

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ПРЕДЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Синергизм – это явление, характеризующееся тем, что суммарный эффект воздействия каких-либо факторов на объект или систему больше суммы эффектов воздействия каждого взятого из них в отдельности. Все процессы в поликристаллах, металлических сплавов различных химических составов (деформация, разрушение, упрочнение, коррозия и т.д.) относятся к таким явлениям. Точно также все технологические процессы, основанные на деформируемости (штампуемость, ковкость, прессуемость, обрабатываемость резанием и т.д.), фазовых и структурных превращениях при термических (отжиг, нормализация, закалка, старение, отпуск и др.), химико-термических (цементация, азотирование и др.) и комбинированных (ТЦО, ТМО, электропластическая и др.) обработках с применением энергий (тепловой, электрической, магнитной, электромагнитной, химической и др.), обладают явлением синергизма. Поведение поликристалла при механических испытаниях проявляет все признаки синергизма, так как без пластической деформации разрушение невозможно. Таким образом, во всех случаях поведение материала как технологической системы, имеющей различную степень исходной поврежденности, сопровождается локальной и глобальной адаптацией структуры, т.е. образованием неустойчивостей и распадом упорядоченных временных и пространственных структур при соответствующих температурно-скоростных, силовых и других условиях воздействия. Мир металла представляет собой активную связанную систему в виде иерархии уровней: электронной, нано-, микро-, мезо-, макроструктур. Различие уровней состоит в том, что квантовые электродинамические состояния на электронном уровне обеспечивают сопряжение при сохранении симметрии без концентрации напряжений (электронный клей), самоорганизацию структур без разрушения. На всех вышестоящих уровнях сопряжения обязательно сопровождаются искажениями симметрии и локальной концентрацией напряжений. Поэтому основной синергетической характеристикой поликристаллов следует считать его общую энергоемкость W_c , [МДж/м³], поведение которой на макроуровне, как показано ранее [1], зависит от основных четырех факторов: силового, временного, повреждающего (дефектности, пористости) и внешнего (нагрузки, создающей напряженно-деформированное состояние) и описывается [2] следующим уравнением

$$\ln (W_{c.пред}/W_0) = (\alpha - \beta/V) (E_1 - E_2), \quad (1)$$

или уравнением экспоненциального типа

$$W_{c, \text{ пред}} = W_0 \exp((\alpha - \beta/V)(E_1 - E_2)). \quad (2)$$

Из анализа уравнений (1) и (2) следует, что величина предельной удельной энергии деформации возрастает;

- с увеличением предельной деформации $\Delta E = E_1 - E_2$ металла, 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, в общем от уровня внутреннего напряженного состояния сплава, состоящего из уровня относительной твердости ($\Pi_{\text{сэс}} = HB/\sigma_T - 2$), напряженно-деформированного состояния ($\exp(\alpha\Pi)$) по отношению к сдвигу при кручении (исходное состояние, при котором $\Pi = 0$, $\alpha = 1$); величина α может быть выражена функцией

$$\alpha = (HB/\sigma_T - 2) \exp(\alpha\Pi) E_{\text{рх}}; \quad (3)$$

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

$$\beta = \dot{\epsilon}_{\text{рел}} = \dot{\epsilon}_0 \exp(-1/m) = \dot{\epsilon}_0 \exp(-(U_0 - \sigma\gamma)/kT), \quad (4)$$

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

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

При частных нагрузки энергоемкость приобретает частные предельные значения. Например, при испытаниях образцов на растяжение по ГОСТ 1497 величина $W_{c \text{ on}}$ рассчитывается по формуле

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

где σ_T – предел текучести; σ_K – сопротивление разрушению; $\epsilon^{\text{пред}}$ (или Ψ или δ) – истинная предельная деформация при растяжении, равная $\epsilon^{\text{пред}} = \ln(1/(1 - \psi))$, (ψ – относительное сужение) или $\epsilon^{\text{пред}} = \ln(1 + \delta)$, δ – относительное удлинение (без учета деформации в шейке). С учетом вышеизложенного на рис. 1 представлена модель синергетической связи энергоемкости металла (расположена в центре) с его предельными механическими характеристиками (слева), диаграммой структурно-энергетического состояния материалов в координатах «энергоемкость- твердость» (вверху), новыми критериями разрушения синергетики (справа) и факторами работоспособности (износостойкости, усталости, коррозионной стойкости и т.д.). С уменьшением σ_T , увеличением σ_K и $\epsilon^{\text{пред}}$ штампуемость повышается

В синергетической модели большая роль отводится самостоятельной оценке процесса разрушения с помощью новых критериев синергетики [2]: критериев зарождения $K_{\text{зт}} = W_c/\sigma_T$, трещин (отражает накопление дефектов),

распространения трещин (прочность) $K_{рт} = W_{скр} \sigma_T$, хрупкости (соотношение прочности и поврежденности) $K_{хр} = K_{рт}^2 / (K_{зт} \sigma_T)$, масштаба $K_M = e_{xx} / K_{хр}$, где $e_{xx} = E W_{скр}^2 / (1 + \mu)(1 - 2\mu)$, E – модуль упругости, так как первичные предельные механические характеристики нагруженных материалов не остаются неизменными. Уровень и особенно соотношение критериев распространения зарождения трещин определяет скорость разрушения и аварийность изделий: чем выше уровень критериев, тем лучше материал, чем выше соотношение $K_{рт} / K_{зт}$, тем выше скорость разрушения.

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ПРЕДЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С КРИТЕРИЯМИ РАЗРУШЕНИЯ

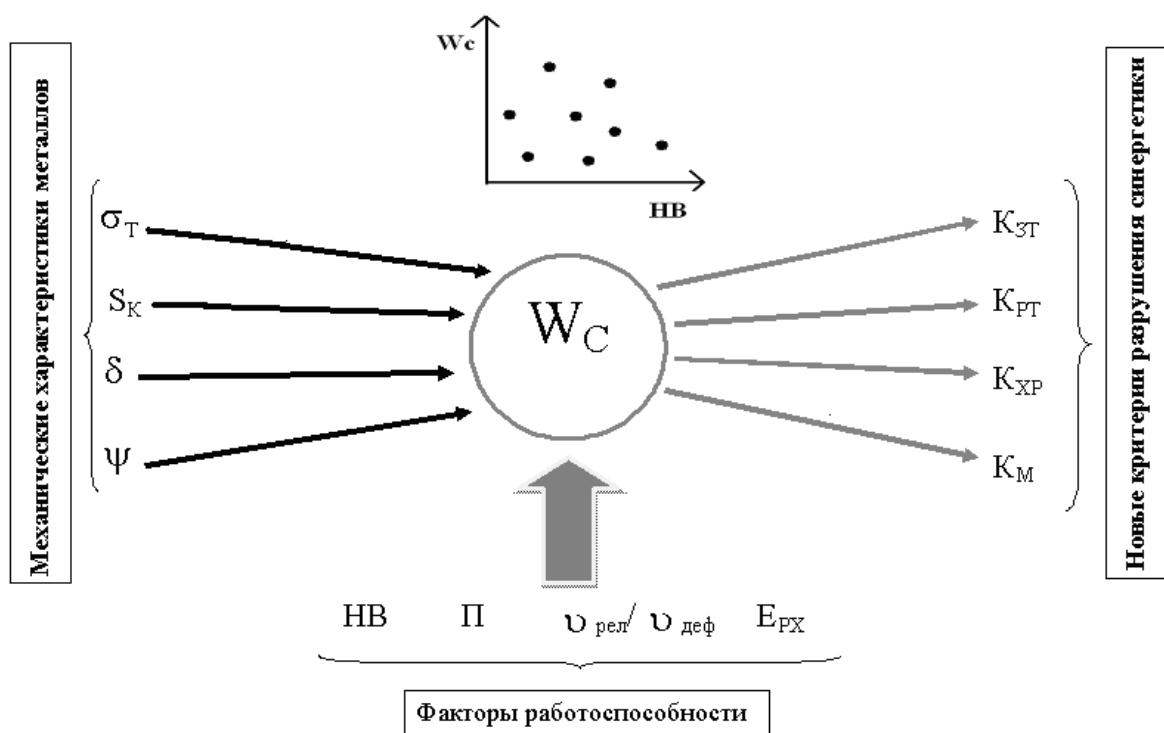


Рис. 1. Взаимосвязь энергоемкости с исходными механическими свойствами и критериями разрушения и факторами работоспособности материалов

Действительно, сопротивление структуры разрушению нагруженного (деформируемого) поликристалла носит синергетический характер (рис. 2) и характеризуется тремя фазами: кристаллической, квазиаморфной, дефектной (поврежденной микротрещинами), которые контролирует поведение и разрушение металлов: кристаллическая фаза 1 – контролирует, сопротивление деформации величиной предела текучести σ_T ; квазиаморфная фаза 2 контролирует сопротивление деформации в полосах скольжения с наличием дислокаций и микротрещин с вязкими зонами (фаза 3) для хрупких до пластичных тел величиной энергоемкости $W_{скр}^{кр} = (0,1 - 0,75) W_c$; дефектная фаза 4 – микротрещины, с размерами и формой зон перед трещи-

ной, в которых сопротивление распространению трещины контролируется величинами K_{IC} , $W_c^{кр}$ перед трещиной по теории Гриффитса и критериями вязкости разрушения.

Явление разрушения очень сложно, многостадийно и многомасштабно, определяется числом возможных имеющих слабые места, критической концентрацией растягивающих напряжений, снижающей общую предельную деформацию до разрушения, и релаксационной способностью, способной или не способной самостоятельно организовать аккомодацию (приспособление) уровня максимальных напряжений. Суперпозиция этих трех процессов не позволяет выявлять аварийно состояние по одной причине. Они переигрываются. В работе [3] важнейшей особенностью областей деформируемого твердого тела, в которых возникают области повреждения, является то, что именно в этих областях происходят наиболее интенсивные процессы пластического течения, предопределяющие локальное разрушение материала. Характерные размеры области, в которой возникают поврежденные состояния при увеличении допускаемых напряжений до $(0,7-0,8) \sigma_T$, могут быть соизмеримы с размерами исходного дефекта или быть больше этого размера.

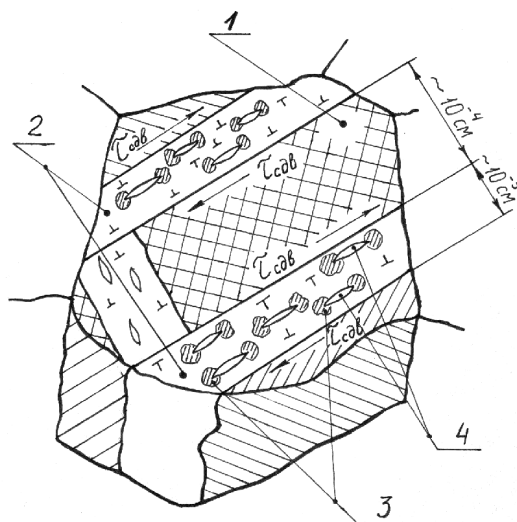


Рис. 2. Наличие трех фаз в деформированном зерне поликристалла

Таким образом, образованию трещины в данном объеме материала (разрушению данного объема) предшествуют весьма сложные процессы преобразования структуры материала, протекающие на всех уровнях. Классическое зарождение трещины происходит на микроуровне в объеме с характерными размерами $10^{-5}-10^{-3}$ см и описывается физикой материалов, а развитие макроскопической трещины в конструкции и экспериментальное изучение закономерностей этого развития с позиции механики разрушения происходит на макроуровне в объеме материала с характерными размерами порядка 0,1–10 см. Процесс накопления рассеянных по объему материала повреждений происходит в объемах материала с характерными раз-

мерами порядка 10–0,1 см (мезоуровень) и описывается механикой поврежденной среды, являющейся связующим звеном между физическими процессами на микроуровне и процессами распространения макроскопической трещины на макроуровне в конструктивном элементе геометрического объекта.

На основании изложенного связь относительной скорости разрушения с относительной энергоемкостью материалов можно представить в виде графика $n_{\text{отн}} = \varphi(\psi)$, представленного на рис. 3, имеющего спадающий характер от 1,0 (соответствует разрушению хрупкого кристалла) до нуля, соответствующему поведению сверхпластичного материала.

В экспериментах показано, что при определенных температурно-скоростных условиях и размерах зерен 1–10 мкм сверхпластичные материалы проявляют одновременно три механизма пластической деформации: множественное скольжение дислокаций, проскальзывание по границам зерен и диффузионный массоперенос, совокупность которых обеспечивают высокую скорость релаксации внутренних напряжений в местах их концентрации. Благодаря этому зерна получают возможность изменять число соседних зерен, шейка при растяжении образцов становится «бегающей» по образцу, обеспечивая очень большое относительное удлинение. При такой сверхпластической деформации обнаружено снижение плотности материала за счет образования пор, суб-, микро-, макротрещин как при обычной пластической деформации. Однако такие трещины из-за высокой релаксационной способности структуры не распространяются. Образец с резьбой на сверхпластичном материале ведет себя так, что резьба на образце вытягивается в ровную цилиндрическую поверхность и, в конечном итоге, исчезает, а место разрушения на образце превращается в иглу. Это означает, что предельная деформация до разрушения стремится к бесконечности, сопротивление разрушению приближается к нулю, скорость разрушения, оцениваемая по скорости распространения трещин, стремится к нулю, что и соответствует нижним точкам графика на рис. 3.

Если считать, что зарождение трещин является следствием накопления в искаженной структуре поликристаллов дефектов разного масштаба, а распространение трещины является истинным процессом его разрушения, приводящим к распаду тела на части, то относительная скорость разрушения различных материалов в упруго напряженном состоянии определяется соотношением критериев синергетики: распространения и зарождения трещин, в целом энергоемкостью металла.

Таким образом, применение описанных принципов и критериев разрушения синергетики открывают новые пути в улучшении структур, повышении качества, работоспособности и вообще предельного состояния изделий техники за счет оптимизации различных видов и режимов термической обработки и их комплексных технологий. Приводятся примеры применения синергетической модели для выбора и режима термообработ-

ки погона поворотного устройства из стали 5ХНМ среди марок 5ХНМ, 5ХГМ, 5Х2МНФ, 4Х5В2ФС, 4Х4ВМФС, 5ХНВ, 4ХМФС, 3Х3М3Ф, 4Х2В5МФ, 3Х2В8Ф, 4Х2В2МФС, 5Х3В3МФС, 4ХС, 4ХВ2С; для оценки штампуемости 10 партий листовой стали 08Ю ОСВ [2], оптимизации технологии производства пружинной проволоки диаметром от 2,7 до 5,5 из сталей 68А, 65ГА, 51ХФА, 70ХГФА по ГОСТ 1071 [2]. Показаны: 1) более объективная оценка структурно-энергетического состояния (стали 5ХНМ), 2) связь исходных значений относительных удлинения и сужения с энергоемкостью, критериями разрушения и процентом брака при штамповке деталей кузовов листовой стали 10 партий (при оценке штампуемости только по удлинению по ГОСТ, процент брака большой, при оценке по сужению и критериям синергетики брак отсутствует), 3) установлена оптимальная технология производства пружинной проволоки по критерию зарождения трещин.

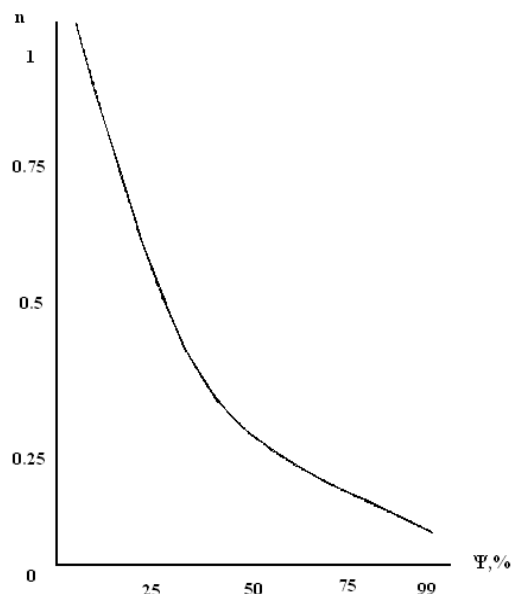


Рис. 3. Зависимость относительной скорости разрушения поликристаллов $n = v_{\text{РАЗР}}/v_{\text{упр. волн}}$ (относительно скорости распространения упругих волн в абсолютно хрупком теле) в зависимости от относительного сужения образца при растяжении, ψ , %: для абсолютно хрупких тел: $n_{\text{отн}} \approx 1$; $\delta = \psi \approx 0$; для хрупких тел: $n_{\text{отн}} \approx 0,95-0,8$; $\delta = \psi \approx 1$ %; для квазихрупких тел: $n_{\text{отн}} \approx 0,8-0,6$; $\delta = \psi \approx (1,0-12,0)$ %; для среднепластичных тел: $n_{\text{отн}} \approx 0,6-0,5$; $\delta \geq 10-20$ %, $\psi \approx (12,0-49,0)$ %; для высокопластичных тел: $n_{\text{отн}} \approx 0,5-0,1$; $\delta \geq 10-20$ %, $\psi \approx (50,0-90,0)$ %; для сверхпластичных тел: $n_{\text{отн}} \approx 0,1-0,01$; $\delta \geq 400-10\,000$ %, $\psi \approx (50,0-90,0)$ %

Список использованных источников

1. *Скуднов В.А.* Предельные пластические деформации металлов. М.: Металлургия, 1989. 176 с.
2. *Скуднов В.А.* Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях разрушения : учеб. пособие. Нижний Новгород: НГТУ, 2011. 198 с.
3. *Митенков Ф.М.* Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких [и др.]; под общ. ред. Ф.М. Митенкова. М.: Машиностроение, 2007. 448 с.