

УДК 536.2.023; 532.591

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПЛЕНОК КОБАЛЬТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК, СОЗДАВАЕМЫХ ПИКОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

© 2023 г. Е. В. Струлева¹ *, П. С. Комаров¹, С. А. Евлашин², С. И. Ашитков¹¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.

После доработки 20.06.2023 г.

Принята к публикации 03.10.2023 г.

Проведено экспериментальное исследование движения тыльной свободной поверхности субмикронных пленочных образцов кобальта при воздействии лазерными импульсами пикосекундной длительности с различной плотностью энергии. Диагностика смещения свободной тыльной поверхности образца осуществлялась в пикосекундном диапазоне в одноимпульсном режиме методом спектральной интерферометрии. Получены данные об откольной прочности кобальта в конденсированном состоянии при скорости деформирования $\sim 10^9$ с⁻¹.

DOI: 10.31857/S0040364423040154

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие методов генерации и диагностики ударно-волновых явлений в твердых телах, в частности в тонких пленках, стимулировало развитие исследований поведения вещества вблизи теоретического предела прочности. Большой вклад в исследования прочностных и упруго-пластических свойств в условиях предельно малых длительностей нагрузок сделан при использовании пико- и фемтосекундных лазеров для генерации ультракоротких ударных волн [1–11]. Данные исследования важны для разработки и отладки широкодиапазонных уравнений состояния вещества, атомистического моделирования, для развития теории прочности и пластичности, в расчетах функционирования различных технических устройств в условиях интенсивных импульсных воздействий.

Известно, что предел текучести заметно возрастает при увеличении скорости нагружения. Эта зависимость резко усиливается при превышении скорости деформирования 10^3 – 10^4 с⁻¹. Результаты последних исследований ударно-волновых явлений в металлах при воздействии ультракороткими лазерными импульсами выявили возможность реализации в этих условиях сдвиговых и растягивающих напряжений, близких к предельно возможным (“идеальным”) значениям сдвиговой и объемной прочности.

Динамическая прочность материалов при нагрузках ультракороткой длительности определяется по результатам исследования явлений, возникающих при отражении импульса сжатия от

свободной поверхности образца. В результате интерференции падающей и отраженной волн внутри образца возникают растягивающие напряжения. При превышении величины растягивающих напряжений σ^- такой критической величины, как прочность материала σ_{spall} , происходит его разрушение [12]. Релаксация напряжений при откольном разрушении приводит к образованию волн сжатия, которые начинают распространяться в обе стороны от поверхности откола. Достигнув свободной поверхности, вторичная волна сжатия приводит к повторному возрастанию скорости. Таким образом, на временном профиле скорости свободной поверхности при откольном разрушении формируется так называемый откольный импульс [12].

Исследование поведения кобальта как ферромагнитного и высокопрочного конструкционного материала оказывается актуальным в связи с широкой областью его практического применения в промышленности и энергетике. Статическое механическое поведение кобальта достаточно интенсивно изучалось как в окрестности температуры фазового ($\epsilon \rightarrow \alpha$)-превращения при 695 К, так и в широком диапазоне температур 300–1450 К [13–15]. В то же время по сравнению с другими металлами исследования кобальта в условиях ударно-волнового нагружения уделено заметно меньше внимания. Хотя ударная адиабата кобальта известна достаточно давно [16], в настоящее время имеется ограниченный круг работ, посвященных измерению температурно-скоростных зависимостей сопротивления деформированию и

разрушению кобальта в области полиморфного превращения и точки Кюри (1390 К) в диапазоне скоростей деформирования от 10^5 до 10^6 с $^{-1}$ [17–19].

Несмотря на общее понимание физики и механики высокоскоростного деформирования и разрушения, детальное согласие теоретических представлений и моделей этих явлений с имеющимися экспериментальными данными пока не достигнуто. Существует потребность в накоплении экспериментальных данных такого рода в предельно широком диапазоне параметров для различных материалов.

В данной работе с помощью интерферометрической методики непрерывной регистрации движения поверхности с использованием частотно-модулированного (чирпированного) диагностического импульса измерена откольная прочность кобальта вблизи предела теоретической прочности при скорости деформирования 10^9 с $^{-1}$.

ЭКСПЕРИМЕНТ

При исследовании ударно-волновых явлений в тонких пленках методом спектральной интерферометрии с пространственным и временным разрешением регистрировался волновой профиль смещения свободной поверхности образца $z_{fs}(t)$.

В качестве источника лазерных импульсов использовалась титан-сапфировая фемтосекундная лазерная система, реализованная по принципу усиления чирпированных импульсов. Длина волны лазерного излучения равна 800 нм, энергия в одном импульсе — до 2 мДж. С целью уменьшения интенсивности при фокусировке излучения на мишень и исключения возникновения нелинейных эффектов и оптического пробоя в стекле длительность излучения увеличена до 1 пс.

Экспериментальным образцом служила пленка кобальта толщиной 330 ± 10 нм, нанесенная магнетронным методом на стеклянную подложку толщиной 180 мкм.

Для напыления материалов использовалась установка магнетронного распыления [20]. Перед напылением пленок установка вакуумировалась до $\sim 10^{-5}$ Торр, после чего производился напуск аргона до достижения давления 5×10^{-2} Торр. Распыление производилось при постоянном токе без подогрева подложки. Перед напылением проводилось предварительное распыление материала мишени в течение 500 с, что обеспечивало очистку поверхности магнетронной мишени. Диаметр мишени составлял 68 мм, расстояние между мишенью и подложкой — 4 см. При распылении удельная мощность разряда — 44 Вт/см 2 , что соответствует скорости напыления 1 нм/с. Толщина образцов определялась электронным сканирующим микроскопом (СЭМ) в области воздействия лазерного излучения (рис. 1).

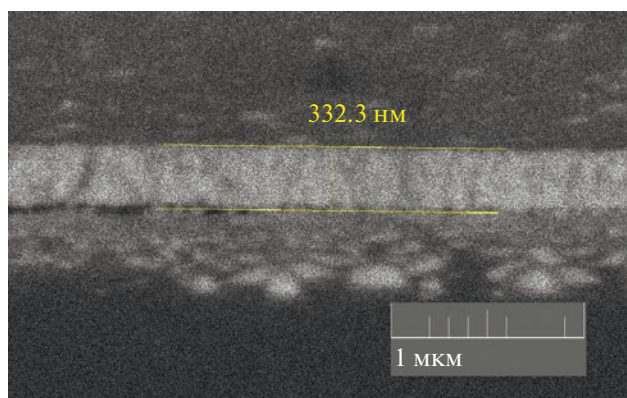


Рис. 1. СЭМ-изображение фрагмента кратера на образце кобальта.

В ходе эксперимента нагревающее лазерное излучение фокусировалось на образец со стороны стеклянной подложки. Регистрация смещения при выходе ударной волны проводилась на тыльной (свободной) поверхности.

Нагревающее излучение фокусировалось в эллиптическое пятно с гауссовым распределением интенсивности. Размер пятна определялся по известной методике по зависимости размера кратера от энергии лазерного импульса [21]. Из-за наклонного падения фокальное пятно на мишени было эллиптической формы радиусом $r_{0x} = 35$ мкм, $r_{0y} = 26$ мкм по уровню e^{-1} . Энергия нагревающего лазерного импульса не превышала 165 мкДж, что соответствовало плотности энергии 5.8 Дж/см 2 и интенсивности 5.8×10^{12} Вт/см 2 , т.е. меньше порога оптического пробоя в стекле $\sim 10^{13}$ Вт/см 2 [22, 23].

Энергия в каждом импульсе изменялась при помощи поляризационного ослабителя, который представлял собой полуволновую пластину и пленочный поляризатор. Контроль энергии осуществлялся калиброванным фотодиодом ThorLabs PDA 50B-EC.

Для диагностики использовался чирпированный импульс длительностью 300 пс с шириной спектра 40 нм и центральной длиной волны 800 нм. Для измерения динамики смещения тыльной свободной поверхности образца применялся интерферометр Майкельсона, совмещенный с дифракционным спектрометром Acton-2300i (схема Черни–Тернера) с решеткой 600 штрих/мм (рис. 2). Перенос изображения осуществлялся с помощью микрообъектива Olympus с числовой апертурой $NA = 0.3$, полученные изображения регистрировались с помощью ПЗС-камеры SensiCam QE с матрицей размером 1420×1080 пкс 2 и разрядностью 12 бит. Временное разрешение схемы измерений составляло 1 пс, пространственное разрешение в плоскости мишени — 3 мкм. После каждого воздействия мишень сдвигалась на 300 мкм на новое место с помощью микроманипулятора.

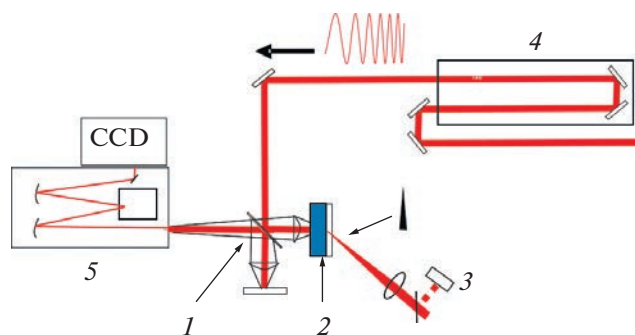


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – интерферометр Майкельсона, 2 – мишень, 3 – фотодиод, 4 – линия задержки, 5 – спектрометр.

В каждом эксперименте записывались три типа интерферограмм: интерферограмма поверхности образца до воздействия (начальная), в момент воздействия 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.

Фурье-преобразование полученных интерферограмм проводилось в соответствии с методикой, описанной в работах [24–26]. Алгоритм анализа двумерных интерферограмм обеспечивает погрешность измерения изменения фазы отраженного импульса $\Delta\phi \approx 0.01$ рад, что соответствует погрешности определения смещения $\Delta z \approx 1\text{--}2$ нм. Полученное значение изменения фазы $\Delta\phi(t)$ позволяет рассчитать смещение поверхности $z_{fs}(t)$ по формуле

$$z_{fs}(t) = \frac{\Delta\phi(t)\lambda}{4\pi}.$$

На рис. 3 приведено пространственно-временное распределение $\Delta\phi(x, t)$, описывающее динамику пространственно-неоднородного движения тыльной свободной поверхности пленочного образца магниевого сплава толщиной $h = 330$ нм в момент выхода ударной волны, генерируемой лазерным импульсом с энергией $E = 48$ мкДж.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлены временные профили смещения $z_{fs}(t)$ тыльной свободной поверхности пленочного образца кобальта при значениях энергии лазерного импульса $E_1 = 8$ мкДж и $E_2 = 48$ мкДж. Все профили $z_{fs}(t)$ построены для центральной области взаимодействия. Измеренные профили показывают хорошую воспроизводимость во всем временном диапазоне регистрации. С уменьшением энергии нагревающего импульса наблюдается уменьшение наклона зависимостей $z_{fs}(t)$ на начальном участке. Для энергии лазерного импульса $E_2 = 48$ мкДж наблюдаемое перед выходом

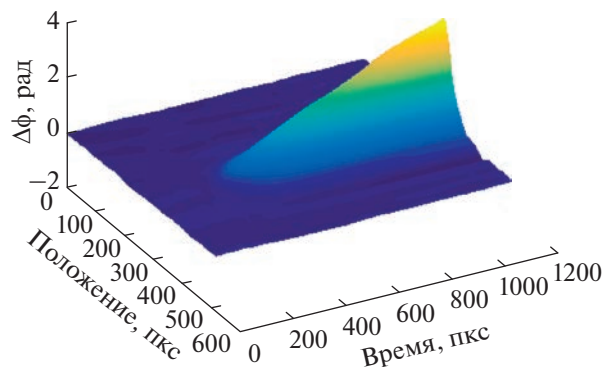


Рис. 3. Пространственно-временное распределение изменения фазы диагностического импульса $\Delta\phi(x, t)$ при выходе ударной волны на свободную тыльную поверхность образца; масштаб по оси времени – 0.164 пс/пкс, пространственный масштаб по оси координат – 0.3 мкм/пкс.

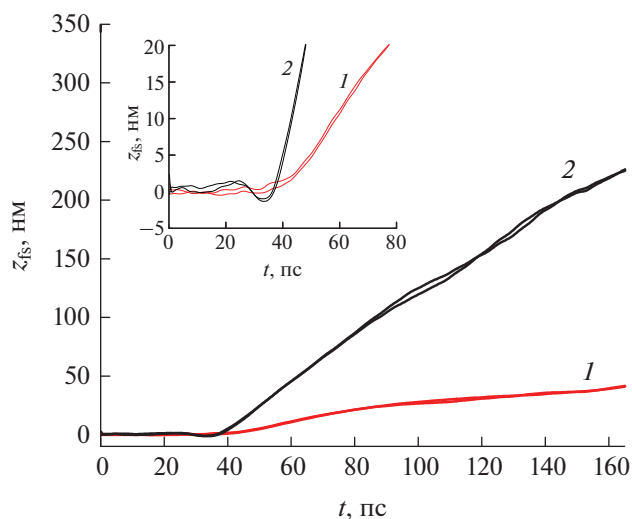


Рис. 4. Временные профили смещения свободной поверхности $z_{fs}(t)$ пленочного образца кобальта толщиной 330 нм для энергий лазерных импульсов E : 1 – 8 мкДж, 2 – 48; на вставке – увеличенный фрагмент; нулевой момент времени на графиках выбран произвольно.

ударной волны изменение фазы, очевидно, связано с изменением диэлектрической проницаемости сжатой среды [8, 27, 28].

На рис. 5 для двух лазерных импульсов с различной энергией построены профили скорости $u_{fs}(t)$. Профили $u_{fs}(t)$ получены в результате дифференцирования экспериментальных зависимостей $z_{fs}(t)$ с последующей итерационной обработкой.

Результаты измерений показали отсутствие расщепления ударной волны на упругую и пластическую при рассматриваемых расстояниях распространения и напряжениях сжатия. Во всех экспе-

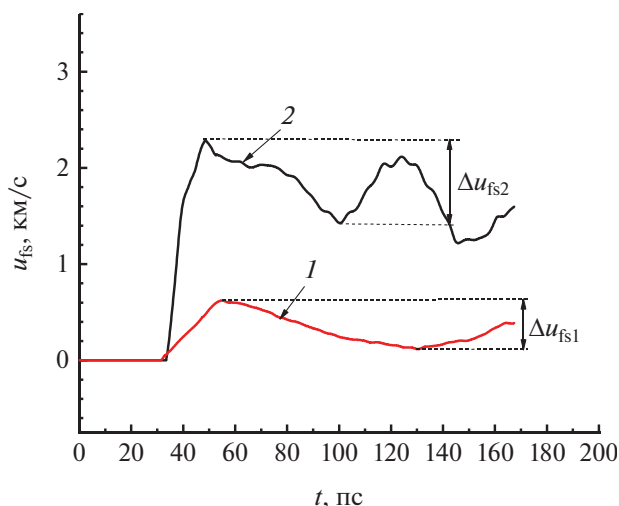


Рис. 5. Временные профили скорости движения свободной поверхности $u_{fs}(t)$ пленочного образца кобальта при различной энергии ЛИ E : 1 – 8 мкДж, 2 – 48.

риментах, результаты которых приведены на рис. 5, волна сжатия является упругой. Профили $u_{fs}(t)$ обладают характерной треугольной формой. Время нарастания скорости свободной поверхности варьируется от нескольких единиц до десятка пикосекунд в зависимости от энергии лазерного излучения и уменьшается с ростом амплитуды импульса сжатия.

На графике скорости при энергии $E_2 = 48$ мкДж (рис. 5, кривая 2) после откола наблюдаются затухающие колебания в результате переотражения волн между поверхностью откола и свободной поверхностью образца.

Величина растягивающего напряжения в твердом образце непосредственно перед разрушением в ударно-волновых экспериментах определяется по декременту скорости Δu_{fs} между ее максимальным значением и значением перед откольным импульсом [12]. В акустическом приближении, когда вклад нелинейности сжимаемости вещества незначителен, метод характеристик дает простую формулу для расчета величины откольной прочности

$$\sigma_{spall} = \rho_0 c \Delta u_{fs} / 2,$$

где ρ_0 – плотность материала, c – скорость звука. В связи с возможными упругопластическими эффектами при отколе расчетная формула в линейном приближении для импульсов нагрузки треугольного профиля принимает вид [29, 30]

$$\sigma_{spall} = \rho_0 c_l \Delta u_{fs} \frac{1}{1 + c_l / c_b}, \quad (1)$$

где $\rho_0 = 8.9$ г/см³ – начальная плотность, $c_l = 5.78$ км/с – продольная скорость звука, $c_b = 4.62$ км/с – объемная скорость звука в кобальте [19].

Под скоростью деформирования $\dot{\epsilon}$ в ударно-волновых экспериментах понимается скорость расширения вещества в волне разряжения. Скорость деформирования определяется соотношением [12]

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta u_{fs}}{\Delta t} \frac{1}{2c_l}. \quad (2)$$

Толщину откольного слоя можно оценить по формуле [1, 31]

$$L_{spall} \approx c_l \Delta t / 2, \quad (3)$$

где $\Delta t = t_{spall} - t_{max}$ – разность между моментом выхода откольного импульса и временем достижения максимального значения скорости u_{fs}^{max} .

Из рис. 5 при $E_1 = 8$ мкДж значение декремента скорости получается $\Delta u_{fs1} = 0.5$ км/с, тогда по соотношению (1) откольная прочность составляет $\sigma_{spall} = 11.4 \pm 2$ ГПа при скорости деформирования по (2) $\dot{\epsilon} \approx 0.6 \times 10^9$ с⁻¹. При значении $\Delta t \approx 75$ пс, согласно (3), разрушение происходит на глубине $L_{spall} \approx 216$ нм.

При большей вложенной энергии ($E_2 = 48$ мкДж) значения декремента скорости и откольной прочности составляют соответственно $\Delta u_{fs2} = 0.86$ км/с и $\sigma_{spall} = 19.7 \pm 3$ ГПа при скорости деформирования $\dot{\epsilon} \approx 1.4 \times 10^9$ с⁻¹. Здесь $\Delta t \approx 52$ пс и откольное разрушение происходит на меньшей глубине $L_{spall} \approx 150$ нм.

Если величина растягивающих напряжений σ^- превышает объемную прочность материала σ_{spall} , то откол происходит вблизи тыльной поверхности в твердом состоянии. В случае, если $\sigma^- < \sigma_{spall}$, волна растяжения распространяется от тыльной поверхности по направлению к границе металл–стекло. Время удвоенного пробега образца акустической волной для пленок субмикронной толщины составляет от десятков до сотен пикосекунд, что меньше характерного времени кристаллизации расплава, лежащего в наносекундном диапазоне [32]. Поскольку прочность расплава меньше прочности твердой фазы, то волна растяжений, достигая границы расплава, приводит к возникновению нуклеации в расплаве с последующим его разрывом. В работе [32] проведено моделирование эволюции волн сжатия и растяжения, а также возникновения нуклеации в расплаве для пленочного образца алюминия.

На рис. 6 сопоставлены результаты для откольной прочности, полученные в настоящей работе, с имеющимися литературными данными по динамической прочности кобальта в твердом состоянии [17, 18].

С увеличением скорости растяжения имеет место существенное увеличение динамической прочности кобальта на разрыв. При этом данные суб-

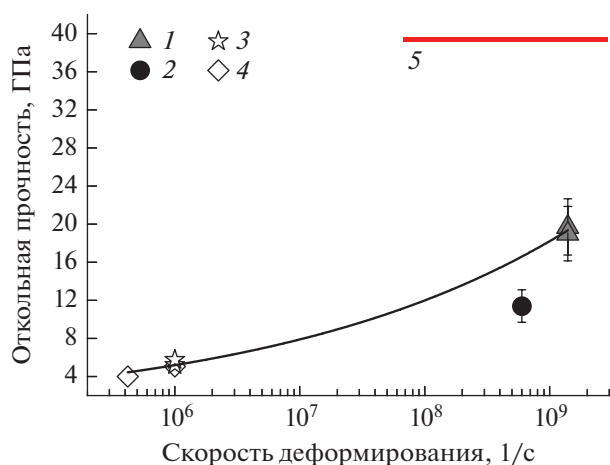


Рис. 6. Результат измерения откольной прочности кобальта в твердой (1) и жидкой (2) фазе в зависимости от скорости деформирования по данным настоящей работы в сравнении с данными экспериментов по соударению пластин и с генерацией ударной волны протонным пучком: 3 — [17], 4 — [18]; 5 — “идеальная” прочность.

микросекундного диапазона и полученные данные при $E_2 = 48$ мкДж хорошо аппроксимируются эмпирической зависимостью вида (кривая на рис. 6)

$$\sigma_{\text{spall}} = 0.42 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^8} \right)^{0.18}.$$

В то же время при меньшей энергии лазерного излучения измеренное значение прочности лежит заметно ниже этой зависимости.

Характерная глубина плавления металла при фемтосекундном нагреве зависит как от параметров лазерного излучения, так и от теплопроводности металла и времени выравнивания температур электронной и ионной подсистем и составляет порядка 50–200 нм [4, 32, 33]. Из полученных оценок L_{spall} и σ_{spall} следует, что при энергии лазерного излучения $E_1 = 8$ мкДж велика вероятность откола на границе с расплавленным слоем кобальта или в расплаве. Откол при $E_2 = 48$ мкДж происходит в твердой фазе, где прочность вещества выше, чем в жидком состоянии. Таким образом, при плавлении откольная прочность кобальта уменьшается почти вдвое. Это соотносится с результатом оценки прочности жидкого алюминия вблизи порога плавления из работы [32]. Согласно теоретическим представлениям [34], прочность жидкости и время до ее кавитационного разрушения при растяжении определяются скоростью спонтанного зарождения пузырьков критического размера, которая сильно возрастает с повышением температуры. При этом прочность расплава растет с увеличением скорости растяжения и уменьшается с ростом температуры [35].

Предельное значение прочности при растяжении (“идеальная” прочность σ_{id}) можно оценить по выражению [12]

$$\sigma_{\text{id}} \approx \rho_0 c_0^2 / 4b,$$

где $c_0 = 4.772$ км/с, $b = 1.285$ — параметры ударной адиабаты $U_s = c_0 + bu_p$ (U_s — скорость фронта ударной волны, u_p — массовая скорость вещества за фронтом) [36]. Это дает для кобальта $\sigma_{\text{id}} = 39.4$ ГПа. Таким образом, в настоящей работе удалось достичь значения динамической прочности σ_{spall} кобальта в твердой и жидкой фазах при скорости деформирования $\sim 10^9$ с⁻¹, которое составляет около $\sigma_{\text{spall}} = 50$ и 29% от значения “идеальной” прочности в твердом состоянии.

Результаты экспериментов с лазерными ударными волнами и образцами субмикронной толщины могут быть согласованы со сведениями, полученными на образцах миллиметровой толщины в экспериментах по соударению пластин [18] и при генерации ударной волны протонным пучком [17, 18]. Это позволяет спрогнозировать поведение кобальта в широком диапазоне скоростей деформации — от 10^5 до 10^9 с⁻¹. Также эти исследования представляют интерес для молекулярно-динамического моделирования разрушения кобальта в пикосекундном диапазоне нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе интерферометрическим методом непрерывной диагностики с пикосекундным разрешением исследована динамика движения свободной (тыльной) поверхности кобальта при выходе упругой ударной волны, генерируемой лазерными импульсами пикосекундной длительности. Получено значение откольной прочности кобальта в твердой и жидкой фазах, равное 19.7 ± 3 и 11.4 ± 2 ГПа при скоростях деформирования 1.4×10^9 и 0.6×10^9 с⁻¹ соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-01129-23-00 от 29.12.2022 г.) на оборудовании ЦКП “Лазерный фемтосекундный комплекс” ОИВТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашитков С.И., Агранат М.Б., Канель Г.И., Комаров П.С., Фортков В.Е. Поведение алюминия вблизи предельной теоретической прочности в экспериментах с фемтосекундным лазерным воздействием // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. № 8. С. 568.
2. Whitley V.H., McGrane S.D., Eakins D.E., Bolme C.A., Moore D.S., Bingert J.F. The Elastic-Plastic Response of Aluminum Films to Ultrafast Laser-generated Shocks // Appl. Phys. 2011. V. 109. № 1. 013505.
3. Crowhurst J.C., Armstrong M.R., Knight K.B., Zaig J.M., Behymer E.M. Invariance of the Dissipative Action at

- Ultrahigh Strain Rates above the Strong Shock Threshold // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 107. № 14. P. 144302.
4. 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.
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. № 1. P. 1081.
6. 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. № 7. С. 439.
7. Crowhurst J.C., Reed B.W., Armstrong M.R., Radousky H.B., Carter J.A., Swift D.C., Zaig J.M. et al. The $\alpha \rightarrow \epsilon$ Phase Transition in Iron at Strain Rates up to $\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ // *J. Appl. Phys.* 2014. V. 115. № 11. 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. № 4. С. 294.
9. Струлева Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Откольная прочность титана при высокоскоростном растяжении // *ТВТ.* 2020. Т. 58. № 5. С. 823.
10. Струлева Е.В., Комаров П.С., Евлашин С.А., Ашитков С.И. Поведение магниевого сплава при высокоскоростной деформации под действием ударно-волновой нагрузки // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 5. С. 793.
11. 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.
12. Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. Ударные волны в физике конденсированного состояния // *УФН.* 2007. Т. 177. № 8. С. 809.
13. Kamel R., Halim K. The Effect of Phase Change on the Mechanical Properties of Cobalt Near Its Transformation Temperature // *Phys. Status Solidi B.* 1966. V. 15. № 1. P. 63.
14. Sokolov L.D., Gladkikh A.N., Skudnov V.A., Solenov V.M. Mechanical Properties of Cobalt at Different Temperatures and Deformation Rates // *Metal Sci. Heat Treat.* 1969. V. 11. P. 626.
15. Betteridge W. The Properties of Metallic Cobalt // *Prog. Mater. Sci.* 1980. V. 24. P. 51.
16. Walsh J.M., Rice M.H., McQueen R.G., Yarger F.L. Shock-Wave Compressions of Twenty-Seven Metals. Equations of State of Metals // *Phys. Rev.* 1957. V. 108. P. 196.
17. Baumung K., Bluhm H., Kanel G.I., Muller G., Razorenov S.V., Singer J., Utkin A.V. Tensile Strength of Five Metals and Alloys in the Nanosecond Load Duration Range at Normal and Elevated Temperatures // *Int. J. Impact Eng.* 2001. V. 25. № 7. P. 631.
18. Razorenov S.V., Kanel' G.I., Kramshonkov E.N., Baumung K. Shock Compression and Spalling of Cobalt at Normal and Elevated Temperatures // *Combust., Explos. Shock Waves.* 2002. V. 38. № 5. P. 598.
19. Zaretsky E. Impact Response of Cobalt over the 300–1400 K Temperature Range // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 108. № 8. P. 083525.
20. Khmel'nitsky R.A., Evlashin S.A., Martovitsky V.P., Pastchenko P.V., Dagesian S.A., Alekseev A.A., Suetin N.V., Gippius A.A. Heteroepitaxy of Ni-Based Alloys on Diamond // *Cryst. Growth Des.* 2016. V. 16. № 3. P. 1420.
21. Liu J.M. Simple Technique for Measurements of Pulsed Gaussian-Beam Spot Sizes // *Opt. Lett.* 1982. V. 7. № 5. P. 196.
22. Moore D.S., Gahagan K.T., Reho J.H., Funk D.J., Buelow S.J., Rabie R.L., Lippert T. Ultrafast Nonlinear Optical Method for Generation of Planar Shocks // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. № 1. P. 40.
23. Von der Linde D., Schuler H. Breakdown Threshold and Plasma Formation in Femtosecond Laser–Solid Interaction // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1996. V. 13. № 1. P. 216.
24. Струлева Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Интерферометрическая диагностика нанодетформаций поверхности мишени в пикосекундном диапазоне при импульсном лазерном воздействии // *Вестник Объединенного института высоких температур.* 2018. Т. 1. № 1. С. 130.
25. 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.
26. 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.
27. Funk D.J., Moore D.S., Gahagan K.T., Buelow S.J., Reho J.H., Fisher G.L., Rabie R.L. Ultrafast Measurement of the Optical Properties of Aluminum During Shock-Wave Breakout // *Phys. Rev. B.* 2001. V. 64. P. 115114.
28. Gahagan K.T., Moore D.S., Funk D.J., Rabie R.L., Buelow S.J., Nicholson J.W. Measurement of Shock Wave Rise Times in Metal Thin Films // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. № 15. P. 3205.
29. Kanel G.I. Spall Fracture: Methodological Aspects, Mechanisms and Governing Factors // *Int. J. Fract.* 2010. V. 163. P. 173.
30. Степанов Г.В. Откольное разрушение металлов плоскими упругопластическими волнами нагрузки // *Проблемы прочности.* 1976. № 8. С. 66.
31. Канель Г.И. Искажение волновых профилей при отколе в упругопластическом теле // *ПМТФ.* 2001. Т. 42. № 2. С. 194.
32. Агранат М.Б., Анисимов С.И., Ашитков С.И., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Комаров П.С., Овчинников А.В. и др. Прочностные свойства расплава алюминия в условиях экстремально высоких темпов растяжения при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов // *Письма в ЖЭТФ.* 2010. Т. 91. № 9. С. 517.
33. Anisimov S.I., Inogamov N.A., Petrov Y.V., Khokhlov V.A., Zhakhovskii V.V., Nishihara K., Agranat M.B. et al. Thresholds for Front-side Ablation and Rear-side Spallation of Metal Foil Irradiated by Femtosecond Laser Pulse // *Appl. Phys. A.* 2008. V. 92. P. 797.
34. Balibar S., Caupin F. Metastable Liquids // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2003. V. 15. № 1. P. S75.
35. 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. № 3. P. 035903.
36. Marsh S.P. LASL Shock Hugoniot Data. Los Alamos Scientific Laboratory Series on Dynamic Material. Berkeley—Los Angeles—London: University of California Press, 1980. V. 5. P. 56.