

УДК 539.4:620.17

УСТАНОВЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ХЛАДНОЛОМКОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ ЛОКАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

¹Сибилёв А.В., ²Мишин В.М.

¹ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет»,
Ставрополь, e-mail: sibilevalexander@yandex.ru;

²ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет»,
Пятигорск, e-mail: mishinvm@yandex.ru

Рассмотрено влияние геометрии концентраторов напряжений (надрезов) и скорости нагружения, как основных внешних факторов, влияющих на температуру хладноломкости стальных образцов, ниже которой их разрушение происходит хрупко без остаточной макродеформации. Сформулирован теоретически и доказан экспериментально критерий хладноломкости стальных образцов, который учитывает характеристики сопротивления металла деформации (предел текучести) и разрушению (сопротивление сколу), а также совокупно действующих внешних факторов (геометрия концентратора напряжений и скорость нагружения), ответственных за переход стального образца или детали из вязкого состояния в хрупкое. Этот критерий хладноломкости заключается в том, что температура хладноломкости, определяемая как температура достижения критического состояния – локального разрушения в вершине конструктивного концентратора напряжений, непосредственно связана с характеристиками прочности, текучести и перенапряжения.

Ключевые слова: сталь, температура хладноломкости, локальное разрушение, концентраторы напряжений, скорость нагружения

ASSIGNMENT COLD BRITTLENESS CRITERIA OF STEEL SAMPLES BASED ON THE CRITERIA OF LOCAL DESTRUCTION

¹Sibilev A.V., ²Mishin V.M.

¹North-Caucasus Federal University, Stavropol, e-mail: sibilevalexander@yandex.ru;

²North-Caucasus Federal University, Pyatigorsk, e-mail: mishinvm@yandex.ru

Consider the influence of stress concentrators (notches) geometry and loading rate, as the main external factors that affect the temperature brittleness of steel samples, below which their brittle fracture occurs without permanent macrodeformation. Formulated and experimentally proved brittleness criterion of steel samples, which takes into account characteristics of the resistance of the metal deformation (yield) and destruction (resistance to cleavage), and the combined action of external factors (stress concentrator geometry and loading rate), responsible for the steel sample or parts transition from the viscous to brittle state. This criterion lies in the fact that the brittleness temperature defined as the temperature of a critical state – local fracture in the top of the constructive stress concentrator, is directly related to the characteristics of strength, yield stress and overstress.

Keywords: steel, brittleness temperature, local destruction, stress concentrators, load rate

При понижении температуры в условиях нагружения стальные детали на сравнительно небольшом температурном интервале – пороге хладноломкости – интенсивно теряют механические свойства [1]. На этом интервале резко падают разрушающая нагрузка и предел прочности. При температурах ниже этого интервала разрушение происходит без остаточной макропластической деформации. На переход от вязкого к хрупкому указывают изменения строения излома и резкое снижение ударной вязкости, наблюдаемое в диапазоне граничных значений вязкого и хрупкого разрушения. При снижении температуры создаются условия, затрудняющие пластическую деформацию, поэтому образование пластической зоны в основании надреза или трещины будет задерживаться. Таким образом, понижение температуры является основным фактором, приводящим к охрупчиванию стали.

Целью данной работы являлась разработка физико-механических основ кри-

терия хладноломкости (вязко-хрупкого перехода), который бы учитывал характеристики сопротивления металла деформации и разрушению, а также основной комплекс совокупно действующих факторов (внешних и внутренних), ответственных за переход стального образца или детали из вязкого состояния в хрупкое. Такой температурный критерий позволил бы прогнозировать температуру хладноломкости образцов произвольной формы или деталей с концентраторами напряжений по результатам испытаний стандартных образцов. Полагали, что в основу механизма такого температурного критерия может быть положен критерий локального разрушения – сопротивление сколу σ_F (критическое максимальное локальное растягивающее напряжение), инвариантное (независимое) к таким внешним факторам, как геометрия концентраторов напряжений и образцов, скорость нагружения и температура испытаний [1-4].

Установление теоретической связи температуры хладноломкости с внутренними характеристиками стали – сопротивления сколу σ_F , пластичности σ_T и внешними условиями (скорость нагружения и геометрия концентратора напряжений)

При хрупком разрушении сколом микротрещина зарождается под воздействием сдвиговых напряжений, однако локальное разрушение в целом контролируется величиной максимального локального растягивающего напряжения $\sigma_{11\max}$ перед концентратором напряжений, где напряжение может превосходить предел текучести. Известную схему Иоффе можно развить, рассматривая пересечение характеристики стали хрупкому разрушению – уровня сопротивления сколу (σ_F), независимого от температуры, скорости нагружения и геометрии образцов и концентраторов напряжений [1, 2], и температурных зависимостей максимального локального растягивающего напряжения ($\sigma_{11\max}$) перед концентратором напряжений (рис. 1).

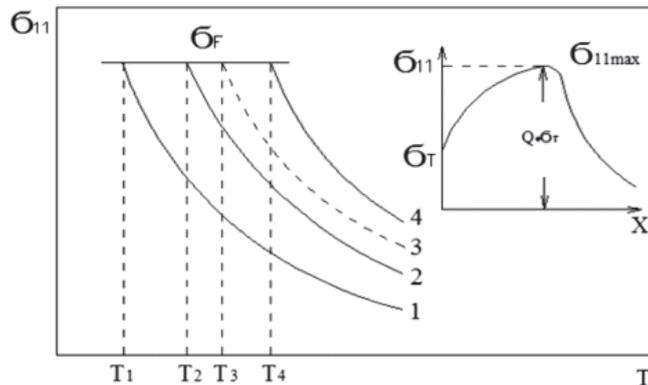


Рис. 1. Схема влияния перенапряжения на критическую температуру хрупкости: 1 – гладкий образец; 2 – образец с U-надрезом; 3 – образец с V-надрезом; 4 – образец с трещиной

Согласно этой схеме хрупкое разрушение реализуется при достижении максимальным локальным растягивающим напряжением перед надрезом ($\sigma_{11\max}$) уровня сопротивления сколу (σ_F). Из рис. 1 видно, что температура хладноломкости (T_1, T_2, T_3, T_4) зависит от остроты концентратора напряжений. Эта температура ($T_{кр}$), в дальнейшем называемая температурой хладноломкости, феноменологически соответствует температуре, при которой нагрузка общей текучести $P_{от}$ достигает разрушающей нагрузки P_p (рис. 1):

$$\sigma_F = \sigma_T \left(T_{кр}, \frac{de}{dt} \right) \cdot Q_{от}, \quad (1)$$

$$\sigma_T \left(T, \frac{de}{dt} \right) = \sigma_T \left(T_o, \frac{de}{dt} \right) \cdot \exp \left\{ \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) \right]^n \right\}, \quad (2)$$

где $\sigma_T = f(T, de/dt)$ – предел текучести при комнатной температуре, определенный при скорости нагружения (de/dt), $T_o = 293$ К; β, n – коэффициенты, зависящие от типа стали.

Выразив критическую температуру хрупкости явным образом из (1), получили зависимость $T_{кр} = (\sigma_F; \sigma_T; Q_{от})$, учитывающую влияние сопротивления разрушению (σ_F), текучести (σ_T) (зависящей от скорости нагружения (de/dt)) и геометрии образца,

концентратора напряжений и способа нагружения ($Q_{от}$):

где $Q_{от}$ – перенапряжение общей текучести образца с концентратором напряжений. Перенапряжение Q характеризует превышение максимальным локальным растягивающим напряжением предела текучести стали. При некотором уровне нагрузки – нагрузке общей текучести $P_{от}$ рост $\sigma_{11\max}$ за счет стеснения деформаций прекращается и перенапряжение достигает своего максимального значения $Q_{от}$ [5].

Можно выразить зависимость предела текучести $\sigma_T = f(T, de/dt)$ от температуры испытаний (T) и скорости нагружения (de/dt):

где β, n – коэффициенты связи предела текучести с температурой, зависящие от марки

$$T_{кр} = \left[\frac{1}{T_o} + \frac{1}{\beta} \left(\ln \frac{\sigma_F}{Q_{от} \cdot \sigma_T(T_o, de/dt)} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где β, n – коэффициенты связи предела текучести с температурой, зависящие от марки

стали и приведенные в известных справочниках; T_0 – нормальная температура (20°C); σ_T – предел текучести при нормальной температуре (T_0).

Полученное теоретическое выражение (3) дает возможность расчетом определить критические температуры хрупкости ($T_{кр}$) стальных образцов или деталей с концентраторами напряжений различных типов. Для этого необходимо из эксперимента знать критическое максимальное локальное напряжение (σ_F), предел текучести стали (σ_T) при комнатной температуре (T_0), определенный при скорости нагружения, равной скорости нагружения зоны локального разрушения детали, коэффициенты n и β и перенапряжение общей текучести исследуемого образца или детали ($Q_{от}$), рассчитанное методом конечных элементов.

Материал и методы исследования

Исследования проводили на стали 10 кп, выплавленной в открытой индукционной печи. Использовали образцы на растяжение диаметром 8,00 мм гладкие и с кольцевыми проточками глубиной 2,00 мм, углами раскрытия 30, 60, 120° и U-образными. Термообработку проводили по режиму: нагрев 1000°C, 60 мин, охлаждение на воздухе. Размер зерна после такой термообработки составлял 30 мкм. Испытания проводили растяжением на испытательной машине «Instron» при скоростях нагружения 2,20 и 200 мм/мин и различных температурах испытания в диапазоне от 77 до 293 К. Регистрировали разруша-

ющую нагрузку P_p и нагрузку общей текучести $P_{от}$. По результатам испытания гладких образцов определяли температурную зависимость предела текучести при скорости нагружения 2,20 и 200 мм/мин. Далее определяли температуру хладноломкости как температуру совпадения этих нагрузок и соответствующий ей предел текучести.

Экспериментально критическое максимальное локальное растягивающее напряжение σ_F определяли по испытаниям образцов с U-образным надрезом при скорости нагружения 2,20 и 200 мм/мин. Экспериментальное определение критических температур хрупкости заключалось в установлении температуры, при которой нагрузка общей текучести равна разрушающей нагрузке.

С другой стороны, вычисляли по формуле (3) температуры хладноломкости для образцов на растяжение с надрезами различной геометрии: углами раскрытия 30, 60, 120° и скоростями нагружения 2, 20 и 200 мм/мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Подтверждение инвариантности критерия локальных растягивающих напряжений. Полагали необходимым подтвердить инвариантность критерия локальных растягивающих напряжений [1, 3, 4], а именно независимость сопротивления склосу σ_F (критического максимального локального растягивающего напряжения) от таких внешних факторов, как геометрия концентраторов напряжений и образцов, скорость нагружения и температура испытаний.

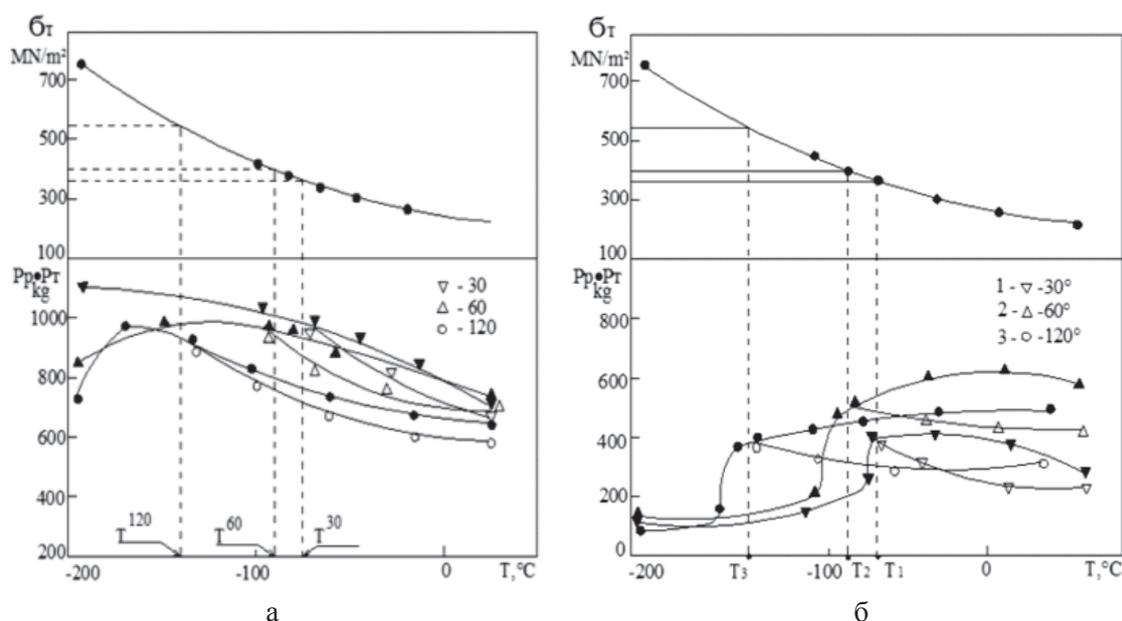


Рис. 2. Зависимости разрушающей нагрузки, нагрузки общей текучести и предела текучести от температуры испытаний образцов с различной геометрией надрезов (углы раскрытия 120, 60 и 30° при скорости нагружения: а – 20 мм/мин; б – 200 мм/мин. Сталь 10 кп

По результатам испытаний и расчета критических максимальных локальных растягивающих напряжений была построена

их зависимость от температуры испытаний, угла раскрытия надреза, скорости нагружения (рис. 3).

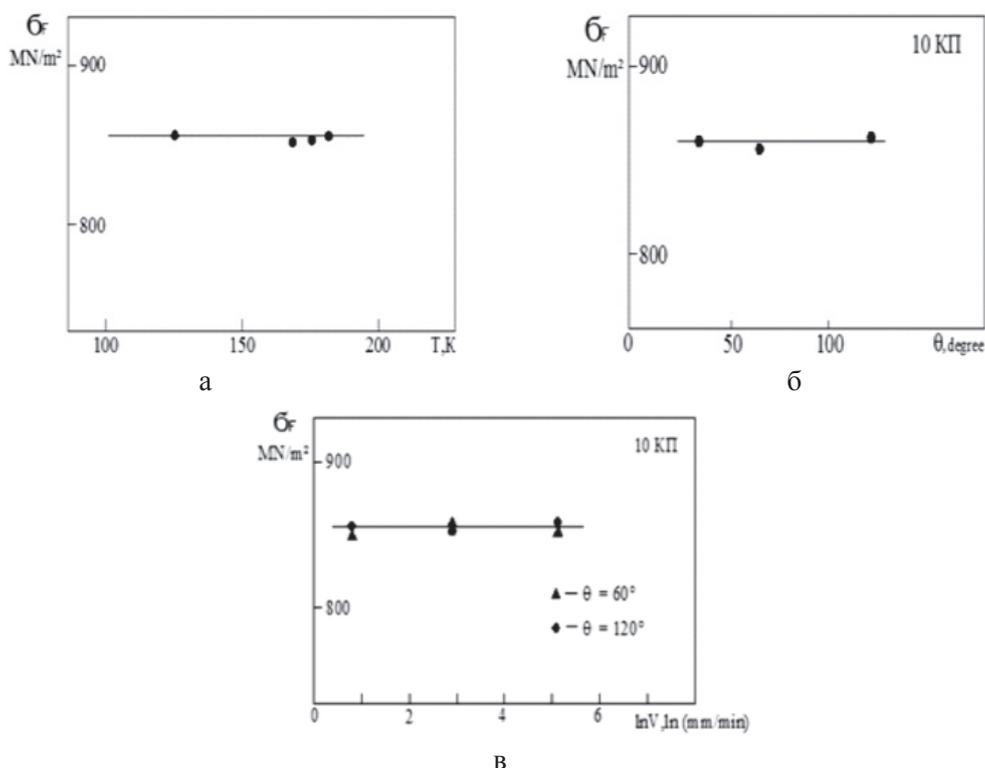


Рис. 3. Независимость критических максимальных локальных растягивающих напряжений σ_F от а – температуры испытаний; б – угла раскрытия надреза, скорости нагружения. Сталь 10 кп

Установлено экспериментально, что критическое максимальное локальное растягивающее напряжение σ_F не зависит от температуры испытаний, угла раскрытия надреза и скорости нагружения для стали 10 кп, что подтверждают результаты, полученные Ужиком Г.В., Ноттом Д.Ф., Орованом Е., Мешковым Ю.Я. [1, 3, 5]. Таким образом, в основу критерия хладноломкости может быть положен критерий локального разрушения – сопротивление сколу σ_F (критическое максимальное локальное растягивающее напряжение), инвариантное к геометрии концентраторов напряжений и образцов, скорости нагружения и температуре испытаний.

Проведена экспериментальная проверка теоретической связи температуры хладноломкости с внутренними характеристиками стали – локальной прочности (сопротивления сколу σ_F), пластичности (σ_T) и внешними условиями (скорость нагружения и геометрия концентратора напряжений).

Результаты экспериментального и расчетного определения критической температуры хрупкости представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что увеличение остроты надреза приводит к смещению температуры хладноломкости в область повышенных температур. Так, при одной и той же скорости нагружения уменьшение угла раскрытия надреза с 120° до 30° приводит к значительному повышению температуры хладноломкости. Увеличение скорости нагружения с 2 до 200 мм/мин также приводит к значительному повышению температур хладноломкости.

Расчетные температуры хладноломкости образцов с различными геометриями надрезов (углами раскрытия 120° , 60° , 30°), определенные по формуле (3), сравнивали с экспериментально определенными температурами хладноломкости. Сравнение расчетных и экспериментально определенных температур хладноломкости образцов с различными концентраторами напряжений, представленное на рис. 4, показывает хорошую сходимость теоретических и экспериментальных результатов и возможность прогнозирования температур хладноломкости образцов или деталей с учетом их геометрии и скорости нагружения по результатам испытаний стандартных образцов по формуле (3).

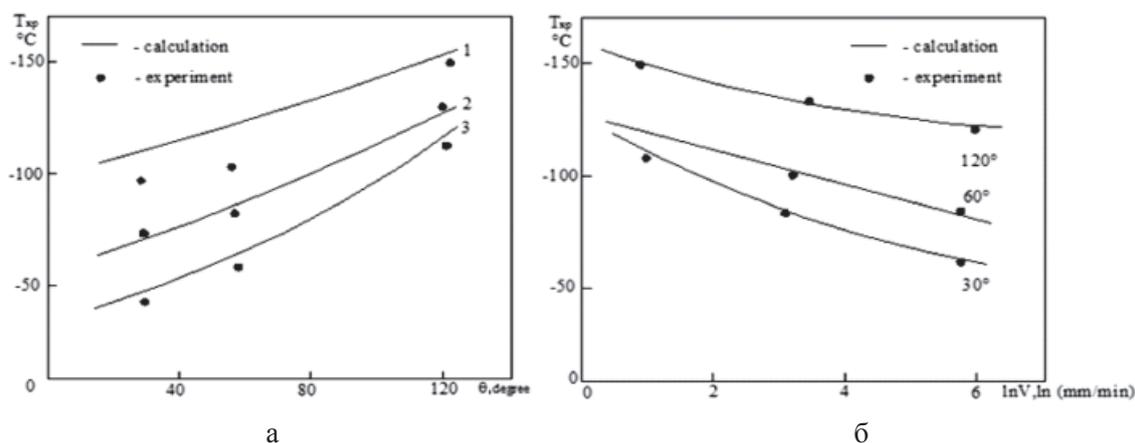


Рис. 4. Расчетные и экспериментально определенные зависимости температуры хладноломкости от:
 а – углов раскрытия надрезов (120, 60 и 30°);
 б – скорости нагружения (2, 20 и 200 мм/мин). Сталь 10 кп

Заключение

1. Разработаны физико-механические основы критерия хладноломкости (вязкохрупкого перехода), заключающиеся в том, что температура хладноломкости, определяемая как температура достижения критического состояния – локального разрушения в вершине конструктивного концентратора напряжений, непосредственно связана с характеристиками прочности, текучести и перенапряжения. Этот температурный критерий позволяет прогнозировать температуру хладноломкости образцов произвольной формы или деталей с концентраторами напряжений по результатам испытаний стандартных образцов.

2. Температура хладноломкости образцов или деталей с концентраторами напряжений может быть определена расчетным путем по экспериментально определенной характеристике прочности стали – критическому максимальному локальному растягивающему напряжению $\sigma_{F\sigma}$ температурной зависимости предела текучести и перенапряжению общей текучести.

Список литературы

1. Нотт Д.Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
 2. Мишин В.М., Кислюк И.В., Саррак В.И. Анализ влияния легирования на порог хладноломкости железа в рамках схемы Иоффе-Орвана // Физика металлов и металловедение. – 1991. – № 7. – С. 188–192.
 3. Мишин В.М. Метод определения критической температуры хрупкости сталей, основанный на критерии локального разрушения // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения: научн. тр. VI Межд. н/пконф. Книга «Приборостроение», МО РФ, МГАПИИ. – М., 2003. – С. 152–157.

4. Мишин В.М. Подтверждение инвариантности критерия хрупкости стали – σF -методом механостимулированной фотоэмиссии // Мат. XXXIX н/т конф. СевКавГТУ за 2010 год. Т. 1. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010.

5. Мишин В.М., Сибилёв А.Н. Критерий хладноломкости стальных деталей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 11. – С. 102–104.

References

1. Nott D.F. Osnovy mehaniki razrusheniya. M.: Metallurgiya, 1978. pp. 256.
 2. Mishin V.M., Kisljuk I.V., Sarrak V.I. Analiz vlijaniya legirovaniya na porog hladnolomkosti zheleza v ramkah shemy Ioffe-Orovana // Fizika metallov i metallovedenie. 1991. no 7. pp.188–192.
 3. Mishin V.M. Metod opredelenija kriticheskoj temperatury hrupkostistalej, osnovannyj na kriterii lokal'nogo razrushenija // Nauchn. tr. VI Mezhd. n/p konf. «Fundamental'nye i prikladnye problem priborostroeniya». Kniga «Priborostroenie», MO RF, MGAPII, Moskva, 2003. pp.152–157.
 4. Mishin V.M. Podtverzhdenie invariantnosti kriterija hrupkosti stali – metodom mehanostimulirovannoj fotojemiissii // Mat. XXXIX n/t konf. Sev Kav GTU, 2010, T. 1. Estestvennyye i tochnyye nauki. Tehnicheskie i prikladnyye nauki. Stavropol': SevKavGTU, 2010.
 5. Mishin V.M., Sibilev A.N. Kriterij hladnolomkosti stal'nyh detalej // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2011. no. 11. pp. 102–104.

Рецензенты:

Янукян Э.Г., д.ф.-м.н., декан инженерного факультета, Северо-Кавказский федеральный университет, филиал, г. Пятигорск;
 Казуб В.Т., д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и образования РАЕ, зав. кафедрой физики и математики Пятигорской государственной фармацевтической академии, г. Пятигорск.

Работа поступила в редакцию 07.03.2013.