

## УДАРНОЕ СЖАТИЕ И ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ КОБАЛЬТА ПРИ НОРМАЛЬНОЙ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

С. В. Разоренов, Г. И. Канель\*, Е. Н. Крамшонков, К. Баумунг\*\*

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, razsv@icp.ac.ru

\*Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, 127412 Москва

\*\*Научный центр технологий и окружающей среды Карлсруэ, 76021 Карлсруэ, Германия

С целью поиска возможности регистрации полиморфных превращений в условиях высокоскоростного растяжения проведена регистрация профилей скорости свободной поверхности образцов высокочистого кобальта, подвергнутых ударно-волновому нагружению при температурах  $20 \div 400$  °С. В данном температурном диапазоне измерена откольная прочность кобальта при скоростях растяжения  $10^5 \div 10^6$  с<sup>-1</sup> и оценены его релаксационные свойства при сжатии во фронте ударной волны. В проведенных экспериментах не удалось зафиксировать ожидаемые аномалии волновых профилей, связанные с предполагаемым высокотемпературным полиморфным превращением кобальта при растяжении. Вероятно, изменение объема при превращении слишком мало или превращение происходит слишком медленно, чтобы оказать заметное влияние на структуру волнового профиля.

Ключевые слова: высокочистый кобальт, ударное сжатие, фазовые превращения, откольная прочность, температура.

Исследования упругопластических и прочностных свойств твердых тел в субмикросекундном диапазоне длительностей нагрузки проводятся путем регистрации и анализа плоских ударных волн, генерируемых в образцах испытуемого материала ударом пластины, детонацией заряда взрывчатого вещества или импульсами лазерного либо корпускулярного излучения. Соответствующие измерения проведены для широкого круга металлов и сплавов при различных амплитудах и длительностях ударно-волнового воздействия [1]. Однако вопрос о влиянии температуры на механические свойства металлов при экстремально высоких скоростях деформирования остается малоизученным.

В данной работе представлены результаты экспериментов с кобальтом чистотой 99,9 %. Образцы вырезали из прокатанного листа толщиной 1 мм, не подвергая их дополнительной термообработке. При нормальном давлении кобальт имеет две модификации. Низкотемпературная фаза существует в виде гексагональной плотноупакованной структуры (ГПУ), ее плотность при 20 °С равна 8,79 г/см<sup>3</sup>. Высокотемпературная фаза кобальта имеет гране-

центрированную кубическую структуру (ГЦК) [2]. Превращение ГПУ — ГЦК начинается при температуре  $T_{f,0} = 423$  °С (по другим данным — 447 °С); с ростом давления температура превращения возрастает. Значение  $dT_f/dp$  в области малых давлений составляет 60 К/ГПа, соответствующее расчетное значение приращения удельного объема равно 0,026 см<sup>3</sup>/моль или 0,35 %.

Поскольку температура превращения кобальта увеличивается при сжатии, можно ожидать, что в условиях растяжения превращение может происходить при температуре ниже  $T_{f,0}$ . Представляет интерес проверить возможность протекания полиморфного превращения в условиях высокоскоростного растяжения при ударно-волновом воздействии.

Проведено две серии ударно-волновых экспериментов. В первой серии образцы подвергались удару алюминиевыми пластинами толщиной 0,4 или 0,8 мм со скоростью  $(675 \pm 25)$  м/с, что создавало ударные волны с давлением за фронтом  $(8,0 \pm 0,3)$  ГПа. С помощью лазерного измерителя скорости VISAR [3] осуществлялась непрерывная регистрация движения свободной тыльной поверхности образца. Во второй серии опытов импульсы ударного сжатия значительно меньшей длительности ( $\approx 50$  нс) генерировались воздействием на

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00-02-17604).

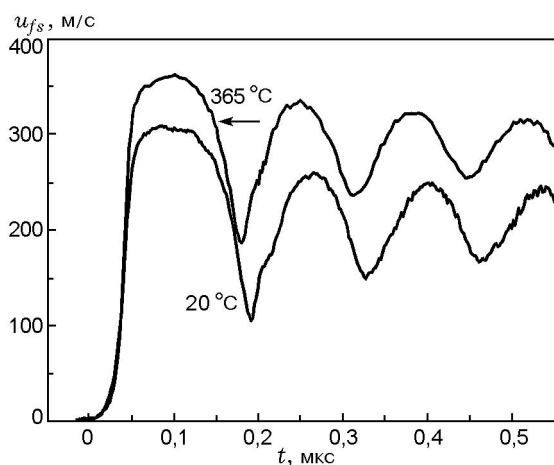


Рис. 1. Профили скорости свободной поверхности образцов кобальта, измеренные в экспериментах с ударниками толщиной 0,4 мм при температурах 20 и 365 °С:

стрелкой показан участок волнового профиля, соответствующий ожидаемому полиморфному превращению при растяжении

образцы импульсных протонных пучков с использованием установки KALIF [4] Исследовательского центра Карлсруэ (Германия). В этих опытах для регистрации профилей скорости свободной поверхности применялась другая модификация лазерного измерителя скорости — ORVIS [5]. Максимальное давление ударного сжатия в опытах с установкой KALIF составляло 20 ÷ 21 ГПа. В обоих случаях температура варьировалась с применением резистивных нагревателей [6] и контролировалась термопарами в непосредственной близости от точки измерения скорости поверхности.

На рис. 1 приведены профили скорости свободной поверхности образцов кобальта, измеренные в экспериментах с ударниками толщиной 0,4 мм при температурах 20 и 365 °С, а на рис. 2 показаны типичные волновые профили по данным экспериментов на установке KALIF. Видно, что волновые профили при нормальной и повышенной температурах не только качественно подобны, но и очень близки друг к другу в количественном отношении. Регистрируется выход на поверхность упруго-пластической волны сжатия и части следующей за ней волны разрежения. После отражения импульса сжатия от свободной поверхности внутри образца генерируются растягивающие напряжения, в результате чего инициируется его разрушение. При этом происходит ре-

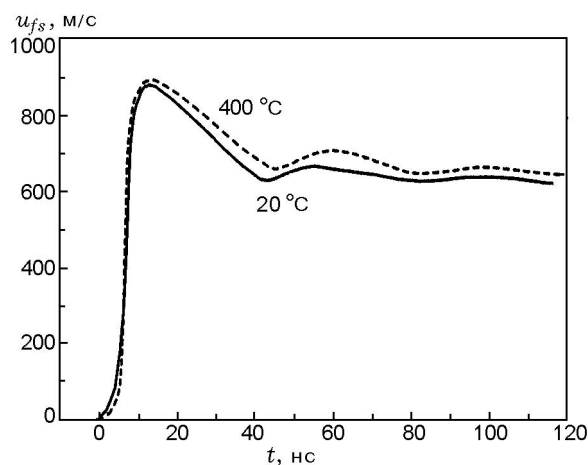


Рис. 2. Результаты экспериментов с применением импульсного протонного пучка для генерации ударных волн в кобальте при температурах 20 и 400 °С

лаккация растягивающих напряжений и формируется волна сжатия (откольный импульс), выход которой на поверхность образца вызывает второй подъем ее скорости. Разрушение при отражении импульса сжатия от поверхности тела называют отколом. Декремент скорости поверхности при ее спаде от максимума до значения перед фронтом откольного импульса пропорционален величине разрушающего напряжения — откольной прочности материала в данных условиях нагружения. Последующие колебания скорости поверхности связаны с многократным отражением волн внутри откалывающегося слоя образца между его тыльной поверхностью и поверхностью разрушения. Период осциллирующей скорости определяется скоростью звука и толщиной откола. Амплитуда осциллирующей скорости связана, по-видимому, с формой падающего импульса нагрузки. Постоянство средней скорости поверхности в процессе волновых ревербераций свидетельствует о быстрой потере связи между откалывающейся пластиной и остальной частью образца.

Экспериментально зарегистрированная форма профиля скорости свободной поверхности образца свидетельствует, скорее, об упруговязком, а не упругопластическом поведении кобальта при данных условиях нагружения. Начальная амплитуда упругого предвестника, определяемая пределом текучести материала при высокоскоростном деформировании, не превышает 2 ÷ 3 м/с. В опытах с ударника-

Результаты измерений откольной прочности кобальта

Условия испытаний	$\Delta u_{fs}$ , м/с	$\sigma^*$ , ГПа	$h_s$ , мм	$\dot{V}/V_0$ , с <sup>-1</sup>
Ударник 0,4 мм, 20 °С	197 ± 3	4,0	0,32 ± 0,005	4,2 · 10 <sup>5</sup>
Ударник 0,4 мм, 20 °С	176 ± 3	3,6	0,31 ± 0,005	4,2 ± 10 <sup>5</sup>
Ударник 0,4 мм, 255 °С	172 ± 3	3,5	0,31 ± 0,005	4,2 · 10 <sup>5</sup>
Ударник 0,4 мм, 280 °С	175 ± 3	3,55	0,33 ± 0,005	4,2 · 10 <sup>5</sup>
Ударник 0,4 мм, 365 °С	174 ± 3	3,5	0,31 ± 0,005	4,2 · 10 <sup>5</sup>
Ударник 0,8 мм, 360 °С	159 ± 3	3,2	0,65 ± 0,005	2,6 · 10 <sup>5</sup>
KALIF, 20 °С	250 ± 10	5,05	0,078 ± 0,004	10 <sup>6</sup>
KALIF, 400 °С	235 ± 10	4,85	0,085 ± 0,004	10 <sup>6</sup>
KALIF, 450 °С	250 ± 15	5,05	0,078 ± 0,004	10 <sup>6</sup>

ми время нарастания в пластической волне сжатия от 0,1 до 0,9 ее амплитуды составляет 18 ÷ 20 нс, а максимальное ускорение достигает 2 ÷ 10<sup>10</sup> м/с<sup>2</sup>, что соответствует скорости деформирования 4 · 10<sup>6</sup> с<sup>-1</sup>. С увеличением давления ударного сжатия время нарастания пластической ударной волны сократилось до 3 ÷ 4 нс, что соответствует увеличению скорости сжатия до (2 ÷ 2,5) · 10<sup>8</sup> с<sup>-1</sup>. Соотношение между скоростью сжатия в ударной волне и давлением за ее фронтом соответствует данным работы [7], согласно которой скорость сжатия пропорциональна четвертой степени конечного давления ударного сжатия. Хотя фронт разрежения в кобальте распространяется со скоростью продольной упругой волны, на измеренных волновых профилях сложно четко выделить определенный участок упругой разгрузки, особенно при повышенных температурах испытания.

Период осцилляций скорости поверхности после откола практически соответствует длительности исходного импульса нагрузки. Отсюда следует, что, во-первых, высокоскоростное разрушение инициируется без заметного периода индукции и, во-вторых, упруговязкопластические свойства материала не оказывают заметного влияния на динамику волновых взаимодействий при отколе. Следовательно, для определения откольной прочности в данном случае можно воспользоваться акустическим приближением [8], согласно которому растягивающее напряжение в момент начала откольного разрушения определяется как

$$\sigma^* = \frac{1}{2} \rho c_b \Delta u_{fs}, \quad (1)$$

где  $c_b = \sqrt{K_s/\rho}$  — «объемная» скорость звука,  $K_s$  — изоэнтропический модуль объемного сжатия,  $\rho$  — плотность,  $\Delta u_{fs}$  — декремент скорости перед фронтом откольного импульса. В этом соотношении следует учесть нелинейность сжимаемости материала, для чего применялась экстраполяция ударных адиабат в координатах «давление — массовая скорость» в область отрицательных давлений. По данным работы [9] ударная адиабата кобальта в виде зависимости скорости фронта ударной волны  $U_s$  от массовой скорости вещества за фронтом  $u_p$  выражается как  $U_s = 4,73 + 1,306 u_p$ . При обработке результатов измерений при повышенных температурах изменение величины объемного модуля  $K_s$  оценивалась по соотношению

$$\frac{\partial K_s}{\partial T} \approx -K_s \alpha \left( \frac{\partial K_s}{\partial p} - \Gamma \right) \approx -16 \frac{\text{МПа}}{\text{К}},$$

где  $\frac{\partial K_s}{\partial p} = 4,26$ ,  $\Gamma$  — коэффициент Грюнайзена,  $\Gamma = 2,0 \div 2,2$ ,  $\alpha = (4,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$  1/К [10, 11] — температурный коэффициент объемного расширения.

Результаты измерений откольной прочности кобальта при нормальной и повышенной температурах суммированы в таблице. В таблице указаны также толщина откола  $h_s$  и скорость расширения вещества в падающей волне разрежения  $V/V_0$ , которая характеризует скорость разрушения на начальной стадии откола [1] ( $V$ ,  $V_0$  — соответственно текущий и начальный удельные объемы). Указанные погрешности измерений обусловлены главным образом мелкомасштабными осцилляциями (электронным шумом) на измеренных волновых профи-

лях. С ростом температуры сопротивление откольному разрушению несколько уменьшается, однако по мере увеличения скорости деформирования зависимость откольной прочности от температуры практически исчезает.

Предполагалось, что увеличение объема в процессе полиморфного превращения при растяжении должно сопровождаться формированием ударной волны разрежения, подобно тому, как это наблюдалось при разгрузке ударно-сжатого железа и других материалов, претерпевающих обратимое превращение при сжатии [1]. Соответствующие значения растягивающих напряжений, при которых ожидалось появление аномалий на волновых профилях, оценивались следующим образом.

В линейном приближении соотношения между давлением  $p$  и температурой вдоль линии равновесия фаз и вдоль изоэнтропы расширения имеют соответственно вид

$$T_f = T_{f,0} + \frac{dT_f}{dp} p, \quad T_s = T_0 + \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_s p, \quad (2)$$

где  $T_f$  — температура на линии фазового равновесия,  $T_{f,0}$  — температура превращения при нулевом давлении,  $T_s$  — температура на изоэнтропе расширения,  $T_0$  — начальная температура испытания на растяжение, индексом  $s$  обозначено дифференцирование вдоль изоэнтропы. С учетом термодинамического тождества

$$\left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_s = -\frac{\Gamma}{V} T$$

второе соотношение (2) принимает вид

$$T_s = T_0 + \frac{\Gamma T_0}{K_s} p. \quad (3)$$

Начало превращения при изоэнтропическом расширении соответствует точке пересечения изоэнтропы с линией фазового равновесия. Из условия  $T_f = T_s$  получаем выражение для давления в точке пересечения изоэнтропы расширения с линией фазового равновесия:

$$p = K_s \frac{T_{f,0} - T_0}{\Gamma T_0 - K_s (dT_f/dp)}.$$

При температуре испытаний  $365^\circ\text{C}$  состояние кобальта в процессе его растяжения должно переходить через линию фазового равновесия при давлении  $(1,0 \div 1,05)$  ГПа, что соответствует декременту скорости поверхности  $\approx 50$  м/с. Однако на соответствующем участке

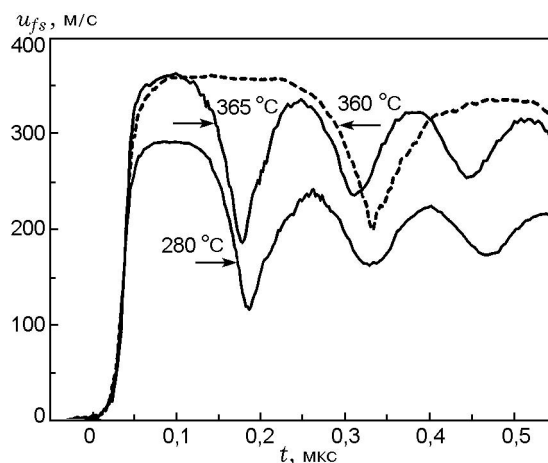


Рис. 3. Профили скорости поверхности образцов кобальта, измеренные в экспериментах с ударниками толщиной 0,4 (сплошные линии) и 0,8 мм (штриховые) при температурах  $280$  и  $360 \div 365^\circ\text{C}$ :

стрелками показаны участки волновых профилей, соответствующие ожидаемому полиморфному превращению при растяжении

волнового профиля, который отмечен на рис. 1 стрелкой, не регистрируется никаких аномалий. Вероятно, изменение объема при превращении слишком мало или превращение происходит слишком медленно, чтобы оказать заметное влияние на структуру волнового профиля, формируемого на пути от плоскости откола до свободной поверхности.

Возможно, для накопления эффекта аномальной сжимаемости в области полиморфного превращения необходимо, чтобы волна растяжения прошла большее расстояние в образце. Однако удвоение толщины ударника и, соответственно, толщины откола, как это видно из приведенных на рис. 3 данных, не привело к формированию ударной волны разрежения или других аномалий в области ожидаемого полиморфного превращения при растяжении кобальта. С другой стороны, в опытах при температурах  $255$  и  $280^\circ\text{C}$ , где ожидаемое давление превращения близко к величине разрушающего напряжения, отмечаются некоторое замедление разрушения и явное уменьшение амплитуды осцилляций скорости после откола.

Таким образом, хотя непосредственного свидетельства протекания высокотемпературного превращения в кобальте в области растяжения не зафиксировано, изменение характера откольного разрушения в области повышенных температур и растягивающих напря-

жений, соответствующих ожидаемому превращению, может быть косвенным свидетельством его реализации в этих условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ударно-волновые** явления в конденсированных средах / Г. И. Канель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортков. М.: Янус-К, 1996.
2. **Кеннеди Д., Ньютон Р.** Плавление и фазовые превращения в твердом состоянии некоторых чистых металлов при высоких температурах и давлениях // *Твердые тела под высоким давлением* / Под ред. В. Пола, Д. Варшауэра. М.: Мир, 1966. С. 187–204.
3. **Asay J. R., Barker L. M.** Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity // *J. Appl. Phys.* 1974. V. 45, N 6. P. 2540.
4. **Baumung K., Bluhm H., Goel B., et al.** Shock-wave physics experiments with high-power proton beams // *Laser Part. Beams.* 1996. V. 14, N 2.
5. **Bloomquist D. D., Sheffield S. A.** Optically recording interferometer for velocity measurements with subnanosecond resolution // *J. Appl. Phys.* 1983. V. 54. P. 1717.
6. **Kanel G. I., Razorenov S. V., Bogatch A. A., et al.** Spall fracture properties of aluminum and magnesium at high temperatures // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79, N 11. P. 8310–8317.
7. **Swegle J. W., Grady D. E.** Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 58. P. 692–701.
8. **Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г.** Исследования разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении // *Физика металлов и металловедение.* 1964. Т. 25, № 4. С. 608–615.
9. **LASL Shock Hugoniot Data** / S. P. Marsh (Ed.) Berkeley: Univ. of California Press, 1980.
10. **Guinan M. W., Steinberg D. J.** Pressure and temperature derivatives of the isotropic polycrystalline shear modulus for 65 elements // *J. Phys. Chem. Solids.* 1974. V. 35. P. 1501–1512.
11. **Физические величины:** Справочник / Под ред. А. П. Бабичева и др. М.: Энергоатомиздат, 1991.

*Поступила в редакцию 30/VIII 2001 г.*