

669.14:539.375:621.70.19

В.А. Скуднов

Нижегородский государственный технический университет

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ МЕТАЛЛОВ И НОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ

Аннотация. Приведено новое феноменологическое уравнение связи энергоемкости металлов с четырьмя основными факторами состояния поликристаллов: силовыми, временными, дефектными и внешними механическими, позволяющие описать закономерности ее поведения в зависимости от относительной твердости, соотношения скоростей релаксации нагрузки, плотности и показателей напряженно-деформированного состояния при разных степенях деформаций. Знание величины энергоемкости позволяет производить расчеты новых комплексных энергетических критериев разрушения синергетики: зарождение, распространение трещин, хрупкости, масштаба и дать более объективный анализ состояния поликристаллов, который невозможно получить по механическим свойствам.

Ключевые слова: энергоемкость, критерии разрушения, факторы состояния структуры, критерий зарождения трещины, критерий распространения трещины, критерий хрупкости.

METALS INTERNAL ENERGY CAPACITIES LINE OF CONDUCT BEHAVIORAL PATTERNS AND NEW ENERGY-SENSITIVE DESTRUCTION CRITERION

Abstract. The article describes a new phenomenological equation of energy intensity of metals with the four basic factors of polycrystals: power, time, defective and external mechanical-to describe her behavior patterns depending on relative hardness, velocity relaxation ratio, density and performance load stress and strain at different degrees of deformities. The value of energy intensity can produce calculations of new integrated energy criteria: birth of synergetics, devastation spread of cracks, fragility, scale, and give a more objective analysis of polycrystalline, which cannot be obtained by mechanical properties.

Keywords: energy intensity, the criteria of destruction factors of layout state, the criterion of origination of cracks, crack propagation criterion, the criterion of embrittlement.

Ранее были опубликованы закономерности поведения предела текучести [1], сопротивления разрушению [2], предельной деформации до разрушения [3]. В настоящей работе рассматривается поведение энергоемкости (предельной удельной деформации), равной площади под диаграммой «истинное напряжение – истинная деформация» при различных испытаниях металлов в широком диапазоне напряженных состояний.

Впервые расчет величины W_c было предложено производить по результатам испытаний образцов на растяжение по ГОСТ 1497 по значениям механических характеристик и размерам образца в равномерной и конечной точке при разрушении [4]:

$$W_c = \frac{\sigma_{0,2} + \sigma_b}{3} \left(\frac{d_0^2}{d_p^2} - 1 \right) + 4\sigma_b \frac{d_0^2}{d_p^2} \ln \frac{d_p}{d_k} + \sigma_b \frac{d_0^2}{d_p^2} \left(\frac{d_0^2}{d_p^2} - 1 \right), \quad (1)$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; σ_b – предел прочности; d_0, d_p, d_k – исходный диаметр, диаметр к моменту окончания равномерного удлинения и шейки соответственно.

В дальнейшем при испытаниях образцов на растяжение по ГОСТ 1497 было предложено рассчитывать величину величина W_c по формуле

$$W_c = 0,5(\sigma_T + \sigma_k)\epsilon^{\text{пред}}, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести; σ_k – сопротивление разрушению; $\epsilon^{\text{пред}}$ – истинная предельная деформация при рас-

тяжении, равная $\epsilon^{\text{пред}} = \ln(1/1 - \psi)$, (ψ – относительное сужение) или $\epsilon^{\text{пред}} = \ln(1 + \delta)$, δ – относительное удлинение (при отсутствии деформации в шейке).

Формулы (1) и (2) являются частными выражениями, относящимися к одноосному растяжению, при котором показатель напряженного состояния $\Pi = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3/\sigma_T = 1$, так как $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. При других способах испытаний, при которых значения Π приобретают произвольные значения, энергоемкость также будет приобретать другие предельные значения.

В работе [5] было показано, что энергоемкость W_c , (МДж/м³) является синергетической макро характеристикой поликристаллов, поведение которой, как и ее составляющих, зависит от основных четырех факторов состояния структуры: силового (прочности, твердости), временного (релаксации напряжений), повреждающего (дефектности, пористости) и внешнего (нагрузки, создающей внутренне напряженно-деформированное состояние). Каждый фактор может изменяться в широких пределах. Наиболее важным фактором, с точки зрения влияния на наступление разрушения материалов в конструкциях, приводящих к авариям, является напряженное состояние, изменяющееся от $-\infty$ до $+\infty$, а практически в пределах $-6,0 < \Pi < 6,0$.

Представляет интерес получить общее феноменологическое уравнение связи энергоемкости с перечисленными факторами, исходя из ранее описанных представ-

лений физики разрушения [3], что разрушению всегда предшествует пластическая деформация.

Представим, что общее изменение энергоемкости твердого тела (ΔW) при пластической деформации состоит из ее возможного увеличения в результате наклепа (ΔW_1) и уменьшения вследствие релаксации (ΔW_2) и может быть представлено выражением

$$\Delta W_c = \Delta W_1 + \Delta W_2. \quad (3)$$

Раскроем содержание составляющих выражения (3). Величина ΔW_1 может быть выражена в виде

$$\Delta W_1 = \alpha W \Delta E, \quad (4)$$

где α – коэффициент пропорциональности, зависящий от сущности процесса накопления энергии в твердом теле; W – количество энергоемкости в деформируемом теле в данный момент; ΔE – величина прироста пластической деформации.

Величина ΔW_2 может быть представлена в виде

$$\Delta W_2 = -\beta W \tau, \quad (5)$$

где β – коэффициент пропорциональности, зависящий от сущности процесса релаксации, самоорганизации, адаптации, есть константа скорости релаксации; $\tau = \Delta E / V$ – интервал времени, в течение которого происходит рассматриваемая релаксация внутренней энергии; V – скорость деформации, задаваемая экспериментально, от которой зависит время, отводимое на релаксацию внутренней энергии.

Подставив (4) и (5) в уравнение (3) получим

$$\Delta W_c = \alpha W \Delta E - \beta W \Delta E / V. \quad (6)$$

После преобразований уравнения (6) получим

$$\Delta W / W_c = (\alpha - \beta / V) \Delta E. \quad (7)$$

Перейдем к бесконечно малым путем замены $\Delta E = dE$, $\Delta W = dW$. После интегрирования (7) в пределах от W_0 до $W_{\text{пред}}$, от E_1 до E_2 , где E_1 – упругая деформация, необходимая для начала деформационного упрочнения, E_2 – конечная предельная деформация, до которой ведется деформирование, и при условии постоянства величин α , β , V получим полулогарифмическое уравнение

$$\ln(W_{\text{с.пред}} / W_0) = (\alpha - \beta / V)(E_1 - E_2) \quad (8)$$

или уравнение в виде экспоненциальной функции

$$W_{\text{с.пред}} = W_0 \exp[(\alpha - \beta / V)(E_1 - E_2)]. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) представляют собой разновидности общего феноменологического уравнения связи

энергоемкости деформируемого тела с термодинамическими и кинетическими параметрами процесса деформации, которые позволяют описать закономерности ее поведения.

Из анализа уравнений (8) и (9) следует, что величина предельной энергоемкости любого металла возрастает:

- с увеличением предельной деформации $\Delta E = E_1 - E_2$, т.е. с увеличением ресурса его пластичности;
- с возрастанием скорости деформации V (при $E_2 = \text{const}$);
- с ростом коэффициента α , зависящего от химического состава, морфологии структуры, т.е. от уровня внутреннего напряженного состояния сплава, складывающегося из уровня относительной твердости ($\Pi_{\text{сэс}} = \text{HB} / \sigma_T - 2$) [3], напряженно-деформированного состояния [$\exp(\alpha \Pi)$] по отношению к сдвигу (кручению), принимаемого за исходное состояние, при котором $\Pi = 0$, $\alpha = 1$. Величина α может быть выражена функцией

$$\alpha = (\text{HB} / \sigma_T - 2) \exp(\alpha \Pi) E_{\text{рх}}; \quad (10)$$

- с уменьшением коэффициента β , т.е. константы скорости релаксации внутренних напряжений $\dot{\epsilon}_{\text{рел}}$, (самоорганизации структуры), описываемой уравнением

$$\beta = \dot{\epsilon}_{\text{рел}} = \dot{\epsilon}_0 \exp(-1/m) = \dot{\epsilon}_0 \exp[-(U_0 - \sigma \gamma) / KT], \quad (11)$$

где T – температура, K – константа Больцмана, U_0 – начальная энергия активация (потенциальный барьер); γ – структурный фактор, равный произведению активационного объема на коэффициент перенапряжения металла в нем; σ – приложенное напряжение; m – показатель скоростного упрочнения;

- с уменьшением m , повышением U_0 , снижением KT ;
- с уменьшением активационного объема и коэффициента перенапряжения.

Знание величины W_c позволяет произвести расчеты новых комплексных энергетических критериев разрушения, предложенных в синергетике [6]: зарождения трещин, распространения трещин, хрупкости и масштаба.

Критерий зарождения трещин $K_{\text{зт}}$, количественно определяющий способность материала сопротивляться возникновению трещин при деформации, равен

$$K_{\text{зт}} = W_c / \sigma_T. \quad (12)$$

Чем выше значения $K_{\text{зт}}$, тем труднее зарождаются трещины.

Критерий распространения трещин $K_{\text{рт}}$, количественно определяющий способность материала сопротивляться

ляться свободному движению трещин при деформации в условиях достижения критического напряженного состояния, равен

$$K_{рт} = K_{1C} \sigma_T \text{ или } K_{рт} = W_{c\text{кр}} \sigma_T. \quad (13)$$

Чем выше $K_{рт}$, тем труднее в материале распространяются трещины.

Согласно данным работы [3], величина K_{1C} пропорциональна $W_{c\text{кр}}$, где $W_{c\text{кр}}$ – критическая величина предельной удельной энергии деформации перед вершиной трещины, определяется при критическом напряженном состоянии (трехосном растяжении), когда энергия деформации, затрачиваемая на пластическую деформацию, равна энергии, идущей на упругое искажение объема. Согласно анализу многочисленных экспериментальных данных [3], для сталей величина $W_{c\text{кр}} \approx (0,75 - 0,5)W_c$. Она выбирается в месте перегиба по диаграммам предельной пластичности при критическом напряженном состоянии, равном 2,41 при коэффициенте Пуассона сплавов железа 0,28. Размерность критерия $K_{рт}$ (МДж/м³)МПа или (МДж/м³)²·10⁶ или (МПа²)·10⁶.

Критерий хрупкости $K_{хр}$ количественно раскрывает понятие «хрупкость» по соотношению предыдущих критериев:

$$K_{хр} = K_{рт}^2 / (K_{зт} \sigma_T). \quad (14)$$

Чем выше $K_{хр}$, тем сильнее критерий распространения трещины превышает критерий зарождения трещин, тем лучше металл противостоит хрупкости. $K_{хр}$ имеет размерность МПа³ или (МДж/м³)³·10⁻⁶.

Критерий масштаба K_m (величина безразмерная) учитывает влияние размера детали по отношению к размеру образца, оценивает чувствительность материала к масштабу изделия по соотношению упругих констант (e_{xx} – упругие константы) материала к комплексу хрупкости ($K_{хр}$)

$$K_m = e_{xx} / K_{хр}, \quad (15)$$

где $e_{xx} = EW_{c\text{кр}}^2 / (1 + \nu)(1 - 2\nu) = E(K_{1p})^2 / (1 + \mu)(1 - 2\mu)$, E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала, соответственно.

Чем выше критерий K_m , тем лучше материал противостоит увеличению масштаба заготовки или размеру детали. Поскольку упругие модули E и ν считаются структурно нечувствительными величинами, то для практических расчетов для всех сталей их можно принимать равными $E = 210 \cdot 10^9$ Па, $\nu = 0,28$, а величина $W_{c\text{кр}}^2$ вычисляется в зависимости от исходной пластичности из соотношения $W_{c\text{кр}} \approx (0,75 - 0,2)W_c$. Величина $W_{c\text{кр}}$ определяется технологической дефектностью [7] и может уточняться повторными расчетами и экспериментами. Она определяет уровни новых синергетических критериев разрушения и работоспособности изделий, роль которых, например в изнашивании, при оценках штампуемости является одной из новых задач их применения.

Пример. Установим количественные зависимости критериев разрушения сталей 20Х, 20ХН, 20ХНР, 20ХГНР с 0,2 % углерода со степенью ее легирования хромом.

Образцы в виде прутков диаметром 15 мм были подвергнуты термообработке по следующему режиму: закалка от 760 – 830 °С с охлаждением в масле; отпуск при 180 – 200 °С с охлаждением в масле. Затем образцы подвергались испытанию на растяжение по ГОСТ 1497-98, в результате которого были получены механические свойства. По ним в дальнейшем были рассчитаны критерии разрушения: $K_{зт}$; $K_{рт}$; $K_{хр}$ по ранее приведенным формулам. Результаты расчетов приведены в таблице.

Из данных таблицы видно, что с повышением легирования стали хромом при одинаковом содержании 0,2 % углерода, значения критериев разрушения возрастают. Критерий хрупкости стали 20ХГНР против стали 20Х повысился в 8,25 раза; критерий распространения трещин – в 4,4 раза; критерий зарождения – в 1,5 раза; энергоемкость возросла в 3 раза. Все это означает повышение работоспособности стали. Такая количественная оценка работоспособности сталей по противостоянию процессу разрушения по новым критериям синергетики дана впервые, поскольку по механическим свойствам такие оценки сделать невозможно.

Выводы. Получено общее феноменологическое уравнение связи энергоемкости с четырьмя основными параметрами состояния поликристаллов: твердостью, соотношением скоростей релаксации и нагрузки, дефектности и показателями напряженно-деформиро-

Значения механических свойств и критериев разрушения сталей 20Х, 20ХН, 20ХНР, 20ХГНР

Сталь	Сечение, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	ψ , %	W_c , МДж/м ³	$K_{зт}$	$K_{рт} \cdot 10^{-6}$ (МДж/м ³) ²	$K_{хр} \cdot 10^{-9}$ (МДж/м ³) ³
20Х	15	640	780	40	436	0,68	0,14	0,04
20ХН	15	590	780	50	613	1,04	0,18	0,05
20ХНР	15	980	1180	50	1019	1,04	0,50	0,24
20ХГНР	15	1080	1270	50	1123	1,04	0,61	0,33

ванного состояния, а также с кинетическими, физическими и активационными параметрами.

Знание величины энергоемкости позволяет производить расчеты новых энергетических критериев разрушения синергетики при произвольных сочетаниях силовых, временных, дефектных факторов и напряженно-деформированных состояниях, которые даны в работе [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скуднов В.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 4. С. 25 – 28.
2. Скуднов В.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1994 № 8. С. 42 – 44.

3. Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов. – М.: Металлургия. 1989. – 187 с.
4. Жильмо Л. Характеристика свойств конструкционных сталей работой предельной деформации// Современные проблемы металлургии: Сб. научн. тр. ИМЕТ. – М.: АН СССР, 1957. С. 572 – 582.
5. Скуднов В.А. Синергетика явлений и процессов в металлургии, упрочняющих технологиях разрушения: Учеб. пособие – Нижний Новгород: НГТУ, 2011. – 198 с.
6. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 160 с.
7. Скуднов В.А., Богашов Ф.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1986. № 8. С. 48 – 53.

© 2013 г. В.А. Скуднов
Поступила 13 марта 2012 г.

УДК 669.14-154:669.0.94.3

Б.Н. Окорочков

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕННОГО ПРИНЦИПА ЛЕ-ШАТЕЛЬЕ-БРАУНА К ПРОЦЕССУ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЕ. ЧАСТЬ I. СТОХАСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГАРМОНИЧЕСКОГО РЯДА КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА И ПРИЧИНЫ ЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Аннотация. Установлена возможность оценивать степень аритмии процесса окисления углерода и вероятность возникновения выбросов количественно по дисперсии колебаний переменной составляющей скорости окисления углерода (ΔV_C) в период его интенсивного окисления. В этот период ΔV_C может рассматриваться как случайный слабоэргодический процесс. Такой подход позволил исследовать частотный ряд колебаний случайной составляющей ΔV_C . Он представляет собой практически непрерывную последовательность частот (от kHz/с до kHz/мин), обусловленных структурными составляющими самого технологического процесса.

EXPANDED LE-SHATELLIE-BROWN PRINCIPLE APPLICATION TO CARBON OXIDATION PROCESS IN LD BATH PART I. THE STOCHASTIC STRUCTURE OF THE HARMONIC SERIES OF OSCILLATIONS VARIABLE COMPONENT OF CARBON OXIDATION AND CAUSES ITS OCCURRENCE

Abstract. The possibility was identified to quantify the degree of V_C arrhythmia and converter emissions probability based on the dispersion of variable component of the velocity of carbon oxidation fluctuations (hereinafter ΔV_C) during the period of its intensive oxidation. During the period of carbon intensive oxidation, ΔV_C can be viewed as weakly ergodic random sub-process. This approach allowed for studying of the ΔV_C oscillations frequency range. This range represents practically continuous sequence of frequencies (from kHz/sec to kHz/min), which sequence is determined by structural components of oxygen furnace process.

Главенствующая роль реакции окисления углерода в сталеплавильных процессах металлургами подчеркивалась всегда, и ей уделялось основное внимание. Это вполне справедливо, так как она обладает целым рядом уникальных свойств. Она единственная имеет газообразные продукты окисления и поэтому они покидают взаимодействующие фазы, не накапливаясь в системе. Это в свою очередь гарантирует реакцию от возможного насыщения и затухания до практически полного исчезновения углерода

в системе. Наконец, газообразные продукты реакции, покидая взаимодействующие фазы, их перемешивают и ускоряют сами процессы взаимодействия. Налицо процесс с положительной обратной связью, что должно порождать неустойчивость и колебательность процесса.

Поэтому уточнение понимания природы этого явления и установление технологических факторов, определяющих его динамику, являются естественным предметом данной работы.