии [4–6], распад которого при разрушении происходит в результате кавитационного процесса (образования, роста и слияния зародышей паровой фазы). Высокоскоростное разрушение представляет собой кинетический процесс, поэтому динамическая прочность конденсированного вещества зависит от скорости деформации.

В работах [1, 7–10] содержится достаточно обширный материал по сопротивлению деформации и разрушению металлов в твердом состоянии в широком диапазоне температур и длительностей нагрузок. В [6] представлены расчетные зависимости роста динамической прочности для

ряда жидких металлов (Fe, Ti, Pb, Al, Cu, Ni) в широком диапазоне скоростей деформации. В то же время экспериментальных исследований динамической прочности жидких металлов выполнено недостаточно [11–18]. В литературе отсутствуют экспериментальные данные о прочности расплава на разрыв для ряда металлов, в том числе для титана.

В данной работе с помощью интерферометрической методики с использованием частотно-модулированного (чирпированного) диагностического импульса впервые измерена динамическая прочность жидкого титана в пикосекундном диапазоне длительности нагрузки вблизи предела теоретической прочности путем лазерного нагрева вещества импульсами фемтосекундной длительности.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Источником ФЛИ являлась титан-сапфировая лазерная система, входящая в состав Центр коллективного пользования “Лазерный фемтосекундный комплекс”. Лазерная система генерирует фемтосекундные импульсы с энергией до 2 мДж на длине волны 800 нм. После преобразования во вторую гармонику в кристалле ВВО (борат бария) s-поляризованный лазерный импульс длительностью 40 фс на длине волны излучения 400 нм фокусировался на поверхности мишени под углом 60° линзой с фокусным расстоянием 20 см. Пространственное распределение плотности энергии в фокальном пятне соответствовало гауссову с радиусом 14 мкм по уровню  $e^{-1}$ . Для изменения плотности энергии нагревающего и зондирующе-

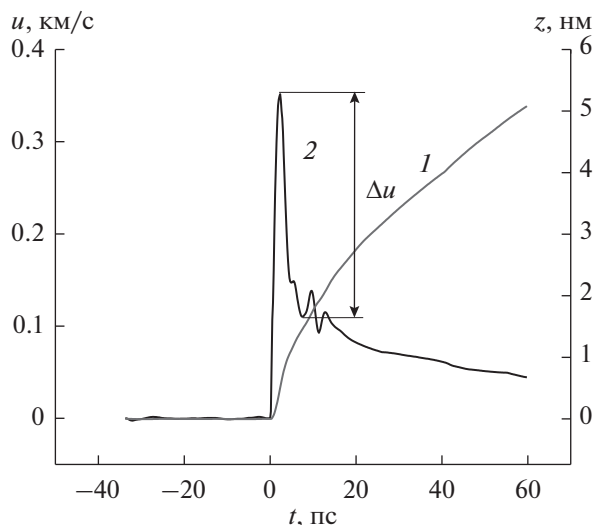


Рис. 1. Зависимость смещения (1) и скорости движения (2) поверхности абляционного слоя от времени при  $F_0/F_a = 1.5$ .

го импульсов в схеме применялись аттенюаторы, состоящие из полуволновой пластины и призмы Глана. Энергия в каждом импульсе измерялась калиброванным фотодиодом.

В качестве экспериментального образца использовалась пленка титана толщиной 700 нм, нанесенная на стеклянную подложку методом магнетронного напыления.

Для диагностики часть chirпированного импульса длительностью 300 пс с шириной спектра 40 нм и центральной длиной волны  $\lambda_0 = 800$  нм отводилась из лазерного тракта перед компрессором. В экспериментальной схеме был собран интерферометр Майкельсона, совмещенный с дифракционным спектрометром. Применяемая методика измерений обеспечивала непрерывную регистрацию динамики процесса во временном интервале  $\Delta t = 0-200$  пс с временным разрешением  $\delta t \approx 2$  пс. Более подробно экспериментальная схема и методика измерений описаны в работе [19].

Для восстановления пространственно-временных распределений изменения фазы  $\Delta\varphi(x, t)$  диагностической волны, отраженной от мишени в области взаимодействия, применялся двумерный фурье-анализ интерферограмм [19–21]. Изменение фазы  $\Delta\varphi(t)$  описывает смещение границы поверхности  $z(t)$ , величина которого определяется по соотношению  $z(t) = \frac{\Delta\varphi(t)\lambda}{4\pi}$ . При этом точность измерения фазы составляла  $\delta\varphi \approx 0.02$  рад, что соответствует погрешности определения смещения поверхности на уровне  $\delta z \approx 1-2$  нм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведен профиль смещения  $z(t)$ , измеренный в центре области взаимодействия при плотности энергии лазерного излучения  $F_0/F_a = 1.5$ , где  $F_0$  – плотность энергии падающего излучения в центре фокального пятна, а  $F_a$  – порог абляции титана. Также на графике приведен профиль скорости поверхности  $u(t)$ , полученный дифференцированием зависимости  $z(t)$ .

На начальной стадии в интервале от 0 до 2.3 пс наблюдается резкий рост скорости движения поверхности до максимального значения  $u_{\max} \approx 0.35$  км/с под действием градиента давления в нагретом слое толщиной  $d_T$ . В интервале от 2.3 до 7.7 пс скорость движения снижается до 0.11 км/с за счет уменьшения давления и возрастающей силы сопротивления вещества растяжению. В случае превышения величиной растягивающих напряжений прочности расплава в последнем возникают кавитационное разрушение и отрыв части нагретого слоя. Далее на временах  $t > 50$  пс слой движется примерно с постоянной скоростью  $\sim 0.05$  км/с для данного значения  $F_0$  (разлет по инерции).

Величина растягивающего напряжения непосредственно перед разрушением определялась по декременту скорости  $\Delta u$  между ее максимальным значением и значением перед откольным импульсом (рис. 1) по соотношению  $\sigma = \rho c_s \Delta u / 2$  [1, 11, 12]. Здесь  $\rho$  и  $c_s$  – соответственно плотность и скорость звука в веществе. Полагая для жидкого титана при температуре  $\sim 10^3$  К  $c_s \approx 4.4$  км/с и  $\rho \approx 4120$  кг/м<sup>3</sup> [22, 23], а также с учетом измеренного значения  $\Delta u = 0.24$  км/с, получаем величину динамической прочности  $\sigma = 2.2$  ГПа.

Скорость деформации, согласно [1], определяется выражением  $\dot{\epsilon} = \frac{\Delta u}{\Delta t} \frac{1}{2c_s}$  и составляет  $\dot{\epsilon} \approx 5 \times 10^9$  с<sup>-1</sup>. Здесь  $\Delta t = t_{\min} - t_{\max}$ , где  $t_{\max}$ ,  $t_{\min}$  – время, соответствующее максимальному и минимальному значению скорости  $u(t)$ .

На рис. 2 приведен характерный профиль абляционного кратера, измеренный с помощью метода интерференционной микроскопии [24]. При превышении порога абляции в  $F_0/F_a \approx 1.5$  глубина в центре кратера достигала  $h \approx 12$  нм.

Для грубой оценки температуры расплава  $T$  вблизи порога абляции воспользуемся соотношением

$$\frac{(1-R)F}{d_T} = c\rho\Delta T + H_m,$$

где  $\Delta T = T - T_0$  – приращение температуры ( $T_0 = 300$  К – начальная температура).

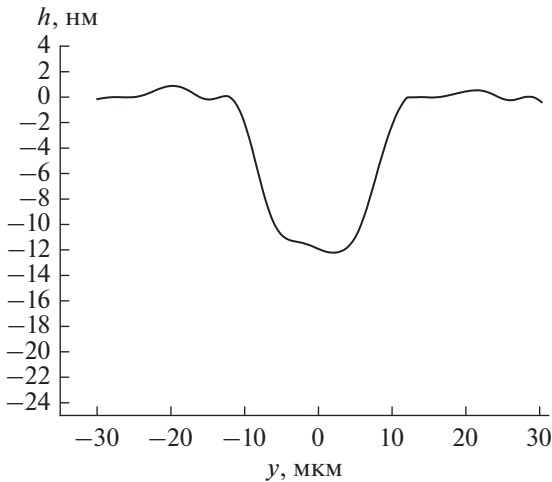


Рис. 2. Профиль кратера абляции на поверхности титана после воздействия ФЛИ с  $\tau_L = 40$  фс и  $F_0/F_a = 1.5$ .

Положим, что толщина прогреваемого слоя  $d_T$  в 2–3 раза превышает  $h \approx 12$  нм, что характерно для термомеханической абляции металлов [25]. Принимая для титана значение коэффициента отражения  $R \approx 0.7$ , теплоемкости  $c = 989.2$  Дж/(кг К) (для 2000 К), плотности  $\rho \approx 4120$  кг/м<sup>3</sup> и удельной теплоты плавления  $H_m = 15.5$  кДж/моль [23, 26], можно оценить, что при плотности энергии нагревающего импульса  $F_0 = 1.5F_a = 0.24$  Дж/см<sup>2</sup> [27] температура расплава составляет  $T \approx 5\text{--}7$  кК. Эта оценка примерно в 2.5–3.5 раза превышает значенные температуры плавления титана в равновесных условиях  $T_{\text{melt}} = 1941$  К [26].

Результаты измерения динамической прочности и скорости деформации, а также оценка температуры вблизи порога абляции титана согласуются с расчетными данными работы [6].

Вблизи абляционного порога глубина  $L_{\text{Spall}}$ , на которой возникает кавитация и разрушение расплава, должна соответствовать глубине образующегося кратера (рис. 2). Значение  $L_{\text{Spall}}$  определяется по динамике разлета слоя  $u(t)$ , согласно [7], по выражению  $L_{\text{Spall}} = c_s \Delta t / 2$ . Полученное таким образом значение  $L_{\text{Spall}} \approx 12$  нм при  $F_0/F_a = 1.5$  совпадает с измеренной глубиной кратера  $h$  (рис. 2).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерферометрическим методом с пикосекундным разрешением исследована динамика движения абляционного слоя пленочного образца титана под действием растягивающих напряжений, создаваемых импульсами фемтосекундной длительности. Впервые определена динамическая прочность жидкого титана, равная 2.2 ГПа при скорости деформации  $5 \times 10^9$  с<sup>-1</sup>. Экспери-

ментальные результаты могут представлять интерес для совершенствования кинетических моделей разрушения расплавов, а также для задач прогнозирования кавитации в жидких металлах, актуальных для современной энергетики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 18-38-00662).

### 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. Агранат М.Б., Анисимов С.И., Ашитков С.И., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Комаров П.С., Овчинников А.В., Фортвов В.Е., Хохлов В.А., Шепелев В.В. Прочностные свойства расплава алюминия в условиях экстремально высоких темпов растяжения при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. № 9. С. 517.
3. Ашитков С.И., Комаров П.С., Струлева Е.В., Агранат М.Б., Канель Г.И. Механические и оптические свойства ванадия под действием ударных нагрузок пикосекундного диапазона // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. № 4. С. 294.
4. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.
5. Kuksin Yu., Norman G.E., Pisarev V.V., Stegailov V.V., Yanilkin A.V. Theory and Molecular Dynamics Modeling of Spall Fracture in Liquids // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. № 17. P. 174101.
6. Mayer A.E., Mayer P.N. Continuum Model of Tensile Fracture of Metal Melts and Its Application to a Problem of High-current Electron Irradiation of Metals // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 035903.
7. Kanel G.I. Spall Fracture: Methodological Aspects, Mechanisms and Governing Factors // Int. J. Fract. 2010. V. 163. P. 173.
8. Ашитков С.И., Комаров П.С., Струлева Е.В., Агранат М.Б. Сопротивление деформированию титана вблизи теоретического предела прочности // ТВТ. 2018. Т. 56. № 6. С. 897.
9. Ашитков С.И., Комаров П.С., Агранат М.Б., Канель Г.И., Фортвов В.Е. Реализация предельных значений объемной и сдвиговой прочности железа при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. С. 439.
10. Krasnyuk I.K., Pashinin P.P., Semenov A.Yu., Khishchenko K.V., Fortov V.E. Study of Extreme States of Matter at High Energy Densities and High Strain Rates with Powerful Lasers // Laser Phys. 2016. V. 26. № 9. P. 094001.
11. Канель Г.И., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В. Динамическая прочность расплавов олова и свинца // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. № 8. С. 615.
12. Ашитков С.И., Комаров П.С., Овчинников А.В., Струлева Е.В., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Агранат М.Б. Абляция металлов и образование наноструктур под действием фемтосекундных лазерных импульсов // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 6. С. 535.

13. *Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Grady D.E.* The Spall Strength of Metals at Elevated Temperatures // AIP Conf. Proc. 1996. V. 370. P. 503.
14. *Zaretsky E.B., Kanel G.I.* Impact Response and Dynamic Strength of Partially Melted Aluminum Alloy // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. P. 053511.
15. *Dudarev E.F., Markov A.B., Mayer A.E., Bakach G.P., Tabachenko A.N., Kashin O.A., Pochivalova G.P., Sko-syrskii A.B., Kitsanov S.A., Zhorovkov M.F., Yakovlev E.V.* Spall Fracture Patterns for the Heterophase Cu–Al–Ni Alloy in Ultrafine- and Coarse-grained States Exposed to a Nanosecond Relativistic High-Current Electron Beam // Russ. Phys. J. 2013. V. 55. P. 1451.
16. *Ashitkov S.I., Inogamov N.A., Komarov P.S., Zhakhovskiy V.V., Oleynik I.I., Agranat M.B., Kanel G.I., Fortov V.E.* Strength of Metals in Liquid and Solid States at Extremely High Tension Produced by Femtosecond Laser Heating // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1464. P. 120.
17. *Ashitkov S.I., Komarov P.S., Struleva E.V., Inogamov N.A., Agranat M.B., Kanel G.I., Khishchenko K.V.* The Behavior of Tantalum under Ultrashort Loads Induced by Femtosecond Laser // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 653. P. 012001.
18. *Ашитков С.И., Комаров П.С., Овчинников А.В., Струлева Е.В., Агранат М.Б.* Прочность жидкого олова в условиях предельно высоких скоростей деформации при фемтосекундном лазерном воздействии // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 8. С. 611.
19. *Струлева Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И.* Интерферометрическая диагностика нанодеформаций поверхности мишени в пикосекундном диапазоне при импульсном лазерном воздействии // Вестник Объединенного института высоких температур. 2018. Т. 1. № 1. С. 130.
20. *Geindre J.P., Audebert P., Rebibo S., Gauthier J.C.* Single-shot Spectral Interferometry with Chirped Pulses // Opt. Lett. 2001. V. 26. P. 1612.
21. *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. P. 1954.
22. *Casas J., Keita N.M., Steinemann S.G.* Sound Velocity Liquid Titanium, Vanadium and Chromium // Phys. Chem. Liq. 1984. V. 14. P. 155.
23. *Зиновьев В.Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Спр. изд. М.: Металлургия, 1989. 221 с.
24. *Струлёва Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И.* Особенности абляции тантала при фемтосекундном лазерном воздействии // ТВТ. 2018. Т. 56. № 5. С. 672.
25. *Wu C., Zhigilei L.V.* Microscopic Mechanisms of Laser Spallation and Ablation of Metal Targets from Large-Scale Molecular Dynamics Simulations // Appl. Phys. A. 2014. V. 114. P. 11.
26. *Кикоин И.К.* Таблица физических величин. Спр. М.: Атомиздат, 1976. 177 с.
27. *Струлева Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И.* Термомеханическая абляция титана при фемтосекундном лазерном воздействии // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 529.