

УДК 536.2.023;532.591

## ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ТИТАНА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РАСТЯЖЕНИИ

© 2020 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 31.03.2020 г.

После доработки 18.06.2020 г.

Принято к публикации 24.06.2020 г.

Методом спектральной интерферометрии с пикосекундным разрешением исследовано движение тыльной свободной поверхности пленочной титановой мишени субмикронной толщины под действием ультракороткого импульса ударного сжатия, создаваемого с помощью фемтосекундного лазера. Определено значение откольной прочности титана вблизи теоретического предела прочности при скорости деформирования  $\sim 10^9$  с<sup>-1</sup>.

DOI: 10.31857/S0040364420050105

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время значительный интерес вызывает поведение материалов под действием механических нагрузок предельно короткой длительности, создаваемых с помощью лазеров пико- и фемтосекундного диапазонов [1–8]. Подобные исследования имеют большое значение для развития теории фазовых переходов, прочности и пластичности, разработки широкодиапазонных уравнений состояния вещества, расчетного прогнозирования интенсивных импульсных воздействий на материалы и конструкции в широком диапазоне параметров нагрузки, развития лазерных технологий обработки материалов. Известно, что прочность материала существенно возрастает с увеличением скорости его растяжения [9]. Предельное значение прочности, или так называемая идеальная прочность, соответствует спинадали конденсированного состояния вещества. Расчетное значение идеальной прочности титана при растяжении составляет 21.5 ГПа [10]. Приблизиться к идеальной прочности можно путем увеличения скорости деформирования вещества  $\dot{\epsilon}$ , что достигается либо уменьшением длительности ударной нагрузки, либо увеличением ее амплитуды. В настоящее время наибольшие скорости деформирования  $\dot{\epsilon} \sim 10^8$ – $10^9$  с<sup>-1</sup> наблюдаются в лазерных экспериментах с импульсами пико- и фемтосекундной длительности.

В данной работе с помощью интерферометрической методики непрерывной регистрации движения поверхности с использованием частотно-модулированного (чирпированного) диагностического импульса впервые измерена откольная прочность титана в твердой фазе вблизи предела теоретической прочности в пикосекундном диа-

пазоне длительности нагрузки, созданной воздействием на вещество импульсами фемтосекундной длительности.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментах использовалась оптическая схема, подробно описанная ранее в работе [11]. Источником фемтосекундных лазерных импульсов являлась титан-сапфировая лазерная система, генерирующая импульсы длительностью 40 фс с энергией до 2 мДж на длине волны 800 нм. Лазерная система входит в состав Центра коллективного пользования “Лазерный фемтосекундный комплекс”.

В качестве экспериментального образца использовалась пленка титана толщиной  $410 \pm 10$  нм, нанесенная методом магнетронного напыления на стеклянную подложку. Лазерное воздействие на образец осуществлялось со стороны стеклянной подложки, а диагностика инициируемых процессов проводилась на тыльной (свободной) поверхности. Импульс накачки фокусировался линзой с фокусным расстоянием 10 см через подложку на поверхность металлической пленки с радиусом пучка 15 мкм по уровню  $e^{-1}$  с гауссовым распределением интенсивности. Энергия в каждом импульсе измерялась калиброванным фотодиодом. После каждого воздействия мишень перемещалась на новое место с помощью микроманипулятора.

Для диагностики смещения свободной поверхности мишени часть чирпированного 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 собран интерферометр Майкельсона, совмещенный с дифрак-

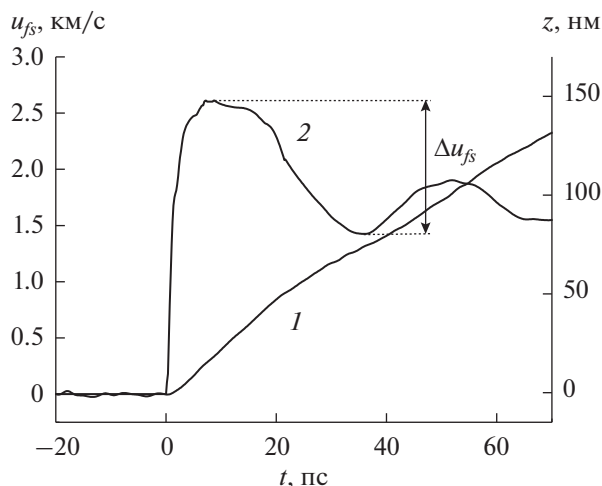


Рис. 1. Зависимость смещения (1) и скорости (2) движения свободной поверхности титанового образца от времени при  $E = 43$  мкДж.

ционным спектрометром Acton-2300i. В каждом эксперименте записывались три типа интерферограмм: интерферограмма поверхности образца до воздействия (начальная), в момент воздействия выхода ударной волны (временная) и после окончания процесса – спустя несколько секунд после воздействия (финальная). Сопоставление начальной и временной интерферограмм дает информацию о динамике ударно-волнового процесса.

Применяемая методика измерений обеспечила непрерывную регистрацию динамики процесса во временном интервале  $\Delta t = 0\text{--}200$  пс с временным разрешением  $\delta t \approx 2$  пс. Более подробная методика измерений описана в работе [11].

Для восстановления пространственно-временных распределений изменения фазы  $\Delta\varphi(x, t)$  отраженной от мишени диагностической волны применялся двумерный фурье-анализ интерферограмм [11–13]. Изменение фазы  $\Delta\varphi(t)$  описывает смещение границы поверхности  $z(t)$ , величина которой определяется из соотношения  $z(t) = \frac{\Delta\varphi(t)\lambda}{4\pi}$ . За величину экспериментальной погрешности сдвига фазы принимается значение дисперсии шумов в невозмущенной области фазового распределения  $\Delta\varphi(x, t)$  [13]. Реализуемая в описываемых экспериментах погрешность измерения фазы не превышала  $\delta\varphi \approx 0.02$  рад, что соответствует точности определения смещения поверхности на уровне  $\delta z \approx (1\text{--}2)$  нм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены измеренный профиль смещения  $z(t)$  тыльной свободной поверхности титанового образца и профиль скорости  $u_{fs}(t)$ ,

полученный дифференцированием зависимости  $z(t)$ . Профили построены для центральной части области взаимодействия при энергии лазерного импульса  $E = 43$  мкДж.

Отражение импульса сжатия от свободной поверхности образца приводит к возникновению в нем растягивающих напряжений, величина которых нарастает по мере распространения отраженной волны от поверхности в глубь образца. В случае превышения прочности материала  $\sigma_{\text{spall}}$  растягивающими напряжениями в образце происходит откольное разрушение [9]. Релаксация напряжений при разрушении приводит к образованию вторичной волны сжатия – откольного импульса, которая, достигая свободной поверхности, приводит ко второму возрастанию ее скорости. Величина растягивающего напряжения непосредственно перед разрушением определяется методом характеристик по декременту скорости свободной поверхности  $\Delta u_{fs}$  между ее максимальным значением и значением перед откольным импульсом [9].

Откольная прочность в упругопластическом теле для импульсов нагрузки треугольной формы определяется по выражению  $\sigma_{\text{spall}} = \rho c_l \Delta u_{fs} \frac{1}{1 + c_l/c_b}$  [14]. Здесь  $\rho = 4.5$  г/см<sup>3</sup> – значение начальной плотности,  $c_l = 6.3$  км/с – продольная скорость звука [15],  $c_b = 4.87$  км/с – объемная скорость звука в титане [16],  $\Delta u_{fs} = 1.2 \pm 0.2$  км/с – разность между максимальным и минимальным значениями скорости свободной поверхности на рис. 1. Погрешность определения декремента скорости обусловлена точностью измерения сдвига фазы. Соответствующее значение откольной прочности при этом  $\sigma_{\text{spall}} = 14.8 \pm 2$  ГПа.

Под скоростью деформирования  $\dot{\epsilon}$  в ударно-волновых экспериментах понимается скорость расширения вещества в разгрузочной части падающего импульса сжатия. Скорость деформирования определяется по соотношению  $\dot{\epsilon} = \frac{\Delta u_{fs}}{\Delta t} \frac{1}{2c_l}$  [17] и составляет  $\dot{\epsilon} \approx 3.5 \times 10^9$  с<sup>-1</sup>. Толщина откола оценивается по формуле  $L_{\text{spall}} = c_l(t_{\text{min}} - t_{\text{max}})/2$  [17]. Из рис. 1 следует, что при  $\Delta t = t_{\text{min}} - t_{\text{max}} \approx 27$  пс откольное разрушение в титане происходит в твердом состоянии на расстоянии  $L_{\text{spall}} \approx 80\text{--}90$  нм от тыльной поверхности образца. Таким образом, откольная прочность титана в твердом состоянии на разрыв более чем в 6 раз превосходит значение динамической прочности расплава титана при схожих скоростях деформирования  $\sim 10^9$  с<sup>-1</sup> [18].

На рис. 2 полученное в настоящей работе значение динамической откольной прочности титана сопоставляется с данными экспериментов с

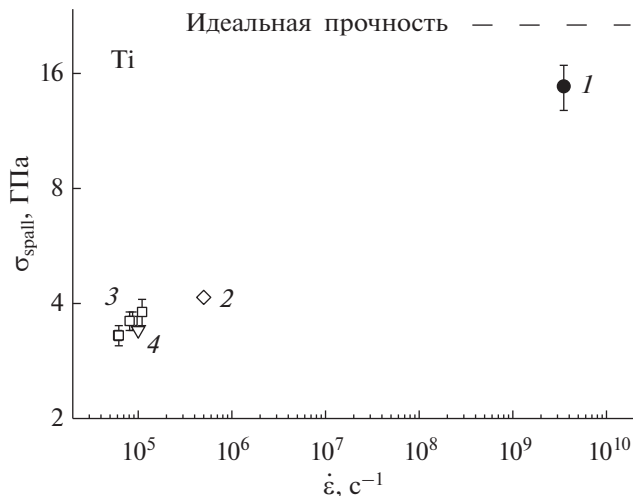


Рис. 2. Изменение динамической откольной прочности титана в зависимости от скорости деформирования по данным настоящей работы (1) и литературным данным: 2 – [16], 3 – [19], 4 – [20].

соударением пластин в микросекундном диапазоне длительности ударно-волновой нагрузки.

Как видно, с ростом скорости растяжения имеет место существенное увеличение динамической прочности титана на разрыв. При этом реализованное в настоящей работе значение  $\sigma_{spall}$  составляет около 70% от значения “идеальной” откольной прочности титана [10].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерферометрическим методом с пикосекундным разрешением исследована динамика движения свободной поверхности титана под действием растягивающих напряжений, создаваемых импульсами фемтосекундной длительности. Впервые определена откольная прочность титана при скорости деформирования  $3.5 \times 10^9$  с<sup>-1</sup>, равная  $14.8 \pm 2$  ГПа. Полученные в настоящей работе данные позволяют характеризовать тенденцию роста динамической прочности титана в широком диапазоне скоростей деформирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашитков С.И., Агранат М.Б., Канель Г.И. и др. Поведение алюминия вблизи предельной теоретической прочности в экспериментах с фемтосекундным лазерным воздействием // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. С. 568.
2. Whitley V.H., McGrane S.D., Eakins D.E. et al. The Elastic-plastic Response of Aluminum Films to Ultrafast Laser-generated Shocks // Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 013505.
3. 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.
4. Smith R.F., Eggert J.H., Rudd R.E., Swift D.C., Bolme C.A., Collins G.W. High Strain-rate Plastic Flow in Al and Fe // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 123515.
5. Ashitkov S.I., Agranat M.B., Kanel G.I., Fortov V.E. Approaching the Ultimate Shear and Tensile Strength of Aluminum in Experiments with Femtosecond Pulse Laser // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1426. P. 1081.
6. 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 в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. С. 439.
7. 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<sup>-1</sup> // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 113506.
8. 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. С. 294.
9. Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. Ударные волны в физике конденсированного состояния // УФН. 2007. Т. 177. С. 809.
10. Ogata S., Li J., Hirosaki N., Shibutani Y., Yip S. Ideal Shear Strain of Metals and Ceramics // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 104104.
11. Струлева Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Интерферометрическая диагностика нанодетформаций поверхности мишени в пикосекундном диапазоне при импульсном лазерном воздействии // Вестн. ОИВТ РАН. 2018. Т. 1. № 1. С. 130.
12. Geindre J.P., Audebert P., Rebibo S., Gauthier J.C. Single-shot Spectral Interferometry with Chirped Pulses // Opt. Lett. 2001. V. 26. P. 1612.
13. 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.
14. Канель Г.И. Искажение волновых профилей при отколе в упругопластическом теле // ПМТФ. 2001. Т. 42(2). С. 194.
15. Физические величины. Спр. / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 148 с.
16. Kanel G.I., Razorenov S.V., Zaretsky E.B., Herrman B., Meyer L. Thermal “Softening” and “Hardening” of Titanium and Its Alloy at High Strain Rates of Shock-wave Deforming // Phys. Solid State. 2003. V. 45. P. 656.
17. Eliezer S., Moshe E., Eliezer D. Laser-induced Tension to Measure the Ultimate Strength of Metals Related to the Equation of State // Laser and Particle Beams. 2002. V. 20. P. 87.
18. Струлева Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Динамическая прочность расплава титана при предельно высоких скоростях растяжения // ТВТ. 2019. Т. 57. № 6. С. 957.
19. Whelchel R.L., Mehoke D.S., Iyer K.A., Sanders T.H., Jr., Thadhani N.N. Dynamic Yielding and Fracture of Grade 4 Titanium in Plate Impact Experiments // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. P. 115901.
20. Zaretsky E.B. Impact Response of Titanium from the Ambient Temperature to 1000°C // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 123505.