

07,01

Температурная зависимость откольной прочности и уравнение состояния аустенитной хромоникелевой стали 18-10

© А.М. Молодец

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: molodets@icp.ac.ru

(Поступила в Редакцию 13 апреля 2015 г.)

Измерена откольная прочность аустенитной стали 12X18H10T при временах $\sim 10^{-7}$ s в интервале температур 77–580 К. При температуре ~ 140 К выявлена особенность на температурно-временной зависимости откольной прочности исследованной стали, обусловленная взаимодействием процессов откола и превращения аустенита в мартенсит при растяжении. В области температур 300–580 К отмечено уменьшение откольной прочности по мере увеличения температуры, которое истолковано с позиций кинетической концепции прочности. Рассмотрены литературные экспериментальные данные по длительной прочности стали при временах $\sim 10^7$ s, которые согласованы с температурно-временной зависимостью откольной прочности в микросекундном диапазоне времен нагружения. Построено уравнение состояния аустенитной стали 18-10, с помощью которого проведен анализ температурной истории нагружения в цикле сжатие–разгрузка–растяжение при отколе.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации „Росатом“ в рамках контракта № Н.4х.44.90.13.1112 от 20.05.2013.

1. Введение

Аустенитная хромоникелевая сталь типа 18-10 широко используется не только при изготовлении медицинских и бытовых инструментов, но и в качестве конструкционного материала при решении ряда важных задач высокоскоростного ударного нагружения. Изучению физико-механических свойств этой стали при интенсивных ударно-волновых нагрузках посвящена обширная научная литература (см. работы [1–7] и ссылки в них). При этом ряд публикаций относится к исследованию прочностных и теплофизических свойств нержавеющей стали 18-10 марки 12X18H10T [2,5–7]. Цель настоящей работы заключается в измерении температурной зависимости откольной прочности аустенитной хромоникелевой стали 12X18H10T непосредственно во время ударного нагружения и интерпретации этой зависимости с позиций кинетической концепции [8] прочности твердых тел.

2. Эксперимент

Исследуемые образцы стали 12X18H10T представляли собой квадраты размером $\sim 100 \times 100$ mm с толщиной ~ 5 –6 mm, нарезанные из листа в состоянии поставки. Исследуемая сталь имела химический состав согласно ГОСТ 5632-72, который приведен в табл. 1. Рентгеновская дифрактометрия показала отсутствие мартенситной составляющей в исходном состоянии исследуемых образцов.

Начальная температура T_0 в момент ударно-волнового нагружения составляла 77, 140, 180, 300, 500 и 580 К.

Значение $T_0 = 77$ К достигалось в результате охлаждения всей сборки в жидком азоте. Промежуточные температуры 140 и 180 К определялись на основании специально построенной кривой нагревания внутренних слоев предварительно охлажденного до 77 К образца (см. [5,6]). Повышенные значения температуры $T_0 = 500$ и 580 К внутренних слоев образца находились на основании специально построенной кривой охлаждения внутренних слоев предварительно нагретого до 620 К образца аналогично [9]. Общее время нагрева и последующего охлаждения не превышало 30 min.

Образцы нагружались ударом плоского алюминиевого ударника диаметром 60 mm и толщиной 3 mm, разогнанного с помощью устройства из работы [9] до скорости $W_0 = 600(30)$ m/s (рис. 1). В экспериментах при пониженных температурах регистрировались профили (зависимости от времени t) давления $P(t)$ на границе образец–„мягкая“ преграда. В качестве „мягкой“ преграды использовалось стекло ЛК-105 (стекло типа Ругех). В экспериментах при повышенных температурах регистрировались профили свободной поверхности $W(t)$.

Типичные экспериментальные профили $P(t)$ показаны на рис. 2, а. Определение откольной прочности по профилям $P(t)$ проводилось в соответствии с [10]. Согласно [10], в акустическом приближении откольная

Таблица 1. Химический состав (wt.%) стали 12X18H10T

| C | Cr | Ni | Ti | Mn | Si | P | S | Fe |
|-----|------|-----|-----|------|------|---------|--------|------|
| 0.1 | 16.7 | 9.7 | 0.6 | 0.69 | 0.56 | < 0.035 | < 0.02 | 71.6 |

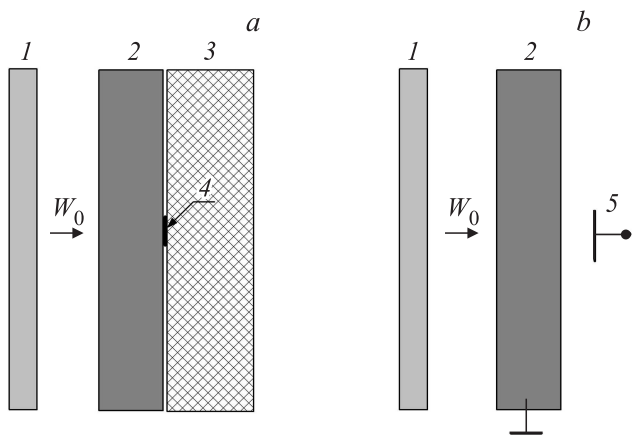


Рис. 1. Схема экспериментов по регистрации профилей давления $P(t)$ (a) и скорости свободной поверхности $W(t)$ (b). a) 1 — алюминиевый ударник толщиной 3 мм, разогнанный до скорости W_0 ; 2 — образец стали толщиной 5.0 мм; 3 — „мягкая“ преграда, изготовленная из стекла ЛК-105 толщиной 12 мм; 4 — манганиновый датчик давления. б) 1 — то же, что и на части a; 2 — образец стали толщиной 6.0 мм; 5 — емкостной датчик скорости свободной поверхности образца.

прочность рассчитывается как

$$\sigma_a = \frac{P_1 + P_2}{2} - \left(\frac{P_1 - P_2}{2} \right) \left(\frac{\rho_0 C_0}{\rho_{0p} C_{0p}} \right), \quad (1)$$

где $\rho_0 = 7.88 \text{ g/cm}^3$ и $C_0 = 4.56 \text{ km/s}$ — справочные значения плотности и объемной скорости звука для исследуемого образца нержавеющей стали. Для стекла ЛК-105 значения $C_{0p} = 5.03 \text{ km/s}$ и $\rho_{0p} = 2.3 \text{ g/cm}^3$ взяты из [11]. Как отмечалось в [10], для упругопластических материалов, имеющих продольную скорость звука $C_l > C_0$, при расчете откольной прочности σ по профилям $P(t)$ в (1) необходимо учитывать упругопластическую поправку $\Delta\sigma$

$$\sigma = \frac{P_1 + P_2 - \Delta\sigma}{2} - \left(\frac{P_1 - P_2 + \Delta\sigma}{2} \right) \left(\frac{\rho_0 C_0}{\rho_{0p} C_{0p}} \right). \quad (2)$$

В (1), (2) значения P_1 и P_2 определяются по экспериментальному профилю $P(t)$ (рис. 2, a). Величина $\Delta\sigma$ находилась с использованием профиля с откольным импульсом (1 или 2) и профиля проходящего импульса сжатия 3 путем сдвига откольного импульса на величину Δt_2 . При этом

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \left(\frac{C_l - C_0}{C_l + C_0} \right), \quad (3)$$

где Δt_1 — период колебаний откольного профиля $P(t)$ (рис. 2, a), $C_l = 5.77 \text{ km/s}$ — продольная скорость звука исследуемой стали. Рассчитанная с помощью (2) температурная зависимость откольной прочности исследуемой стали в диапазоне температур 77–300 К представлена на рис. 3.

Расчеты откольной прочности при повышенных температурах проведены с использованием профилей скорости свободной поверхности $W(t)$ (рис. 2, б) и повторяют методические приемы [9]. Здесь также использована упругопластическая поправка $\Delta\sigma$ [10], величина которой, как и выше, определялась путем сдвига откольного импульса по времени на величину Δt_2 (3); в формуле (3) Δt_1 — период колебаний откольного профиля. Величина $\Delta\sigma$ рассчитывалась как

$$\Delta\sigma = -0.5\rho_0 C_0 \left(\frac{dW}{dt} \right)_2 \Delta t_2,$$

где $(dW/dt)_2$ — производная профиля скорости свободной поверхности в левой окрестности значения W_2 (рис. 2, б). В результате соотношение для расчета от-

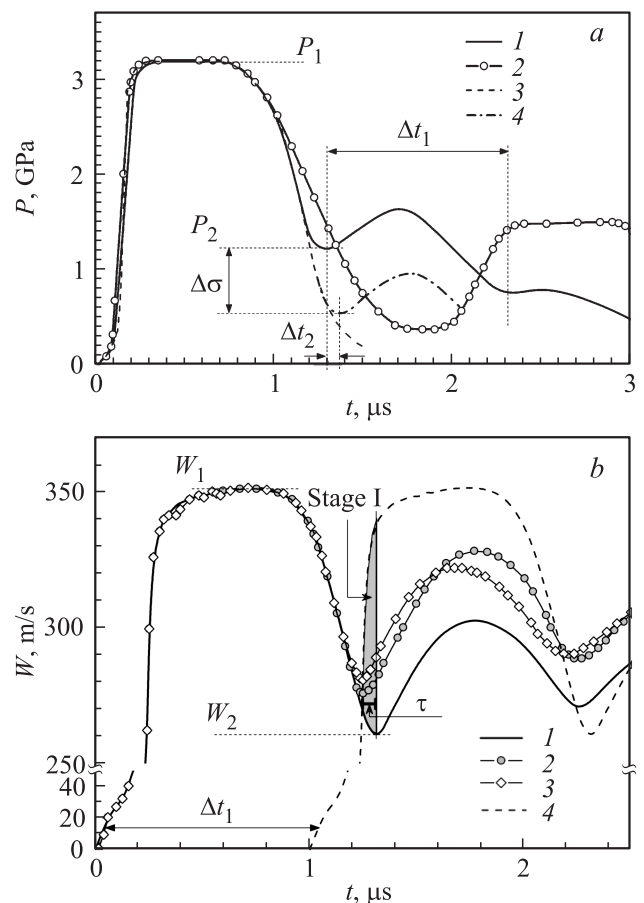


Рис. 2. Профили $P(t)$ (a) и $W(t)$ (b) и их параметры для расчета откольной прочности. a) 1 — профиль $P(t)$ при $T_0 = 300 \text{ K}$; 2 — профиль $P(t)$ при $T_0 = 77 \text{ K}$; 3 — профиль проходящего импульса сжатия, рассчитанного по данным эксперимента в постановке, соответствующей рис. 1, a при замене стеклянной преграды 3 на пластину из стали; 4 — откольный импульс, сдвинутый на Δt_2 . б) 1–3 — профили $W(t)$ при $T_0 = 300, 500$ и 580 K соответственно; 4 — профиль $W(t)$ при $T_0 = 300 \text{ K}$, сдвинутый по оси времени на Δt_1 — период колебаний профиля 1; $\tau \sim 0.045(15) \mu\text{s}$ — оценка времени первой стадии откола в трактовке [12] в области повышенных температур.

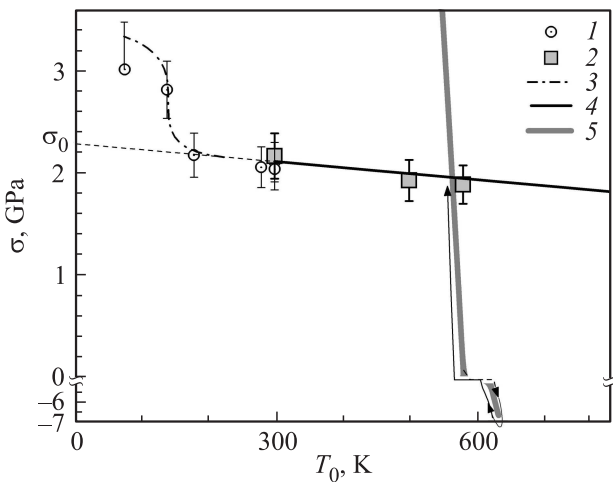


Рис. 3. Температурная зависимость откольной прочности стали 12X18H10T. 1 — откольная прочность, рассчитанная по профилям $P(t)$ согласно (2); 2 — откольная прочность, рассчитанная в соответствии с (4) с использованием профилей $W(t)$; 3 — кривая, объединяющая результаты при пониженных температурах; 4 — температурная зависимость откольной прочности, рассчитанная по формуле (7) с использованием констант из табл. 2 при времени первой стадии $\tau \sim 0.045 \mu\text{s}$; 5 — расчет изменения температуры в цикле ударное сжатие–разгрузка–растяжение по уравнению состояния из раздела 4 (цикл сжатие–разгрузка–растяжение обозначен огибающими стрелками).

кольной прочности σ по профилям $W(t)$ с учетом упругопластической поправки имеет вид

$$\sigma = -0.5\rho_0 C_0 (W_1 - W_2) - \Delta\sigma, \quad (4)$$

где значения W_1 и W_2 определяются по экспериментальному профилю $W(t)$ (рис. 2, b).

Рассчитанная с помощью (4) температурная зависимость откольной прочности исследуемой стали в диапазоне температур 300–580 К также представлена на рис. 3.

Отметим, что в литературе по физике ударных волн в большинстве случаев сжимающие напряжения считаются положительными, а растягивающие — отрицательными. В согласии с этим величина откольной прочности в формулах (2) и (4) оказывается отрицательной. Наоборот, в физике прочности растягивающие напряжения чаще всего считаются положительными. Поэтому на рис. 3 и далее в тексте откольная прочность σ в смысле максимального значения растягивающего напряжения в плоскости откола принята положительной.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Пониженные температуры. Заметим, что профили давления 1 и 2 на рис. 2, a, соответствующие $T_0 = 300$ и 77 К, кардинально различаются. Действительно, на профиле 1 после откольного минимума P_2 в течение времени $\sim \Delta t_1$ наблюдаются два последовательных

импульса, в то время как на профиле 2 имеет место лишь один импульс сжатия. С учетом величины Δt_1 это означает [6], что при $T_0 = 300$ К первый импульс является свидетельством откола (откольным импульсом), а последующий обусловлен его отражением от плоскости откола (внутреннего разрушающегося слоя). В отличие от этого на профиле 2 наблюдается только один импульс. При этом время появления этого импульса соответствует безоткольному случаю (см. [6]), когда импульс растяжения отражается от границы образца 2 с ударником 1 (рис. 1, a).

Отмеченное различие профилей 1 и 2 находится в соответствии с результатами исследования сохраненных образцов, испытавших ударно-волновое нагружение по схеме, показанной на рис. 1, a. Образцы, имевшие температуру $T_0 = 300$ К, содержали откольную поврежденность и незначительное количество мартенсита во внутреннем слое, расположенном на расстоянии $\delta = 0.5\Delta t_1 C_l$ от границы образца со стеклом. Образцы, имевшие температуру $T_0 = 77$ К, не содержали откольной поврежденности. Вместо этого во внутреннем слое, расположенном на расстоянии $\delta = 0.5\Delta t_1 C_l$ от границы образца со стеклом, наблюдалось повышенное содержание мартенсита. Наличие мартенсита было выявлено при травлении образцов в классическом для этих целей реактиве Марбле, а также с помощью рентгеноструктурного анализа [5,6]. Сохраненные образцы, имевшие промежуточные температуры $T_0 = 180$ и 140 К, содержали как откольную поврежденность, так и мартенсит. Соотношение мартенсит–откольная поврежденность увеличивалось по мере понижения температуры T_0 .

Таким образом, эффект понижения начальной температуры на профилях давления и появление мартенсита позволяют дать следующую интерпретацию температурной зависимости откольной прочности в области пониженных температур. Во время пластического деформирования метастабильной аустенитной стали волной растяжения в микрообъемах образца возникают локальные растягивающие напряжения. Эти локальные напряжения могут релаксировать путем зарождения микротрещин, и тогда развивается откольное разрушение. Однако в случае метастабильного материала существует еще одна возможность релаксации растягивающих локальных напряжений. В частности, в метастабильной аустенитной стали 12X18H10T при динамическом растяжении происходит одновременное развитие двух кинетических процессов: зарождения микротрещин и фазового превращения аустенита в мартенсит. Поскольку фазовое превращение аустенита в мартенсит идет с увеличением объема в этих же микрообластях материала, то оно представляет собой альтернативное, но с сохранением сплошности увеличение микрообъемов. Иными словами, переход более плотного аустенита в менее плотный мартенсит подавляет образование микропустот при динамическом растяжении, увеличивая тем самым откольную прочность материала. На основании данных рис. 3 можно сделать вывод, что для исследованной стали процесс

образования мартенсита в волне растяжения становится преобладающим при температуре $T_0 \sim 140$ К, при которой наблюдается аномальное изменение откольной прочности.

3.2. Повышенные температуры. Что же касается изменения откольной прочности аустенитной стали при повышенных температурах, то здесь температурный эффект незначителен и близок к эффекту в чистом железе [9]. На этом основании рассмотрим интерпретацию температурной зависимости откольной прочности стали 12X18H10T в рамках схемы [12,13].

Согласно [12,13], температурно-временная зависимость откольной прочности может быть истолкована с позиции кинетической концепции прочности [8] с помощью аналога соотношения Журкова между временем τ термоактивационной стадии откола (временем стадии зарождения несплошностей при отколе), температурой T и откольной прочностью σ

$$\sigma(\tau, T) = \frac{\sigma_{Th}}{q} \left(1 - T \frac{R}{U_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right), \quad (5)$$

где σ_{Th} — теоретическая прочность, T — температура, τ_0 — время, близкое к обратной дебаевской частоте, R — универсальная газовая постоянная, $U_0 = \text{const}$ — начальный барьер элементарного акта разрушения, $q = q(\tau)$ — зависящий от τ коэффициент перенапряжения, определяемый эмпирическим соотношением

$$q = 1 + \left(\frac{\gamma \sigma_{Th}}{U_0} - 1 \right) \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\tau}{\theta_0} \right)^\alpha \right] \right\}. \quad (6)$$

В (6) α , θ_0 — подгоночные коэффициенты, γ — структурно-чувствительный коэффициент.

Таким образом, для описания температурно-временной зависимости откольной прочности материала необходимо располагать параметрами σ_{Th} , τ_0 , U_0 , α , θ_0 , γ . Эти параметры для стали находились следующим образом. Для величины σ_{Th} использовалось значение $\sigma_{Th} \approx |20.8286C_1 + C_2|$ [12], где C_1 и C_2 — параметры уравнения состояния стали 12X18H10T (см. раздел 4). Величина τ_0 полагалась равной 10^{-13} с. Остальные параметры подбирались так, чтобы соотношение (5) с приемлемой точностью описывало полученные экспериментальные данные. Оптимальные значения σ_{Th} , τ_0 , U_0 , α , θ_0 , γ , а также величина $\kappa_0 = \left(\frac{\gamma \sigma_{Th}}{U_0} - 1 \right)$ приведены в табл. 2.

Об адекватности предлагаемого описания термоактивационной стадии откольного разрушения стали

Таблица 2. Параметры функционального соотношения (5) для температурно-временной зависимости прочности стали 12X18H10T

| α | $\lg(\theta_0, \text{s})$ | κ_0 | $\lg(\tau_0, \text{s})$ | $U_0, \text{kJ/mol}$ | $\gamma, \text{cm}^3/\text{mol}$ | σ_{Th}, GPa |
|----------|---------------------------|------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 0.4 | -5.3 | 34.43 | -13.0 | 416.55 | 544.18 | 27.12 |

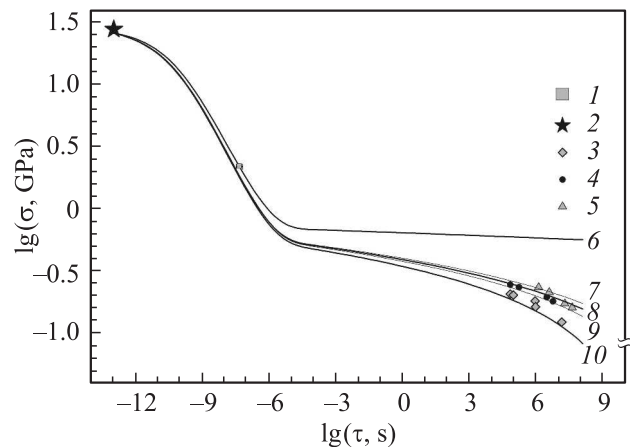


Рис. 4. Изотермы температурно-временной зависимости прочности аустенитной стали 12X18H10T. 1 — откольная прочность при начальной температуре $T_0 = 300$ К; 2 — величина σ_{Th} из табл. 2; 3–5 — длительная прочность стали 12X18H10T при $T_i = 923, 873$ и 853 К соответственно (данные [14]); 6–10 — изотермы (10) при $T_i = 273, 800, 823, 850$ и 923 К соответственно.

12X18H10T можно судить по согласию между экспериментом и рассчитанными функциональными зависимостями в области повышенных температур (рис. 3, 4).

На рис. 3 прямой 4 представлена температурная зависимость откольной прочности $\sigma_T = \sigma(\tau, T)$ при постоянном времени $\tau \sim 0.045(15) \mu\text{s}$, определенном по профилям $W(t)$

$$\sigma_T = \sigma_0 + \eta T, \quad (7)$$

где коэффициенты σ_0 и η не зависят явно от температуры и в согласии с (5) являются функциями только времени τ , входящего в выражение для коэффициента перенапряжения (6):

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{Th}}{q(\tau)}, \quad (8)$$

$$\eta = - \left(\frac{\sigma_{Th}}{q(\tau)} \frac{R}{U_0} \right) \ln(\tau/\tau_0). \quad (9)$$

Как видно, соотношение (7) удовлетворительно согласуется с температурной зависимостью откольной прочности стали при повышенных температурах.

Удовлетворительное согласие с экспериментом наблюдается также и для изотерм прочности, т.е. зависимости растягивающего напряжения $\sigma_T = \sigma(\tau, T_i)$ от времени τ при постоянной температуре $T_i = \text{const}$ в виде

$$\sigma_T = \frac{\sigma_{Th}}{q(\tau)} \left(1 - T_i \frac{R}{U_0} \ln(\tau/\tau_0) \right). \quad (10)$$

Так, на рис. 4 показаны изотермы (10) на фоне данных по длительной прочности стали 12X18H10T из работы [14]. Как видно, изотермы (10) согласуются с экспериментальными как в откольной области при временах $\sim 10^{-7}$ с, так и при временах испытания на длительную прочность до 10^7 с [14].

Таблица 3. Коэффициенты полуэмпирического выражения (11) для свободной энергии аустенитной стали 18-10

| A, g/mol | R, J/molK | T ₀ , K | V ₀ , cm ³ /mol | Θ ₀ , K | ν ₀ , cm ³ /mol | ν _x , cm ³ /mol | C ₁ , GPa | C ₂ , GPa | C ₃ , kJ/g |
|----------|-----------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 53.94 | 24.94 | 298 | 6.85 | 303.6 | 15.785 | 14.718 | -540.483 | 11230.38 | -1539.74 |

4. Уравнение состояния

Полуэмпирическое приближение (см. [12]) для фоновой части свободной энергии твердого тела $F = F(V, T)$, где V — удельный объем материала, T — его температура, базируется на модели эйнштейновских осцилляторов

$$F = E_x + 3R \left[\frac{\Theta}{2} + T \ln \left(1 - \exp \left(-\frac{\Theta}{T} \right) \right) \right], \quad (11)$$

$$\Theta = \Theta_0 \left(\frac{\nu_0 - V}{\nu_0 - V_0} \right)^2 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{2/3}, \quad (12)$$

$$\nu_0 = V_0 \left(1 + \frac{2}{\gamma_0 - 2/3} \right), \quad (13)$$

где R — универсальная газовая постоянная, $\Theta = \Theta(V)$ — характеристическая температура, зависящая только от объема, $\Theta_0 = \Theta(V_0)$, ν_0 — параметр, имеющий смысл характеристического объема, $\gamma_0 = \gamma_0(V_0, T_0)$ — параметр Грюнайзена, V_0 — начальный объем, T_0 — начальная температура.

Единственный подгоночный параметр модели ν_x входит в выражение для потенциальной энергии $E_x = E_x(V)$

$$E_x = -\nu_x(C_1 H_x + C_2 x) + C_3, \quad (14)$$

$$H_x = 9 \left(\frac{1}{10} x^{-2/3} + 2x^{1/3} + \frac{3}{2} x^{4/3} - \frac{1}{7} x^{7/3} + \frac{1}{70} x^{10/3} \right), \quad (15)$$

$$x = \frac{V}{\nu_x}, \quad (16)$$

где C_1, C_2, C_3 — константы, выражающиеся через справочные данные о свойствах материала и параметр ν_x . Величина подгоночного параметра ν_x для нержавеющей стали находилась из условия наилучшего совпадения расчетной ударной адиабаты с экспериментальными данными из работ [4,15,16]. Найденная величина ν_x составила 14.718 cm³/mol. Параметры, входящие в (11), вместе с молярной массой A стали 18-10 и универсальной газовой постоянной R представлены в табл. 3.

На рис. 5 представлены результаты расчетов температуры и скорости звука ударносжатой стали 18-10 и литературные (экспериментальные и расчетные) данные. Как видно, в диапазоне давлений до 250 GPa и температур до 5000 K результаты расчетов теплофизических параметров ударносжатой стали практически совпадают с данными [4,15,17] для скорости звука и с данными [15,18] для температуры.

В заключение, опираясь на полученное уравнение состояния и используя газодинамический код Demo-STA [19], доступный по адресу <http://www.icp.ac.ru/images/upload/file/source/Molodets/demo-sta.zip>, сравним величины температур внутренних слоев образца при ударном сжатии и последующем растяжении с вели-

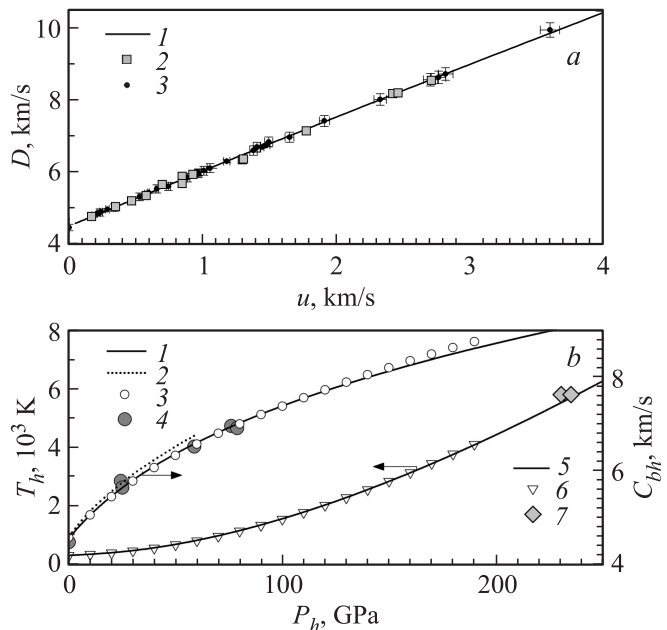


Рис. 5. Описание теплофизических параметров ударносжатой аустенитной стали. *a* — ударная адиабата в координатах массовая скорость u —скорость ударной волны D . 1 — расчет ударной адиабаты с использованием (11), 2 — эксперимент для стали 12X18N10T из [16], 3 — эксперимент для стали 304 [15]. *b* — температура ударного сжатия T_h и объемная скорость звука C_{bh} в зависимости от давления P_h ударного сжатия для стали типа 18-10. 1 — расчет $C_{bh}(P_h)$ с использованием (11), 2 — данные для нержавеющей стали 12X18N10T [17], 3 — данные для стали 304 [15], 4 — эксперимент для стали 304 [4], 5 — расчет температуры T_h (данные настоящей работы), 6 — расчет T_h для стали 304 [15], 7 — эксперимент по измерению T_h для стали 304 [18].

чиной начальной температуры образцов T_0 . На рис. 3 представлены рассчитанные изменения температуры в цикле ударное сжатие—растяжение (фазовые траектории) применительно к выполненным экспериментам для $T_0 = 580$ K. Как видно, разница между T_0 и температурой в момент τ достижения откольной прочности невелика и составляет ~ 10 K. Эта величина принята в качестве погрешности температуры при отколе, ей соответствует конечная ширина квадратов в области повышенных температур на рис. 3.

5. Заключение

Проведены измерения откольной прочности аустенитной стали типа 18-10 при температурах 77–580 K. При

температуре ~ 140 К исследованная сталь проявляет аномальное увеличение откольной прочности. Этот эффект обусловлен фазовым переходом аустенита в волне растяжения, который подавляет образование микронесплошностей при растяжении и тем самым повышает сопротивление откольному разрушению. В области температур 300–600 К откольная прочность исследованной стали уменьшается с увеличением температуры в согласии с закономерностями термофлуктуационного механизма разрушения твердых тел. Температурно-временная зависимость откольной прочности стали сопоставлена с закономерностями изменения длительной прочности в области времен нагружения $\sim 10^7$ с. Показано, что в областях температур 300–1000 К и времен нагружения 10^{-7} – 10^7 с экспериментальные данные разрушения нержавеющей стали могут быть качественно и количественно истолкованы с позиций кинетической концепции прочности.

Список литературы

- [1] П.О. Пашков, З.И. Гелунова. Ударно-волновые эффекты в упрочненных сталях. Волгоград. (1968). 250 с.
- [2] В.К. Голубев, С.А. Новиков, Ю.С. Соболев, Т.С. Юкина. Проблемы прочности 6, 28 (1985).
- [3] S.N. Chang, M.A. Meyers. Acta Met. **36**, 1085 (1988).
- [4] T.S. Duffy, T.J. Ahrens. J. Appl. Phys. **82**, 4259 (1997).
- [5] A.N. Dremin, A.M. Molodets, A.I. Melkumov, A.V. Kolesnikov. In: Shock wave and high strain rate phenomena in materials / Eds M.A. Meyers, L.E. Murr, K.R. Staudhammer. Marcel Dekker, N.Y. (1992). P. 751–757.
- [6] А.М. Молодец, А.Ю. Фомичев. Химическая физика **16**, 124 (1997).
- [7] Е.А. Козлов, И.Г. Бродова, Т.И. Яблонских. Деформация и разрушение материалов **9**, 8 (2011)
- [8] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. Наука, М. (1974). 560 с.
- [9] А.М. Молодец, В.И. Лебедев, А.Н. Дремин. Физика горения и взрыва **25**, 4, 101 (1989).
- [10] В.И. Романченко, Г.В. Степанов. Прикл. механика и техн. физика **4**, 141 (1980).
- [11] А.М. Молодец. Хим. физика **16**, 113 (1997).
- [12] А.М. Молодец. ФТТ **56**, 2162 (2014).
- [13] А.М. Молодец. ФТТ **55**, 2090 (2013).
- [14] Ф.Ф. Химушин. Нержавеющие стали. Металлургия, М. 1967. 798 с.
- [15] R.G. McQueen, S.P. Marsh, J.W. Taylor, J.N. Fritz, W.J. Carter. In: High-velocity impact phenomena / Ed. R. Kinslow. Academic, N.Y. (1970). P. 294.
- [16] М.Ю. Беляков, М.В. Жерноклетов, Ю.Н. Сутулов, Р.Ф. Трунин. Изв. АН СССР. Физика Земли **1**, 99 (1991).
- [17] В.Г. Вильданов, В.М. Слободенюков, А.О. Борщевский, С.В. Зверев, О.В. Ткачев. В сб.: Труды IX Международной конференции „Забабахинские научные чтения“. Снежинск (2007); <http://www.vniitf.ru/rig/konfer/9zst/s5/5-c14.pdf>
- [18] J. Bass, T.J. Ahrens, J.R. Abelson, T. Hua. J. Geophys. Res. **95**, 21, 767 (1990)
- [19] В.В. Ким, А.А. Голышев, Д.В. Шахрай, А.М. Молодец. В сб.: Труды XI Междунар. конф. „Забабахинские научные чтения“. Снежинск (2012); <http://www.vniitf.ru/images/zst/2012/s6/6-24.pdf>