

Погодаев Л. И., Цветков Ю. Н., Зайцев И. Г.

Моделирование процессов динамического деформирования и эрозии неоднородных материалов на основе структурно-энергетического подхода

*Посвящается светлой памяти проф. Ю. Т. Борщевского –
- выдающегося ученого-гидромеханика XX века (1925-1995)*

Содержание

1	Модели поведения сред при импульсном нагружении.	1
2	Исходные уравнения изнашивания.	7
3	Критическая скорость удара при изнашивании материалов.	15
4	Критическая плотность потока энергии деформации.	24
	Заключение	34
	Литература	35

1. Модели поведения сред при импульсном нагружении.*

Кавитационная, гидроабразивная и ударно-абразивная эрозия материалов сопровождается процессами тепло- и массопереноса в динамически деформируемых объемах со скоростью относительной деформации $10^2 \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$. Потоки вещества возникают под действием тепловых флуктуации (возбуждений) и внутренней энергии плотностью, достаточной для возникновения спонтанных переходов между различными уровнями многомасштабной диссипативной структуры (рис. 1 б, в). Существует мнение [1], что указанные переходы происходят между различными типами ротационных структур, состоящих из фрагментов мезоскопического уровня $0,1 \dots 2,0 \text{ мкм}$ (рис. 1 б). При этом процессы на мезоуровне оказывают влияние на субструктурный и макроуровень перемещения пластических деформаций. Глубина зоны, где происходят ротации, может существенно превышать глубину наклепанного слоя; при кавитационной эрозии металлических материалов, например, в $4 \dots 6$ раз (рис. 1 а-в). В разрушении материалов при

ударном нагружении могут участвовать одновременно различные масштабные уровни. Например, при откольном разрушении сталей зона разрушения указывает на комбинацию сдвигового разрушения мезо- и субструктурного уровня и нормального отрыва (макроскопического масштаба) (рис. 1 г, д).

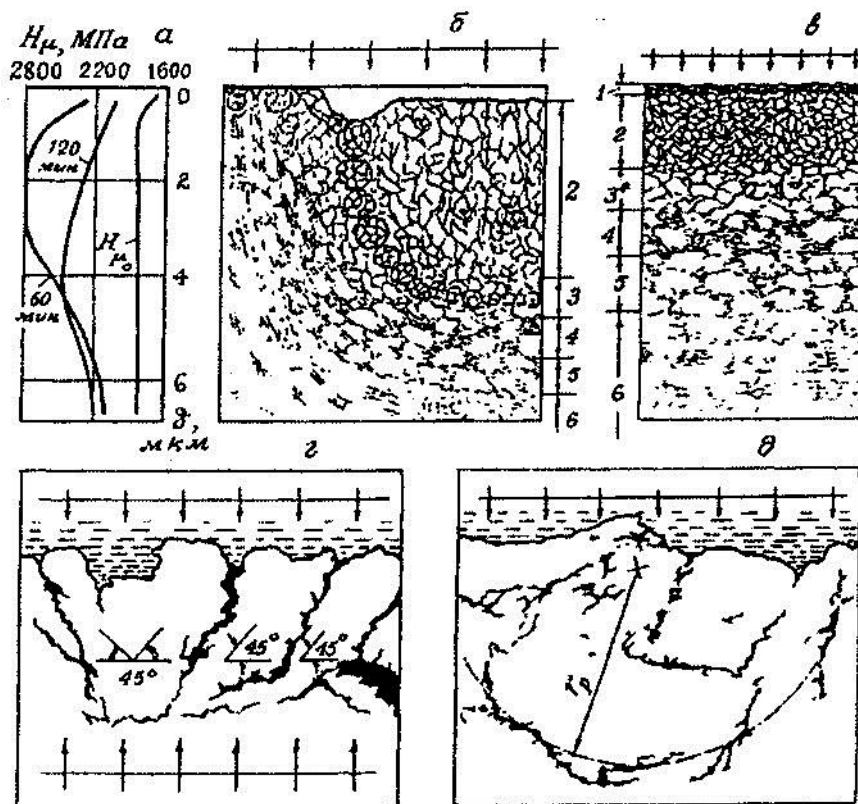


Рис. 1. Микроструктура металлов и характер трещинообразования. Изменение микротвердости по глубине алюминиевого сплава (а), имеющего структуру (б) в начале микроударного воздействия и (в) - после многократного деформирования: 1 - слой вторичных структур; 2 - мелкочаеистая фрагментированная (турбулентная) структура; 3 - структура с неравноосными ячейками и с ротационными шнурами (3); 4 - шашечная структура; 5 - полосовая структура; 6 - клубковая и мультипольная структура; г - трещины на водоохлаждаемой поверхности цилиндровой втулки из стали 38ХМЮА двигателя 6Д-50М после 2000 ч. эксплуатации; д - микротрещины в поверхностном слое образца из стали 25Х15НГМФ после испытания на ударно-эрозионном стенде.

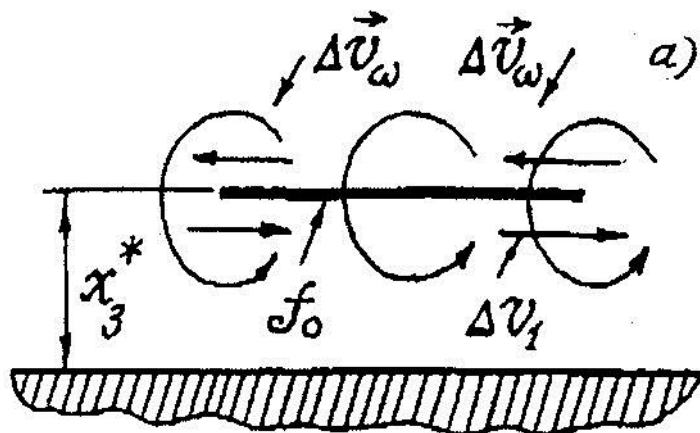


Рис. 2. Схема переноса вихревой площадки (площадки разрыва f_0) за счет воздействия соседних вихрей.

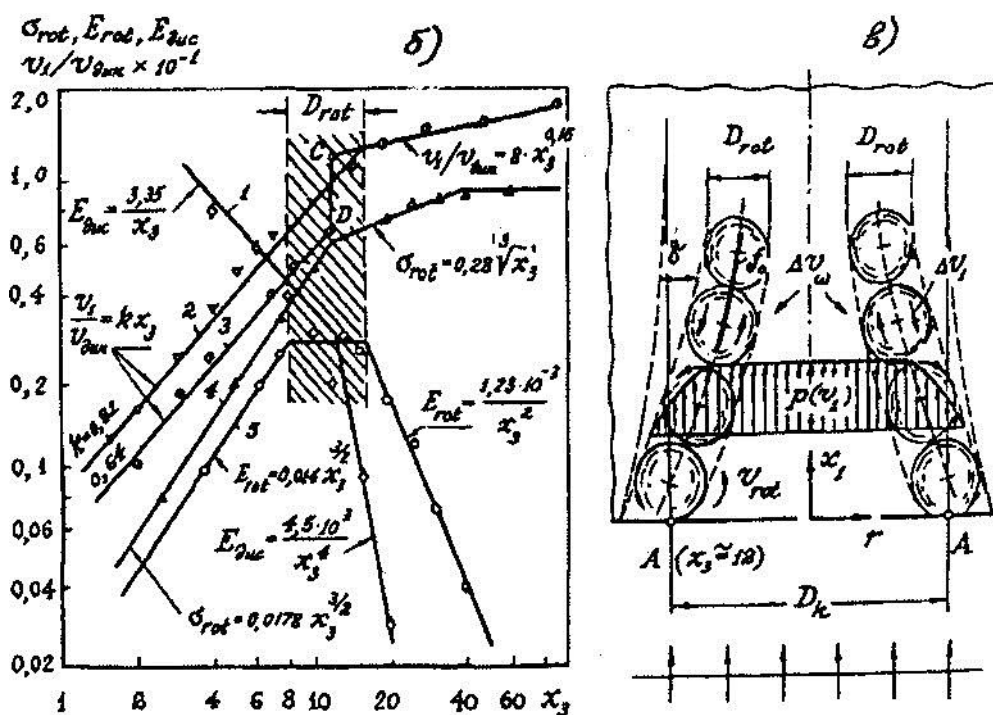


Рис. 3. Изменение основных параметров внешнего импульсного воздействия (б) по сечению деформируемого объема материала (в): 1 - характер диссипации энергии в зонах ротационной формации; 2, 3 - изменение относительной скорости деформации (2 - для осредненного поля скоростей, 3 - с разрывом CD в ротационном слое); 4, 5 - характер изменения внутренних напряжений и энергии деформации в зоне удара соответственно [2].

Возбужденное состояние материала, когда наблюдается взаимодействие структур различного уровня, принято рассматривать как среднее между кристаллическим и жидким. Важно отметить, что при этом наблюдается скачкообразное изменение свойств материалов, то есть переход, подобный фазовому превращению. Очевидно, что степень возбуждения материала в зоне воздействия динамического внешнего импульса будет убывать от центральной части этой зоны к периферии. В центральной части можно полагать возникновение гидродинамической деформации, а на периферии в переходной зоне - интенсивную ротационную упругопластическую деформацию, аналогичную структуре вихреобразования в пристеночном слое при течении жидкости (рис. 2 а).

Особенности диссипации энергии при ротационных механизмах деформации материалов - использование уравнений механики жидкости для описания особенностей ротационной (турбулентной) структуры в металлических материалах, а также интенсивности внешнего импульсного воздействия перспективно по двум обстоятельствам. Во-первых, из-за близости физической картины и масштабов диссипации энергии в пристеночном слое жидкости и в объемах твердых материалов, где происходит диссипация энергии микроударного нагружения путем ротаций. Во-вторых, из-за случайного характера процесса энергетического обмена между ядром потока жидкости и ламинарным подслоем в виде струйных выбросов жидкости от стенки, аналогичного характеру стохастических внешних воздействий на поверхность деталей при гидродинамической смазке, граничном трении, кавитационной и капельной эрозии и других видах фрикционного взаимодействия различных сред. Используя эти аналогии, представляется возможным расширить существующие представления о поведении металлических материалов в зонах динамического нагружения и смоделировать кинетические особенности внешнего нагружения при различных видах изнашивания материалов [1, 4, 17 и др.].

Используя кинематическую аналогию, более подробную информацию о процессах, происходящих при импульсных внешних воздействиях на твердые материалы в зоне ротационной неустойчивости (область «закона стенки» для потока жидкости), получим поля квазимгновенных скоростей в зонах сильного взаимодействия, которые можно представить в виде совокупности вихревых площадок (рис. 2). Любую вихревую площадку в пределах ротационного слоя будем рассматривать как площадку разрыва горизонтальных

составляющих скорости. На рис. 2 скорость $2\Delta v_1$ - это тангенциальный разрыв продольной скорости жидкости на рассматриваемой площадке f_0 . Продольная скорость v_1 будет состоять из v_1 и добавочной скорости $v_{1\omega}$, возникающей на площадке f_0 от кооперативного действия вихрей, расположенных над соседними площадками.

При линейном изменении скорости v_1 в слое толщиной $x_3^*(\delta)$ для Δv_1 окажется справедливым

$$\Delta v_1(x_3^*) = v_1 - v_{1\omega} = kx_3^* - \Delta v_{1\omega}(x_3^*). \quad (1^*)$$

Зону ротационной неустойчивости деформации в твердых материалах представим как суперпозицию вихревых площадок, перемещающихся по ламинарному подслою за счет перекачивания и проскальзывания вихрей. Вследствие различной интенсивности и разнонаправленного вращения вихрей, между ними происходят взаимодействия, приводящие к локальной турбулизации ламинарного подслоя (явление первичной турбулентности).

Профиль осредненной продольной скорости [1] приведен на рис. 3 б (кривая 2). Здесь же теоретические зависимости (сплошные линии) сопоставлены с опытными точками, полученными П. С. Клебановым [2]. В интервале $x_3 = 0-12$ имеет место линейный рост скорости

$$\frac{v_1}{v_{\text{дин}}} = \text{const}_5 x_3, \quad (2^*)$$

где $\text{const}_5 = 0,82$ (для потока жидкости).

За пределами ротационной зоны ($x_3 > 12$) изменение продольной скорости незначительно, поскольку

$$\frac{v_1}{v_{\text{дин}}} = 8,0 x_3^{0,16}. \quad (3^*)$$

Для случая сильного микроудара профиль скорости может иметь разрыв в ротационной зоне (кривая 3, рис. 3 б). При этом скорость на площадке разрыва скачкообразно возрастает примерно в 2,7 раза. В ламинарном подслое скорость изменяется в соответствии с формулой (2*) при $\text{const}_5 = 0,64$, а после разрыва - в соответствии с (3*).

По соотношениям (1^{*}-3^{*}) были построены важные зависимости (рис. 3 б), характеризующие особенности диссипации внешней энергии (1), изменение напряжений (4) и энергии деформации (5) в циклически нагружаемом объеме материала [1, 2].

Характер изменения зависимости $E_{\text{дис}}(x_3)$ (рис. 3 б) указывает на то, что большая часть энергии, введенной в деформируемый объем материала, рассеивается в виде тепловых потоков в зоне ротационных образований и за их пределами с внешней стороны рассматриваемого объема.

В центральной части деформированного объема диссипация энергии незначительна и заканчивается при $x_3 \cong 20$, быстро убывая по степенному закону обратно пропорционально x_3 . Сопоставляя кривые 1 и 5 между собой, нетрудно заметить, что зависимость $E_{\text{дис}}(x_3)$ можно получить интегрированием кривой 5, характеризующей изменение энергии деформации по координате x_3 . Перегиб зависимости 1 соответствует максимуму кривой 5 и происходит в центре ротационного слоя материала. Давление фронта волны деформации $p(v_1)$, перемещающейся вглубь материала, можно представить в результате сопоставления аппроксимирующих зависимостей (кривые 3 и 4; рис. 3 б при $x_3 \geq 10$) выражением

$$(v_1) = 4,38 \cdot 10^{-3} \frac{v_1}{v_2} = \frac{4,38 \cdot 10^{-2}}{\tau_0} p v_1^2 = \text{const}_6 p v_1 c, \quad (4^*)$$

где динамическая скорость $v_* = (\tau_0/p)^{1/2}$ (τ_0 - напряжение внутреннего трения на стенке $\sim$ напряжению сдвига); c - скорость волны деформации; $\text{const}_6 = 4,38 \cdot 10^{-3} v_1/\tau_0 c$.

Разрыв продольной скорости в ротационной зоне опасен с точки зрения возможности разрушения. В зависимости от структуры материала скачок скорости, достаточный для локального разрушения материала Δv_{kp} , должен быть пропорционален разности продольных скоростей в точках С и D (рис. 3 б). Согласно приведенной схеме (для потока жидкости) справедливо выражение

$$\Delta \left(\frac{v_1}{v_{\text{дин}}} \right)_{kp} = \left(\frac{v_1}{v_*} \right)_c - \left(\frac{v_1}{v_*} \right)_D = 8,0 x_3^{0,16} - 0,64 x_3, \quad (5^*)$$

где безразмерная координата x_3 является аналогом критерия Рейнольдса и характеризует структуру потока, сужающегося в предложенной модели по мере удаления от нагружаемой

поверхности соответственно разности $D_K - 25$ вследствие диссипации энергии микроударного импульса, переносимой в материале волнами деформаций.

Следует отметить, что численные коэффициенты в уравнениях (1*)-(5*) могут оказаться существенно иными при деформировании гетерогенных материалов, внутреннее трение и касательные напряжения которых представляются сложными функциями от микроструктурных параметров и температуры.

2. Исходные уравнения изнашивания.

В основе структурно-энергетического подхода при моделировании процессов изнашивания материалов лежит соотношение подведенной (внешней) энергии к ее плотности в деформируемом объеме материала в момент превращения последнего в продукты изнашивания. После учета кинетических особенностей изнашивания и расхода потока энергии, введенного в деформируемый объем, на механические, фазовые и тепловые составляющие, это соотношение может быть трансформировано в более подробную структурно-энергетическую модель изнашивания материалов.

Энергетический баланс при деформировании некоторого объема материала можно представить известным [3] соотношением

$$E_{\Sigma} = A_{\text{мех}} + Q_{\Sigma} = \Delta U_e + \Delta U_{\text{фe}} + \Delta U_{\text{фQ}} + \Delta U_T + \vec{Q} \quad (1)$$

где E_{Σ} - общая затраченная энергия; $A_{\text{мех}}$ - механическая составляющая энергии; Q_{Σ} — тепловая составляющая; ΔU_e и ΔU_T - потенциальная и тепловая кинетическая часть внутренней энергии соответственно; $\Delta U_{\text{фe}}$ - часть энергии фазовых превращений, изменяющая внутреннюю энергию материала; $\Delta U_{\text{фQ}}$ - необратимая (тепловая) часть энергии фазовых превращений в объеме материала V ; $\vec{Q}$ - часть поглощенной энергии деформации, рассеянная в виде тепла в окружающей среде.

На основании исходного соотношения и выражения (1) объемный износ материалов за фиксированный период времени можно представить в виде

$$\Delta V = \frac{(E_{\Sigma} - \Delta U_{\text{фQ}} - \vec{Q}) \cdot v_l}{(E_{\text{уд}}^* - E_{\text{уд0}}^*) \cdot v_{\text{кр}}} = \text{const}_2 \frac{E_{\Sigma} v_l}{(E_{\text{уд}}^* - E_{\text{уд0}}^*) \cdot v_{\text{кр}}} \quad (2)$$

где $\text{const}_2 = (\Delta U_e + \Delta U_{\text{фе}})/E_{\text{вн}}$; $E_{\text{уд}0}^*$ - внутренняя энергия материала в исходном состоянии.

В уравнении (2) опытная постоянная зависит от масштабов нагружения и структуры деформируемых материалов. Можно предполагать, что в зависимости от мощности деформирования она претерпевает ступенчатое изменение аналогично изменению энергии активации соответствующих элементарных процессов атомно-молекулярных перегруппировок.

Для детализации энергетических составляющих в соотношении (1) в связи со структурой материалов привлечем уравнения механики гетерогенных сплошных сред.

Уравнение энергии для сплошной среды, состоящей из двух взаимодействующих компонентов, обладающих различными упругими свойствами, в соответствии с работами [4, 13] имеет вид

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} v_j\right) \left(U_e + \frac{v^2}{2}\right)^i (\rho\theta)^i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(x\theta \frac{\partial T}{\partial x_j}\right)^i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\lambda + \mu)\theta v_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right]^i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\lambda + \mu)\theta v_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right]^i \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu\theta \frac{\partial u_j}{\partial x_j} v_i\right]^i + Q_*^{(i)} \quad (3)$$

где λ и μ - упругие постоянные; $U_e = c_p T$ - внутренняя энергия; c_p - изобарная теплоемкость; T - температура; v_j - компоненты вектора скорости v ; ρ - массовая плотность; $\theta^{(k)}$ - концентрация компонент; x - коэффициент теплопроводности; $Q_*^{(i)}$ - интенсивность внутренних источников (стоков) теплоты; u_j - компоненты вектора перемещения; повторяющиеся индексы i, j, k - означают суммирование; $k = 1$ - относится к характеристикам матрицы, а $k = 2$ к выделениям второй фазы.

Если в материале при деформировании происходят фазовые превращения интенсивностью

$$\frac{\partial(\rho\theta)^i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\theta v_j)^i}{\partial x_j} = \theta^{(3)}$$

где $\theta^{(3)}$ - количество новой фазы, то уравнение энергии 3 с учетом фазовых превращений примет вид

$$(\rho\theta)^i \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} v_j\right) \left(U_e + \frac{v^2}{2}\right)^i = (\rho\theta)^3 \left[\left(U_e + \frac{v^2}{2}\right)^1 - \left(U_e + \frac{v^2}{2}\right)^2\right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[x\theta \frac{\partial T}{\partial x_j} + \mu\theta v_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right]^i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\lambda + \mu)\theta v_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right]^i \delta_{ij} + Q_*^{(k)} \quad (4)$$

где энергия фазовых превращений представлена первым членом правой части уравнения.

Уравнение кинетической энергии деформирования гетерогенных материалов можно получить путем умножения в уравнении равновесия компонент структуры на скорость $v_i^{(t)}$ и последующего их суммирования. Запишем сначала уравнение равновесия фазы:

$$\rho\theta \left(\frac{\partial v_l}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_l}{\partial x_j} \right) = (\lambda + \mu)\theta \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} + \mu\theta \frac{\partial^2 v_l}{\partial x_j \partial x_i} + (-1)^l,$$

а затем уравнение кинетической энергии гетерогенного материала:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} v_j \right) \left(\frac{1}{2} \rho \theta v_l^2 \right)^l v_l^l \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\lambda + \mu)\theta \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right]^l \delta_{ij} + v_l^l \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu\theta \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \right)^l + 0(r_i) \quad (5)$$

где δ_{ij} - символ Кронекера; r_i - силы взаимодействия фаз; $v_j = \partial u_j / \partial t$; $i, j = 1, 2, 3$.

Если учесть, что общая энергия, затраченная на деформирование материала, включает кинетическую и тепловую составляющие, то вычитая (3) из (2), получим уравнение сохранения тепловой энергии в виде

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} v_j \right) (\rho \theta v_e)^l = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(x \theta \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)^l + \left[(\lambda + \mu)\theta \frac{\partial^2 u_l}{\partial t \partial x_j} \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{1}{2} \mu\theta \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right]^{(l)} + Q_e^{(n)} \quad (6)$$

В уравнении (6) составляющие, выделенные квадратными скобками, характеризуют собой энергию микродеформаций сжатия и сдвига ΔU_e . На основании (1) нетрудно записать уравнение баланса теплоты для основы двухфазного материала

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} v_j \right) (\rho \theta c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(x \theta \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \Delta U_{cf} + \frac{1}{2} \left[(\lambda + \mu)\theta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 + \mu\theta \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где $\Delta U_{cf} = k_T(T^{(1)} - T^{(2)})$ — энергия теплообмена между основой и выделениями

второй фазы; k_T - коэффициент теплопередачи; $T^{(1)}$ и $T^{(2)}$ - температура основы материала и второй фазы соответственно.

Интегрируя выражение (7) по времени, получим

$$\rho\theta c_p(T - T_0)t + \int_{t_1}^{t_2} \Delta Q_\Phi(t)dt = Q_* + \theta \left[(\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 + \mu \sum_{i,j=1}^3 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right] , \quad (8)$$

где $Q_* = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(x \frac{\partial(T-T_0)}{\partial x_j} \right) \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \frac{\partial}{\partial T} (\lambda + \mu) + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right] \frac{d\mu}{dT} \right\} dT + Q_k + Q_M$ - функция, характеризующая интенсивность конвективного переноса теплоты в деформируемых объемах материала Q_k и удельную теплоту, расходуемую на изменение упругих свойств материала Q_M при повышении температуры от T_0 до T ; $\Delta Q_\Phi(t)$ - кинетическая функция интенсивности тепловых эффектов фазовых превращений.

Левая часть уравнения (8) представляет собой полную удельную тепловую энергию гетерогенного материала, а произведения модулей упругости $(\lambda + \mu)$ и μ на перемещения u_j^2 в правой части характеризуют соответственно энергию микродеформаций сжатия и сдвига.

Из сопоставления уравнения теплоты (8) с соотношением баланса энергии (1) следует:

$$\Delta U_T + \Delta U_{\Phi Q} + \vec{Q} = \left(\rho\theta c_p \Delta T_t + \int_{t_1}^{t_2} \Delta Q_\Phi(t)dt + Q_k + Q_M \right) V_{\text{деф}} = Q_\Sigma ; \quad (9)$$

$$\Delta U_e + \Delta U_{\Phi e} = \left\{ \theta \left[(\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 + \mu \sum_{i,j=1}^3 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right] + \Delta U_{\Phi e} \right\} V_{\text{деф}} = A_{\text{мех}} \quad (10)$$

Уравнения (8)-(10) указывают на возможность преобразования их в уравнения для оценки износостойкости и долговечности одно- и многофазных материалов, а также на возможность использования в качестве критериев разрушения как предельных теплофизических характеристик, например, скрытой теплоты плавления [5, 6], так и совокупности эквивалентных им механических свойств, представленных после несложных преобразований в виде критической плотности мощности деформации материалов в объеме $V_{\text{деф}}$.

К моменту превращения деформируемого объема $V_{\text{деф}}$ в продукты изнашивания на основании (9) можно записать для $V_{\text{изн}}$ частное выражение

$$V_{\text{изн}} = \frac{[Q_\Sigma - (Q_k + \int_{t_1}^{t_2} \Delta Q_\Phi(t)dt) V_{\text{деф}}] v_1}{(\rho\theta c_p \Delta T_t)_{\text{кр}} v_{\text{кр}}} , \quad (11)$$

где числитель представляет собой поток тепловой энергии, повышающий температуру материала и разупрочняющий деформируемый объем; знаменатель содержит критическую плотность потока тепловой энергии, при которой материал переходит в псевдожидкое состояние, поэтому выражение в скобках можно трансформировать, например, в

произведение универсального теплоэнергетического параметра q на относительное значение элементарного активируемого объема V_3 , то есть на энергию активации

$$\Delta U_i = qV_3. \quad (12)$$

Параметр q К. А. Осиповым [6] предложено определять по формуле

$$q = -\left(\int_0^{T_s} c_p dT - T_s \int_0^{T_s} \frac{c_p}{T} dT\right), \quad (13)$$

где T_s - температура плавления материала; T - текущее значение температуры.

Активируемый объем V_3 , пропорциональный числу атомов, содержащихся в нем, отражает дискретную природу потенциальных барьеров и существование спектра энергий активации элементарных процессов атомно-молекулярных перегруппировок. Если для энергии активации образования вакансий значение V_3 принять за единицу, то согласно опытным данным, обобщенным в работах [6, 7 и др.], при объемной самодиффузии и сублимации значение q составит соответственно 2,4 и 3,6.

Последнее обстоятельство указывает на то, что критерий износостойкости материалов должен быть связан с удельной энергией, соответствующей выражению (12), востребованной из спектра энергий активации конкретными условиями изнашивания. Очевидно, что для повышения точности оценки износа по выражению (11) необходим также учет равномерности распределения внутренней энергии в изнашиваемых объемах и, следовательно, - степени насыщения скрытой энергией продуктов изнашивания. Таким образом, знаменатель уравнения (11) представляет собой критическую плотность внутренней энергии:

$$(\rho\theta c_p \Delta T_t \zeta)_{kz} v_{kp} \rightarrow (qV_3 v_{kp}) \zeta = (\Delta U_i v_{kp}) \zeta \sim (E_{уд} \zeta) v_{kp} \sim E_{уд}^*, \quad (14)$$

где ζ — коэффициент равномерности распределения скрытой энергии; $E_{уд}^*$ - критическая плотность внутренней энергии, осредненная в изнашиваемых объемах материала.

В уравнениях (8) и (9) изменение мощности конвективной составляющей теплового потока ω_{Q_k} в пределах объема $V_{\text{деф}}$

$$\omega_{Q_k} \sim Q * V_{\text{деф}} \dot{\epsilon},$$

где $\dot{\epsilon}$ - скорость деформации, соответствует изменению мощности упругого и пластического деформирования материала, плотности накопленной энергии и отражает кинетику динамического возврата. Поскольку параметр ω_{Q_k} характеризует уровень мощности подводимой внешней энергии $\omega_{вн}$, а также интенсивность диссипации последней в деформируемых объемах материала, то представленный в виде энтропийного критерия

$$S^* = \int_0^{\tau_p} \frac{\omega_{Q_k}(t)}{T(t)} dt - S_0$$

где τ_p — долговечность материала в объеме $V_{\text{деф}}$; S_0 - энтропия материала в исходном состоянии, соответствующая температуре T_0 он может характеризовать кинетические особенности диссипации внешней энергии в изнашиваемых объемах в течение периода времени, равного τ_p .

Критерий S^* в свое время был успешно использован Л. И. Бершадским при исследовании совместимости и кинетики приработки червячных передач [8].

Уравнение изнашивания, аналогичное соотношению (11), можно получить из (10) в виде

$$V_{\text{изн}} = A_{\text{мех}} v_i / \left\{ \theta \left[(\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 + \mu \sum_{i,j=1}^3 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right] + \Delta U_{\text{ФЕ}} - Q_M \right\} v_{kp}, \quad (15)$$

где перемещения $\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2$ и $\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2$ представляют собой предельные деформации сжатия и сдвига соответственно. После несложных преобразований уравнение (15) перепишется

$$V_{\text{изн}} = \frac{A_{\text{мех}} v_i f(t)}{[\theta(E_{\text{сж}} + E_{\text{сд}}) + \Delta U_{\text{ФЕ}} - Q_M]_{kp} v_{kp}} = \frac{\omega_{\text{вн}} f(t)}{k_{U_{\text{Ф}}} k_{Q_M} k_{\eta} E_{\text{уд}} v_{kp}}, \quad (16)$$

где $k_{U_{\text{Ф}}}$, k_{Q_M} и k_{η} - коэффициенты, учитывающие влияние на энергоемкость материала фазовых превращений, температуры и жесткости напряженного состояния соответственно.

Согласно уравнению (16) фазовые превращения могут увеличивать энергоемкость материалов и соответственно - уменьшать износ.

Энергоемкость сталей будет увеличиваться за счет упрочнения, происходящего при фазовых превращениях, что проявляется в процессе микроударного нагружения в отношении количества мартенсита деформации $\theta_{(M)}$ к содержанию аустенита $\theta_{(A)}$ (рис. 4) в степени $m = -5,5 \dots -6,0$, то есть будут выполняться соотношения

$$\Delta G \sim N_{kp}^{-n} \sim \Delta \sigma_{фп}^{-(mn)} \sim (\theta_{(M)}/\theta_{(A)})^{-(mn)}$$

При $n = 0,7$ и $m = 5,5$ окажется, что изменение количества мартенсита деформации может существенно влиять на эрозионную стойкость нестабильных сталей, так как выражение для износа в этом случае примет вид

$$\Delta G = const_3 / (\theta_{(M)}/\theta_{(A)})^{3,85}.$$

Последний результат удовлетворительно согласуется с опытными данными испытаний нестабильных при деформировании никелевых и хромомарганцевых сталей с аустенитно-мартенситной структурой на ударно-эрозионных стендах (рис. 4).

Объединяя частные уравнения (11) и (16), получим более общую структурно-энергетическую модель процессов изнашивания, учитывающую вклад всех составляющих в уравнениях баланса (1) и (8), на которые может расходоваться внешняя энергия, вводимая в изнашиваемый материал в виде потоков энергии упруго-пластических деформаций и потоков тепловой энергии:

$$V_{изн} = \frac{|A_{мех} + Q_{\Sigma} - (Q_k + Q_{\phi}) \cdot V_{деф}| \cdot v_t}{k_{U\phi} k_{QM} k_{\eta} (E_{уд}^* - E_{уд0}) \cdot v_{kp}} f(t) = const_4 \frac{E_{\Sigma} v_t}{W_{kp}^* - W_0^*} f(t), \quad (17)$$

где $const_4 = (1 - \frac{\Delta U_{\phi Q} + \bar{Q}}{E_{\Sigma}}) / (k_{U\phi} k_{QM} k_{\eta})$ - плотность мощности деформирования материала в

исходном состоянии или, другими словами, - потеря энергоемкости в объеме $V_{деф}$ до начала изнашивания материала.

Если вместо осредненной в деформируемом объеме энергоемкости $E_{уд}^*$ использовать предельную энергоемкость, реализуемую материалом непосредственно в локальных зонах разрушения, определяемую, например, энергией активации элементарных процессов, то

следует учитывать конкретное соотношение упругой и пластической составляющих критической скорости нагружения, определяющее характер разрушения материалов. Энергетический подход при оценке долговечности материалов использовали в свое время Г. Греггер [9], Г. Фляйшер [10] и др. ученые.

Использование уравнений механики при анализе процессов изнашивания позволяет учесть гетерогенность структуры материалов и раскрыть содержание энергетических характеристик в уравнениях изнашивания (2), (11), (16), и (17). Следует указать также на важность соотношения $V_{изн}(N_{кр})$ (рис. 4 в), позволяющего производить оценку износостойкости по характеристикам поверхностной усталости и энергоемкости материалов без осреднения последней в изнашиваемых объемах.

Выполненный анализ указывает на перспективность использования уравнений механики не только для описания износа материалов, но также и для раскрытия кинетической

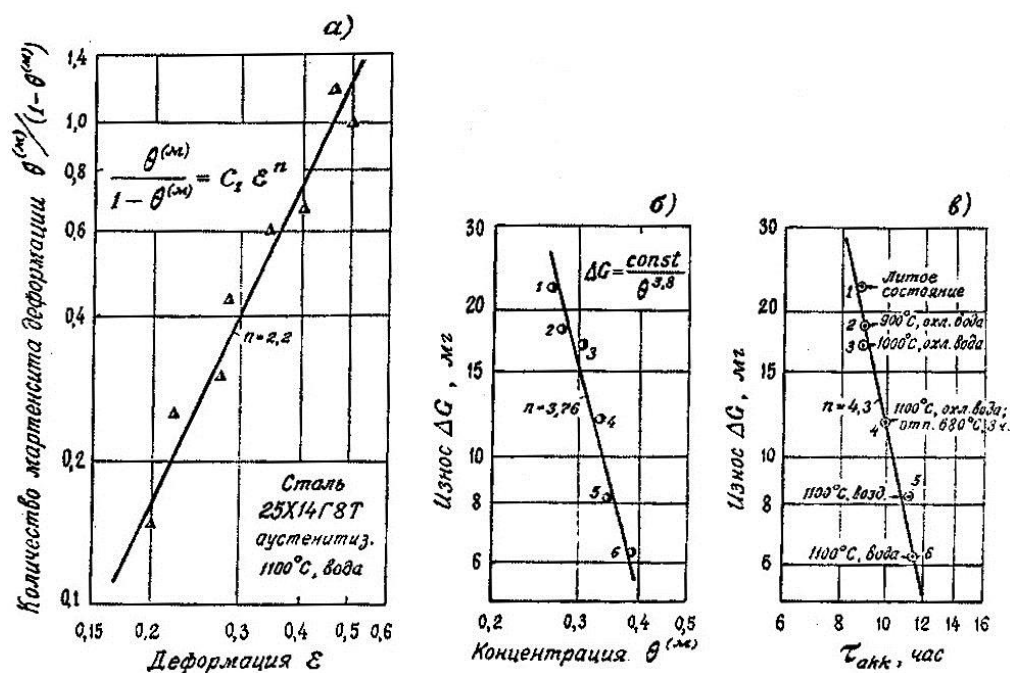


Рис. 4. Зависимость объемной доли мартенсита от деформации (а) и величины износа от количества α -фазы после 30% деформации сжатия образцов из стали 25X14Г8Т (б) и продолжительности $\tau_{акк}$ (в). Испытания на МСВ при $\omega = 8000$ Гц и $A=70$ мкм.

функции $f(t)$ в уравнениях изнашивания и установления взаимосвязи критической скорости удара с механическими свойствами изнашиваемых материалов.

3. Критическая скорость удара при изнашивании материалов.

В исходном выражении для критерия $W_{kp}^* \cong \frac{1}{3} E_{уд}^* v_{kp}$ удельная энергоемкость изнашиваемого материала $E_{уд}^*$ может быть определена как площадь под кривой циклического деформирования в осях, истинное напряжение - истинная деформация при испытании образцов до разрушения с учетом предыстории деформирования материала. При этом напряженное состояние образцов должно соответствовать жесткости напряженного состояния тонких поверхностных слоев материала при изнашивании [1].

Критическая скорость удара v_{kp} , входящая в критерий W_{kp}^* , учитывает процессы, происходящие при изнашивании в тонких поверхностных слоях материалов в условиях динамического нагружения. Поэтому расчет критерия W_{kp}^* невозможен без установления взаимосвязи v_{kp} с конкретными свойствами изнашиваемых материалов, определение которых более доступно, нежели измерение v_{kp} известными способами, изложенными, например, в работе [11].

Известно, что ударное нагружение сопровождается распространением в материалах волн упругих и пластических деформаций [1, 14 и др.]. При исследовании распространения ударных волн в сплошных средах может быть использована гидродинамическая теория, согласно которой ударный фронт, рассматривается как поверхность разрыва функций, описывающих движение частиц до и за ударным фронтом. Поэтому для описания поведения материалов в указанных условиях воспользуемся уравнениями изменения количества движения, баланса масс и потока энергии при движении поверхности разрыва функций в гетерогенной сплошной среде.

В подвижной системе координат, соединенной с элементом плоскости разрыва, эти уравнения будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
c\theta_0^{(k)}\rho_0^{(k)} &= (c-v)\theta_1^{(k)}\rho_1^{(k)}; \\
c\theta_0^{(k)}\rho_0^{(k)}v &= \theta_1^{(k)}\rho_1^{(k)} - \theta_0^{(k)}\rho_0^{(k)}; \\
c\theta_0^{(k)}e_0^{(k)} - \theta_1^{(k)}e_1^{(k)}(c-v) &= 0,5\theta_1^{(k)}\rho_1^{(k)}(c-v),
\end{aligned} \tag{18}$$

где v - изменение массовой скорости при прохождении ударной волны со скоростью c ; e - удельная внутренняя энергия; ρ - напряжение с учётом «вязких» потерь; $\theta^{(k)}$ - концентрация k -ой составляющей материала. Индексами 0 и 1 обозначены невозмущенное и сжатое состояние среды. Верхние повторяющиеся индексы (k) означают суммирование.

При составлении соотношений (18) предполагалось, что массовые скорости для всех фаз системы одинаковы, а движение частиц за фронтом волны - установившееся.

Из уравнений (18) нетрудно получить следующие выражения:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_p &= \frac{v}{c} = (\theta_p^{(k)}\rho_p^{(k)} - \theta_0^{(k)}\rho_0^{(k)})/(\theta_p^{(k)}\rho_p^{(k)}); \\
c^2\theta_0^{(k)}\rho_0^{(k)}\varepsilon_p &= \theta_p^{(k)}\sigma_p^{(k)} - \theta_0^{(k)}\sigma_0^{(k)}; \\
\theta_p^{(k)}e_p^{(k)} - \theta_0^{(k)}e_0^{(k)} &= 0,5(\theta_p^{(k)}\sigma_p^{(k)} - \theta_0^{(k)}\sigma_0^{(k)})\varepsilon_p
\end{aligned} \tag{19}$$

где $\sigma_p^{(k)}$ - напряжение в структурных составляющих материала; ε_p - относительное удлинение, соответствующее состоянию ρ (рис. 5).

Следовательно, скорость распространения упругой ударной волны определится из выражения

$$c^2 = \frac{(\theta_p^{(k)}\sigma_p^{(k)} - \theta_0^{(k)}\sigma_0^{(k)})}{\sum_{k=1}^N \theta_0^{(k)}\rho_0^{(k)}} \varepsilon_p. \tag{20}$$

Когда величина напряжения $\sigma_p^{(k)}$ превзойдет предел текучести хотя бы для одной из составляющих гетерогенного материала, устойчивость ударной волны нарушится и она разделится на два скачка - упругий предвестник, движущийся со скоростью, определяемой выражением (20) и пластическую ударную волну, распространяющуюся с меньшей скоростью. После прохождения пластической волны одна из компонент будет находиться в упруго-пластическом состоянии. При этом для пластической волны справедливы соотношения

$$\begin{aligned}
c_{пл}^2 \theta_y^{(k)} \rho_y \varepsilon_{ps} &= \theta_p^{(k)} \sigma_p^{(k)} - \theta_y^{(k)} \sigma_y^{(k)}; \\
\theta^{(k)} e^{(k)} &= 0,5 \left(\theta^{(k)} \sigma^{(k)} - \theta_y^{(k)} \sigma_y^{(k)} \right) \varepsilon_{ps}; \\
\varepsilon_{ps} &= \frac{v_s}{c_{пл}} = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_y}{1 - \varepsilon_y} \approx \varepsilon_p - \varepsilon_y,
\end{aligned}
\tag{21}$$

где σ_y - предел упругости Гюгонио, определяемый точкой излома ударной адиабаты материала; v_s - изменение массовой скорости при прохождении пластической волны; $c_{пл}$ - скорость пластической волны.

В соотношениях (21) учитывается, что пластическая волна распространяется по материалу, возмущенному упругой ударной волной.

Поскольку $\theta^{(1)} \sigma^{(1)} = \sigma^{(1)} - \sum_{k=2}^N \theta^{(1)} \sigma^{(1)}$, то при линейном упрочнении деформируемого материала будем иметь:

$$\begin{aligned}
c_{пл}^2 \rho_y \varepsilon_p &= (\sigma_p^1 - \sigma_y^1) + \sum_{k=1}^N \theta_y^{(k)} (R_p^{(k)} - R_y^{(k)}); \\
e - e_0 &= 0,5 (\sigma_p^1 - \sigma_y^1) \varepsilon_p + 0,5 \varepsilon_p \sum_{k=2}^N \theta_y^{(k)} (R_p^{(k)} - R_y^{(k)}),
\end{aligned}
\tag{22}$$

где $\rho_y = \sum_{k=1}^N \theta_y^{(k)} \rho_y^{(k)}$ - массовая плотность материала; $R = \sigma^{(k)} - \sigma^{(1)}$ - межфазовые напряжения; $e = \sum_{k=1}^N e^{(k)}$ - внутренняя энергия гетерогенного материала.

В плоской волне напряжений сдвиговые деформации отсутствуют, объемная деформация $\varepsilon = \varepsilon_p$. При всестороннем сжатии деформации ε_p соответствует напряжение $\sigma = \frac{\sigma_p + 2\sigma_\alpha}{3}$,

где σ_p - напряжение, действующее по нормали к фронту ударной волны; σ_α - напряжение, действующее в плоскости ударной волны.

Напряжения σ_p , σ_α и σ при упругом сжатии материала в плоской волне можно определить по формулам

$$\sigma_p = \left(K^* + \frac{4}{3} \right) \varepsilon_p, \sigma_\alpha = \left(K^* - \frac{2}{3} G \right) \varepsilon_p, \sigma = K^* \varepsilon_p,
\tag{23}$$

где K^* - модуль объемного упругого сжатия; G - модуль сдвига.

Пусть при прохождении ударной волны изменение удельной энергии материала определяется суммой, состоящей из потенциальной энергии упругого объемного сжатия Δe_y , энергии упругих сдвиговых деформаций Δe_α и энергии пластической деформации $e_{пл}$. Тогда после преобразования выражений (21) - (23) можно получить формулу для скорости пластической волны в следующем виде:

$$c_{пл}^2 = \frac{1}{\rho_y} \sum_{k=1}^N \theta^k K^* \left(1 + \frac{2 \sum_{k=2}^N \theta^k \sigma_\alpha - 2 \sigma_T^{(1)} \theta^{(1)}}{3 \sum_{k=1}^N K^* \theta^k (\varepsilon_p - \varepsilon_y)} + 2 \frac{e_{пл} + A^{(1)}(R_{py}^{(k)})}{\sum_{k=1}^N K^* \theta^k (\varepsilon_p - \varepsilon_y)^2} \right) \quad (24)$$

При этом напряжения в основе (матрице) гетерогенного материала будут изменяться в соответствии с выражением

$$\sigma_p - \sigma_y = \sum_{k=1}^N K^* \theta^k (\varepsilon_p - \varepsilon_y) + \frac{2}{3} \sum_{k=2}^N \theta^k \sigma_\alpha^{(k)} - \frac{4}{3} \sigma_T^{(1)} \theta^{(1)} + 2 \left(e_{пл} + A^{(1)}(R_{py}^{(k)}) \right) (\varepsilon_p - \varepsilon_y)^{-1}, \quad (25)$$

где $A^{(1)}(R_{py}^{(k)})$ - работа сил взаимодействий матрицы и второй фазы.

Энергия упруго-пластического деформирования гетерогенного материала будет равна

$$e_s = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N K^* \theta^k (\varepsilon_p - \varepsilon_y)^2 + \sum_{k=1}^N \theta^{(1)} \sigma_\alpha (\varepsilon_p - \varepsilon_y^{(1)})^2 + e_{пл}^{(1)} - \frac{2}{3} \theta^{(1)} \sigma_T^{(1)} (\varepsilon_p - \varepsilon_y^{(1)}) + A^{(1)}(R_{py}^{(k)}) \quad (26)$$

Здесь два первых слагаемых представляют работу соответственно упругих деформаций сжатия Δe_y и сдвига Δe_α , а три последних в сумме равны работе упрочнения $E_{пл}^*$. На диаграмме деформации материала $\sigma - \varepsilon$ величина e_s изображается площадью, равной разности между полной площадью и площадью, лежащей ниже предела текучести материала матрицы $\sigma_T^{(1)} = \sigma_y^{(1)}$ (рис. 5) и равной произведению $\sigma_T \varepsilon_{пр}$ т. е. $e_s \cong e_{полн} - \sigma_T \varepsilon_{пред}$.

Пренебрегая работой упругих деформаций Δe_y и Δe_α формулу (24) для скорости пластической волны запишем в следующем компактном виде:

$$c_{пл}^2 = \frac{1}{\rho_y} \sum_{k=1}^N \theta^k E_{пл}^* \varepsilon_{ps}^{-2}, \quad (27)$$

Известно, что скорость удара v зависит от скорости пластической волны

$$v = \int_0^\varepsilon c_{пл} d\varepsilon. \quad (28)$$

Некоторая скорость удара, называемая критической $v_{кр}$, обусловлена невозможностью переноса волнами деформации большей части их энергии.

Этот момент соответствует значению $d_\sigma / d_\varepsilon = 0$ на кривой $\sigma - \varepsilon$ и скорости пластической волны $c_{пл} = 0$. При $v = v_{kp}$ происходит мгновенное разрушение материала

$$v_{kp} = \int_0^{\varepsilon_{kp}} \left(\frac{1}{\rho_v} \sum_{k=1}^N \theta^k E_{пл}^* / \varepsilon_{ps}^2 \right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon, \quad (29)$$

где v_{kp} - деформация разрушения.

Перепишем первое соотношение (22) для случая деформации двухфазного материала

$$c_{пл}^2 \rho_y \varepsilon_p = (\sigma_T^{(1)} - \sigma_y^{(1)}) + \theta_p^{(2)} (\sigma_p^{(2)} - \sigma_p^{(1)}) - \theta_y^{(2)} (\sigma_y^{(2)} - \sigma_y^{(1)}). \quad (30)$$

При $\theta_y^{(2)} = \theta_p^{(2)}$ этому соотношению соответствует сумма заштрихованных площадей, показанных на рис. 5. Очевидно, что при общей деформации материала ε_p , деформации частиц каждой из фаз в отдельности будут отличаться от ε_p .

Поэтому фактические диаграммы деформации будут выглядеть так, как это показано на рис. 5, где деформации матрицы $\varepsilon_p^{(1)'}$ определяются из условия равенства площадей с левой штриховкой. Когда материал матрицы испытывает упруго-пластические деформации (зона с правой штриховкой), деформации более упругих включений второй фазы остаются постоянными, равными $\varepsilon_p^{(2)' = \varepsilon_y^{(1)'}}$.

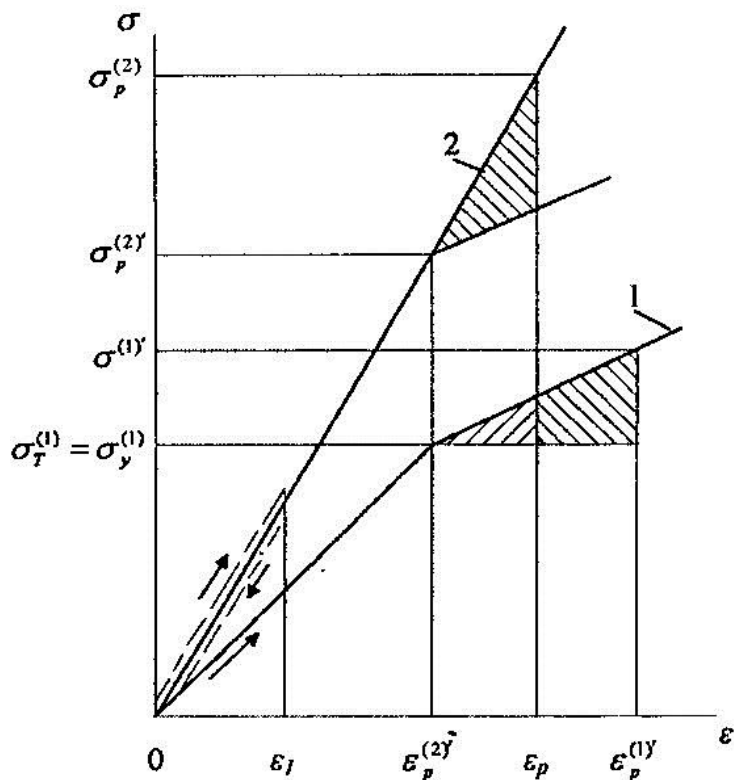


Рис. 5. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ при упруго-пластическом деформировании гетерогенного материала: 1 - для материала основы (матрицы); 2 - для более упругих включений.

В случае линейного упрочнения гетерогенного материала критическая скорость удара

$$v_{кр} = (2E_{пл}^*/\rho_y)^{\frac{1}{2}}, \quad (31)$$

Полагая, что $E_{пл}^*$ линейно зависит от $E_{уд}$ - энергии, затраченной на деформирование единицы объема материала вплоть до разрушения, получим

$$v_{кр} = (2kE_{уд}/\rho_y)^{\frac{1}{2}}, \quad (32)$$

где k - коэффициент пропорциональности.

Зависимость $v_{кр}$ от $E_{уд}$ показана на рис. 6 а. На этом рисунке опытные точки, заимствованные из работ [12, 13] и [14] удовлетворительно группируются около аппроксимирующей кривой

$$v_{kp} = 21,5\sqrt{E_{уд}}. \quad (33)$$

Коэффициент k в формуле (32) для сплавов на основе железа равен 0,18. Примечательно, что такое значение k соответствует отношению скрытой энергии наклепа к общей энергии, затраченной на динамическое деформирование указанных сплавов - оно изменяется в пределах от 0,12 до 0,20.

Зависимость (33) характеризует поведение металлов на макромасштабном уровне при растягивающем ударе. В жестких условиях внешнего нагружения при кавитации имеет место аналогичная зависимость (линия I на рис. 6 б), так как в результате аппроксимации опытных точек [15] имеем линейное соотношение между v_{kpl} и упругой составляющей при вдавливании индентора твердомера в изнашиваемый материал $h_{упр}^{отн}$ и соответствующую нелинейную зависимость между v_{kpl} к работой упругих деформаций $A_{упр}$ т. е.

$$v_{kpl} = const_6 h_{упр}^{отн} = const_7 (A_{упр})^{\frac{1}{2}}. \quad (34)$$

В менее жестких условиях кавитационно-эрозионного воздействия на поверхность материалов на мезо- и микромасштабном уровня показатель степени при $A_{упр}$ в (34) будет уменьшаться. При этом для мезомасштабного уровня КЭ окажется справедливым соотношение (кривая II на рис. 6 б).

$$v_{kpl} = const_8 (A_{упр})^{\frac{1}{4}}. \quad (35)$$

Формулы (33)-(35) указывают на необходимость учета масштабов при моделировании процессов КЭ материалов.

С учетом энергии упругого деформирования Δe_γ и сдвига Δe_α при линейном законе деформационного упрочнения металлических материалов, выражение (29) можно записать в виде суммы:

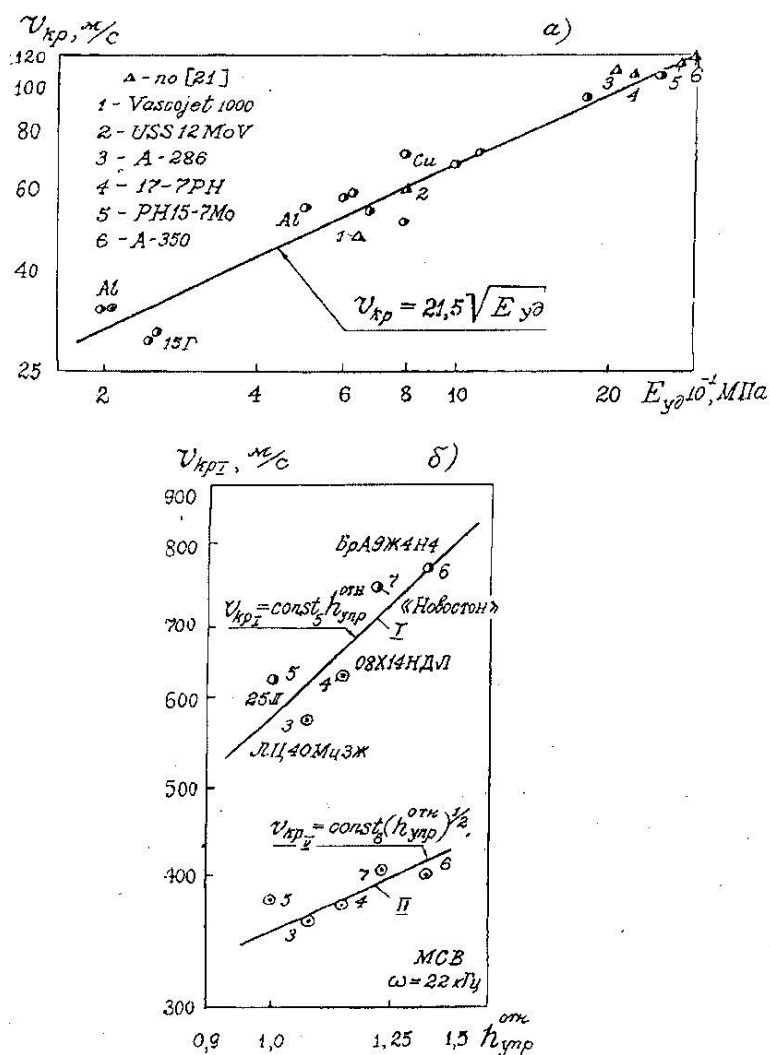


Рис. 6. Зависимость критических скоростей удара $v_{кр}$ от удельной энергии деформации сталей [12-14] (а); от упругого восстановления отпечатка при вдавливании индентора микротвердомера [15] (б). I - зависимость $v_k(h_{ydp}^{отн})$ для микромасштабного уровня изнашивания; II - то же для мезомасштабного уровня изнашивания при испытании материалов на магнитострикционном стенде [15].

$$v_{кр} = v_{кр}^{упр} + v_{кр}^{пл} = \frac{c_0 \sigma_b}{E} + k_\phi c_0 \left(\frac{(\sigma_b - \sigma_T) \varepsilon_{равн}}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (36)$$

где c_0 - скорость распространения звука в исследуемом материале; k_ϕ - коэффициент формы, учитывающий отклонение от линейной зависимости $\sigma(\varepsilon)$, изменяющийся в пределах от 1,0 (при линейном упрочнении) до 0,75 (при нелинейной зависимости $\sigma(\varepsilon)$); $\varepsilon_{равн}$ - равномерное удлинение при испытании образцов на растяжение.

Критическая скорость удара обусловлена невозможностью переноса волнами большей части их энергии, ограничению деформаций и увеличению их жесткости. Теоретическое значение и можно определить по формуле (28) путем графического интегрирования зависимости $c_{пл} = f(\varepsilon)$ на диаграмме напряжение - деформация $\sigma - \varepsilon$.

Критическая скорость деформации гетерогенного материала определится выражением

$$v_{kp}^{пл} = v_{kp} - v_{kp}^{упр} = \int_0^{\varepsilon_{kp}} \frac{1}{\rho_y} \sum_{k=1}^N (\theta^{(k)} \frac{E_{пл}^*}{\Delta \varepsilon_{пл}^2})^{\frac{1}{2}} d\varepsilon, \quad (37)$$

где $\rho_y = \sum_{k=1}^N \theta_y^{(k)} \rho_y^{(k)}$ - массовая плотность материала на уровне предела упругости; $E_{пл}^*$ - энергия деформационного упрочнения; $\Delta \varepsilon_{пл}$ - деформация материала в пластической волне, равная отношению скорости частиц материала относительно фронта пластической волны к скорости пластической волны или приближенно - деформации разрушения за вычетом упругого вклада.

Выражение (37) характеризует составляющую критической скорости удара, связанную с пластической деформацией хотя бы одной из компонент гетерогенного материала. В общем случае критическая скорость должна учитывать упругую и пластическую (37) части деформации, то есть так же, как и (36), должна состоять из суммы скоростей

$$v_{kp} = v_{kp}^{упр} + v_{kp}^{пл} = \frac{(\theta_p^{(k)} \rho_p^{(k)} - \theta_0^{(k)} \rho_0^{(k)}) c_0}{\theta_p^{(k)} \rho_p^{(k)}} + \int_0^{\varepsilon_{kp}} (\frac{1}{\rho_y} \sum_{k=1}^N (\theta^{(k)} \frac{E_{пл}^*}{\Delta \varepsilon_{пл}^2})^{\frac{1}{2}} d\varepsilon, \quad (38)$$

где индекс ноль относится к невозмущенному состоянию материала, а индекс р характеризует деформацию более упругих, в сравнении с основной, выделений упрочняющей фазы.

Аналогично выражению (38) энергия упруго-пластического деформирования гетерогенного материала будет включать энергию упругих деформаций сжатия и сдвига

$$E_{упр}^{(k)} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \theta^{(k)} K \Delta \varepsilon^2 + \frac{1}{3} \sum_{k=2}^N \theta^{(k)} \sigma_{\alpha}^{(k)} \Delta \varepsilon, \quad (39)$$

где K — модуль объемного упругого сжатия; $\sigma_{\alpha}^{(k)}$ - сопутствующие напряжения в плоскостях, нормальных направлению фронта плоской ударной волны; $\Delta \varepsilon$ – упруго-пластическая деформация, и энергию упрочнения

$$(E_{пл}^*)^{(k)} = e_{пл}^{(1)} \frac{2}{3} \theta^{(1)} \sigma_T^{(1)} \Delta \varepsilon_{пл} + A, \quad (40)$$

где $\sigma_T^{(1)}$ и $\varepsilon_{пл}^1$ - предел текучести и удельная энергия упрочнения матрицы материала при пластической деформации $\Delta\varepsilon_{пл}$; A - удельная энергия взаимодействия основы и выделений второй фазы.

4. Критическая плотность потока энергии деформации.

На основании (38)-(40) критическая плотность мощности деформации, представленная в (16) и (17) произведением $W_{кр}^* \sim E_{уд}^{(k)} v_{кр}^k$, будет состоять из суммы потоков энергии упругих и пластических деформаций

$$W_{кр}^* = (W_{кр}^*)_{упр} + (W_{кр}^*)_{пл} = \rho^{(k)} \theta^{(k)} v_{упр}^3 + \rho^{(k)} \theta^{(k)} v_{пл}^3 = \theta^{(k)} E_{упр}^{(k)} v_{упр} + \theta^{(k)} (E_{пл}^*)^{(k)} v_{пл}^k, \quad (41)$$

Выражения (37)-(41) свидетельствуют о взаимосвязи критических параметров $v_{кр}$, $E_{уд}^*$ и $W_{кр}^*$ с комплексом физико-механических характеристик и структурных параметров деформируемых (изнашиваемых) материалов. Опыт показывает [1, 17 и др.], что в зависимости от структуры материалов и условий нагружения (масштаба, особенностей деформирования материала в зоне контакта и пр.) указанные критические параметры могут быть представлены целым рядом инвариантов, состоящих, например, из работы пластической деформации в жестких условиях ударно-абразивного изнашивания пластичных материалов со структурой аустенита, или представляющих собой энергию разрушения, учитывающую геометрию микротрещин и вязкость разрушения K_{IC} при изнашивании в аналогичных условиях высокотвердых наплавочных материалов.

После интегрирования выражения (38) и подстановки полученного результата в (41) получим уравнение

$$W_{кр}^* = \theta^{(k)} E_{упр}^{(k)} \left[\frac{2(E_{пл}^*)^{(k)}}{\rho_y} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (42)$$

согласно которому двучленный энергетический критерий оказывается зависимым от удельных энергий упругих и пластических деформаций в степени $3/2$. Опытные данные показывают, что при переходе от ударного деформирования к квазистатическому, выражения (41) и (42) будут вырождаться в энергетические соотношения с показателями степени при удельных энергиях $\leq 3/2$.

Для оценки работоспособности критерия $W_{кр}^*$ ниже приведены результаты

сопоставления теоретических зависимостей с опытными данными, полученными при различных видах изнашивания нескольких групп металлических материалов.

Несмотря на то, что вытекающая из рис. 7 кубическая зависимость W_{kp}^* от v_{kp} в относительных значениях подтверждает справедливость выражений (41) и (42), обобщение этого частного результата на разномасштабные условия внешнего нагружения материалов различных классов требует проведения дополнительных исследований. Относительные значения W_{kp}^* и v_{kp} для пяти марок стали на рис. 7 определяли по диаграммам микротвердости $H_\mu(e)$. При этом предельную деформацию, накопленную тонкими изнашиваемыми слоями образцов (деталей) к моменту разрушения, устанавливали на диаграмме $H_\mu(e)$ по наибольшей микротвердости, измеренной непосредственно в зонах изнашивания [17]. Удовлетворительная корреляция теоретической модели с результатами опытов (рис. 7) свидетельствует о существенном влиянии энергии деформационного упрочнения на износостойкость тонких поверхностных слоев сталей при ударах и внедрении абразива, особенно в начальный период изнашивания, то есть указывает на значимость второго члена правой части уравнений (41) и (42). В то же время первый член правой части этих уравнений, прямо пропорциональный предельной прочностной характеристике изнашиваемого слоя в третьей степени, определяет интенсивность установившегося процесса образования продуктов изнашивания для конкретной суперпозиции вероятности распределения импульсов внешнего воздействия с предельными энергетическими (упругими) характеристиками поверхности материалов.

Очевидно, что для отдельно взятого материала, тем более для материалов различных классов, значения и относительный вклад составляющих $(W_{kp})_{упр}$ и $(W_{kp}^*)_{пл}$ в общий критерий износостойкости W_{kp}^* могут быть существенно различными в зависимости от скорости деформирования, масштабных эффектов, жесткости напряженного состояния поверхности, разупрочняющего влияния рабочей среды и ряда других факторов. Все это создает неизбежные трудности при сопоставлении износостойкости со свойствами материалов в достаточно широком диапазоне изменения структур материалов и условий внешнего нагружения. Тем не менее, предложенный структурно-энергетический подход позволяет систематизировать результаты собственных исследований и опытные данные других авторов [1, 15, 17 и др.], (рис. 8).

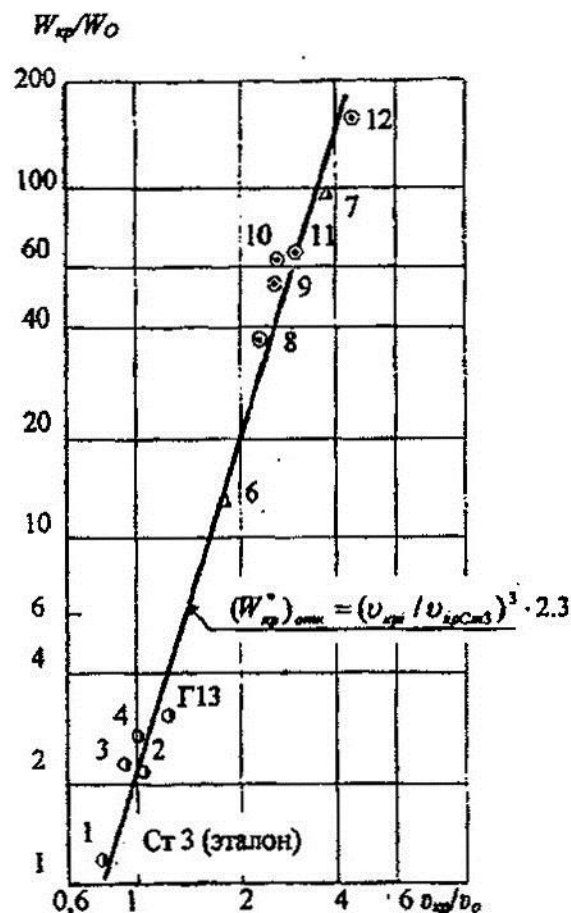


Рис. 7. Зависимость критерия $(W_{kp}^*)_{отн}$ от приведенной скорости (v_{kp}) сталей: 1 – Ст3 (эталон); 2 - 1X18Н9Т; 3 - 30Х4Г2ТЛ; 4 - Ст45 (н.); 5 - Г13 (аустенитизация 1050°C, вода) при скольжении по абразивной поверхности; 6 - Ст45 и 7 - Г13 при трении с абразивной прослойкой и ударах; 8-12: Ст3; 30Х4Г2Л; Ст45; 1X18Н9Т и Г13 при ГА изнашивании.

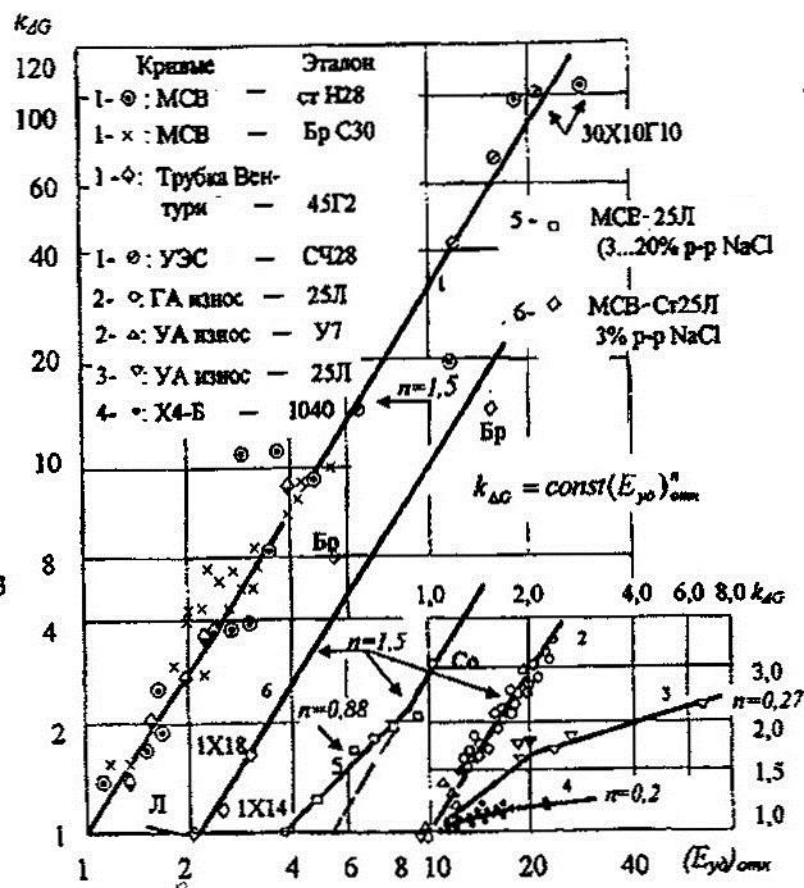


Рис. 8. Влияние энергоёмкости на износостойкость: 1 - сталей П, М, А и Ф кл., Ni-Al. бронз при кавитационной эрозии; 2 - конструкционных легированных сталей, бронз и латуней при гидроабразивном изнашивании и стали У7 при ударно-абразивном изнашивании (УА); 3 - конструкц. легир. сталей при УА изнашивании; 4 - стали SAE 1040 при скольжении по абразивной шкурке; 5 и 6 - сталей и цветных металлов в 3...20% растворах NaCl.

Сравнительные испытания материалов на кавитационное (K) изнашивание производили на магнитострикционной установке УЗДН-2Т в пресной и синтетической морской воде при амплитуде колебаний концентратора, равной 33 мкм, частоте 22 кГц и расстоянии между неподвижным образцом и концентратором, равном 0,5 мм. Коэффициент относительной износостойкости образцов $k_{\Delta G}$ определяли по потерям массы.

Гидроабразивное изнашивание (ГА) материалов производили на установке лоткового типа. Образцы цилиндрической формы вращались в лотке с рабочей смесью с линейной скоростью 3,1...11,2 м/с. Смесью состояла из пресной воды и кварцевого песка крупностью 0,3...0,6 мм в процентном соотношении 50/50 и 30/70 по объему соответственно.

При ударно-абразивном (УА) изнашивании испытывали образцы материалов в форме цилиндров диаметром 10 мм. В процессе испытаний происходило многократное соударение торцевой поверхности образцов с массивной наковальней, покрытой абразивным полотном 14А32НМ. В момент удара полотно оставалось неподвижным. Энергия отдельного удара при сравнительных испытаниях материалов составляла 0,53 Дж.

При построении зависимостей $k_{\Delta G} (E_{уд})_{отн}$ на рис. 8 относительную энергоемкость металлов и сплавов определяли по механическим свойствам материалов в виде произведения площади диаграммы прочности (твердости) на удельную энергию упрочнения в степени 0,5, то есть на критическую скорость нагружения, а именно:

$$(E_{уд})_{отн} = \left[\frac{(E_{уд}\sqrt{E_{пл}})_i}{(E_{уд}\sqrt{E_{пл}})_э} \right]^{2/3} = \left[\frac{(E_{уд}v_{кр})_i}{(E_{уд}v_{кр})_э} \right]^{2/3} = \left(\frac{W_{kpi}^*}{W_{kpэ}^*} \right)^{2/3}, \quad (43)$$

где индексами i и $э$ обозначены характеристики исследуемого материала и эталона соответственно.

При оценке кавитационно-эрозионной стойкости никелевых сталей аустенитного класса, испытывающих при изнашивании фазовые превращения, соотношение (43) кроме

деформационного упрочнения учитывало также аккумуляционный период накопления внутренней энергии, τ_{ak} .

Аппроксимация опытных данных на рис. 8 степенными зависимостями дает для кривых 1, 2, 5 и 6, то есть для условий: кавитационной эрозии в пресной и морской воде, независимо от способа возбуждения кавитации; гидроабразивного изнашивания на установке лоткового типа при скорости движения образцов 11,2 м/с и жесткого ударно-абразивного изнашивания стали УА единую зависимость

$$k_{\Delta G} = const_9 (E_{уд})_{отн}^{3/2}, \quad (44)$$

в которой опытная константа зависит от рабочей среды и класса испытываемых материалов. Практический результат (44) находится в хорошем соответствии с теоретической моделью в виде уравнений (41) и (42).

Уменьшение показателя степени при $(E_{уд})_{отн}$ в выражении (44) с 1,5 до 0,88 при кавитационном изнашивании никеля в 3...20% водном растворе NaCl (кривая 5 на рис. 8) связано с разупрочняющим воздействием коррозионно-активной среды на поверхность металла. Еще более значительное снижение показателя степени при $(E_{уд})_{отн}$ до 0,7...0,2 в условиях УА изнашивания материалов при энергии удара 0,53 Дж (кривая 3 на рис. 8) и при скольжении по абразивной поверхности по схеме, подобной испытаниям на машине Х4-Б, (кривая 4 на рис. 8) связано с излишним запасом пластичности исследованных конструкционных сталей. При УА изнашивании наибольшую износостойкость показала сталь 155Г5Х2СЛ после закалки и низкого отпуска, имеющая относительное сужение при растяжении равное всего 6% и соответствующее границе перехода от вязкого к хрупкому разрушению в макромасштабе. Если учесть, что в условиях ГА изнашивания сталей средней интенсивности при скорости перемещения образцов в лотке, равной 3,1 м/с, наименьший износ оказался у нормализованной стали 130Г7Х2АФЛ с еще меньшим относительным сужением, равным примерно 1,5%, то становится очевидной важность учета масштаба нагружения и закономерностей проявления хрупкости поверхностного слоя материалов и покрытий в макро- и мезоскопических масштабах. На эти вопросы, особенно в связи с жесткостью напряженного состояния поверхностных слоев материалов и скоростью

внешнего нагружения при различных видах изнашивания, пока еще нет достаточно убедительных ответов.

Из выражений (41), (42) и (44) следует, что износ металлов и сплавов связан с энергетическими параметрами $E_{уд}$, $E_{пл}$ и $W_{кр}^*$, которые, в свою очередь, могут быть выражены через структурно-чувствительные макросвойства изнашиваемых материалов, а для оптимизации макросвойств и износостойкости - через микроструктурные характеристики.

В формулах энергоемкости материалов не присутствуют в явной форме параметры, характеризующие цикличность нагружения. Однако в условиях мало- и многоциклового усталости как при «жестком», так и при «мягком» нагружении, односторонне накопленная деформация адекватна числу циклов нагружения, или при постоянной частоте нагружения - аккумуляционному периоду $\tau_{ак}$ накопления повреждений (деформаций). В связи с этим представляется возможным выразить $W_{кр}^*$ через временные и деформационные параметры, характерные для конкретных условий многократного динамического нагружения, привлекая для этой цели теорию усталости материалов и некоторые положения линейной механики разрушения, трансформированные для условий кавитационного изнашивания.

Выполненный анализ позволяет получить сравнительно простые соотношения между износостойкостью и энергоемкостью материалов при эрозии, удобные для прогнозных оценок стойкости деталей.

Нетрудно показать, что для условий кавитационной эрозии, протекающей по механизму малоциклового усталости, справедливы следующие соотношения:

$$(G\Delta e^2)\omega\tau_{ак} \sim E_{уд} \text{ и } (H^{дин}\tau_{ак})^{3/2} \sim E_{уд}^{3/2} \sim W_{кр}^*, \quad (45)$$

в которых G - модуль упругости; Δe - среднестатистическое значение амплитуды пластической деформации при кавитационных импульсах; ω - частота импульсов; $H^{дин}$ - динамическая твердость изнашиваемой поверхности.

При $\tau_{ak} \sim HV^{0,77}$ из (45) вытекает частная степенная зависимость

$$W_{kp}^* = \text{const}_{10} \tau_{ak}^{2,66}, \quad (46)$$

или единые частные зависимости $W_{kp}^* (\tau_{ak})$ и $\Delta G (\tau_{ak})$ в виде показательных функций (рис. 9).

Для подтверждения целесообразности структурно-энергетического подхода при оценке износостойкости материалов и возможности ее представления в связи с различными энергетическими параметрами (критериями) на рис. 9 а показана зависимость кавитационно-эрозионного износа чистых металлов от их акустического сопротивления ρc (ρ - плотность материала; c - скорость распространения звука в материале).

Опытные точки (см. рис. 9 а) можно аппроксимировать степенной зависимостью

$$V = \text{const}_{22} / (\rho c)_{\text{М}}^3, \quad (47)$$

которая, видимо, является одной из фундаментальных закономерностей разрушения сплошных сред под воздействием ультразвука.

Результат (47) согласуется со структурно-энергетической моделью изнашивания материалов.

На основании (47), а также известной формулы для определения динамического давления $p = \rho c \dot{u}$ ($\dot{u}$ - массовая скорость перемещения среды под воздействием волны возмущения) можем записать для относительного износа:

$$V_{\text{отн}} = \frac{(E\dot{u})_i}{W_{kp}^*} \sim \left(\frac{p_i}{p_{kp}}\right)^3 \sim \left(\frac{\dot{u}}{v_{kp}}\right)^3 \sim (\rho c)^{-3}_{\text{М}} \quad (48)$$

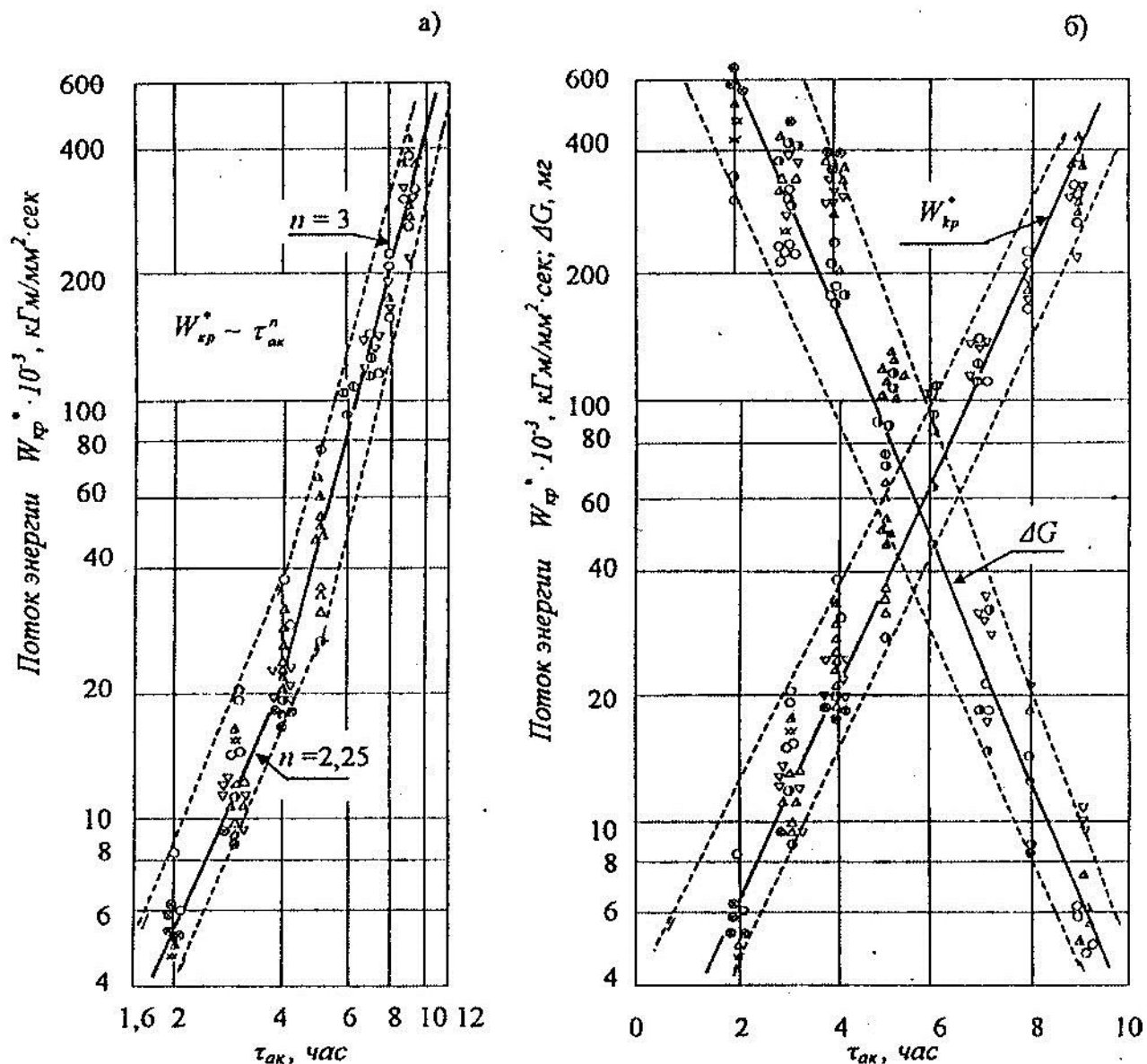


Рис. 8. Зависимость потока энергии критической плотности от τ_{ak} , аппроксимированная степенной (а) и показательной (б) функциями: $\blacktriangle$ - углеродистые стали; $\bullet$ - стали перлитного класса; $\blacktriangle$, $\bullet$ и $\blacksquare$ - стали аустенитного и аустенитно-ферритного класса в литом состоянии, после аустенитизации с последующим старением соответственно; $\blacktriangledown$ - стали мартенситного и мартенситно-ферритного класса; хх - бронзы; $\blacksquare$ - стали ферритного класса [1, 14, 15 и др.]. Стали испытаны на МСВ.

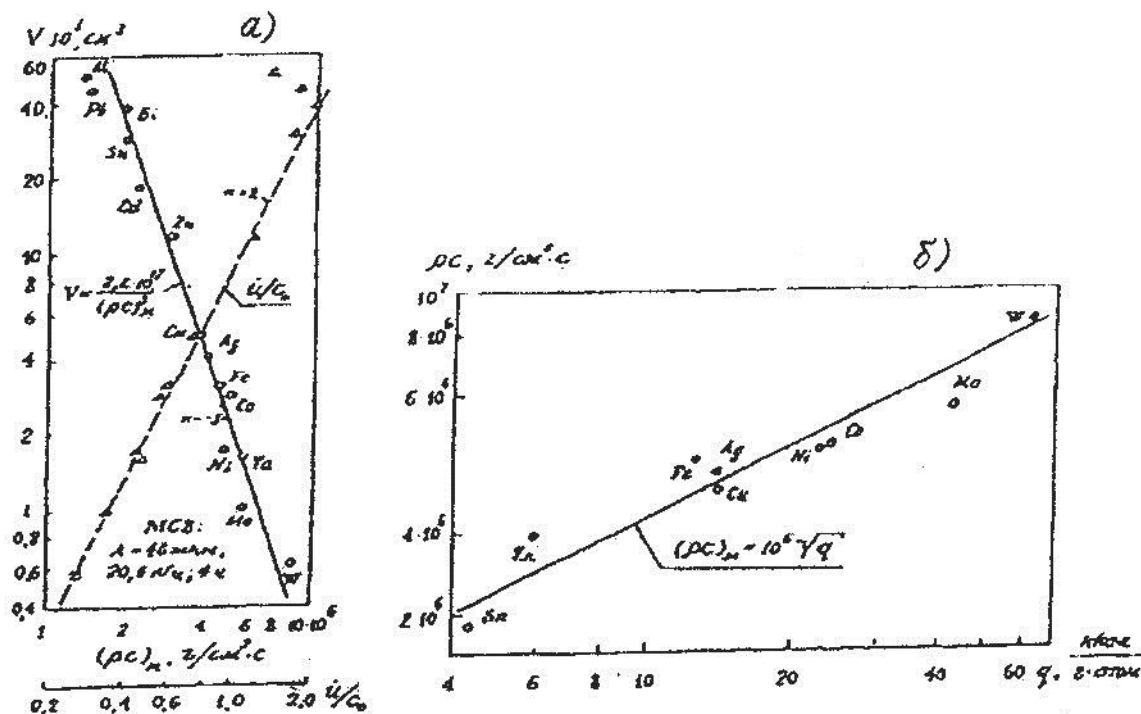


Рис. 10. Влияние акустического сопротивления $(\rho c)_M$ и на износ чистых металлов при микроударном нагружении (а); (б) - взаимосвязь $(\rho c)_M$ с абсолютным значением термодинамического потенциала q при нагреве чистых металлов от 0 К до температуры плавления (б - по К. А. Осипову [6, 7]; а - по М. А. Аскарову) [16].

Опытные точки (см. рис. 10 а) можно аппроксимировать степенной зависимостью

$$V = \text{const}_{22} / (\rho c)_M^3, \quad (47)$$

которая, видимо, является одной из фундаментальных закономерностей разрушения сплошных сред под воздействием ультразвука.

Результат (47) согласуется со структурно-энергетической моделью изнашивания материалов.

На основании (47), а также известной формулы для определения динамического давления $p = \rho c \dot{u}$ ($\dot{u}$ – массовая скорость перемещения среды под воздействием волны возмущения) можем записать для относительного износа:

$$V_{\text{отн}} = \frac{(E \dot{u})_i}{W_{kp}^*} \sim \left(\frac{p_i}{p_{kp}} \right)^3 \sim \left(\frac{\dot{u}}{v_{kp}} \right)^3 \sim (\rho c)_M^{-3}, \quad (48)$$

где p_i и p_{kp} - текущее и критическое (разрушающее материал) давление; v_{kp} — критическая скорость удара, вызывающая разрушение материала при однократном внешнем воздействии на определенном масштабном уровне нагружения.

Из соотношений (48) вытекает пропорциональность между критерием W_{kp}^* и кубом акустического сопротивления материала $(\rho c)_M^3$. Если в соответствии с рис. 10 б акустическое сопротивление в (48) заменить на значение термодинамического потенциала в степени $1/2$, т. е. на $(q)^{1/2}$, то получим зависимость относительного износа от $(q)^{3/2}$.

В результате выполненных сопоставлений нетрудно убедиться в том, что между механическими, акустическими и термодинамическими (тепловыми) критериями существует взаимосвязь

$$W_{kp}^* \sim (\rho c)_M^3 \sim q^{3/2}, \quad (49)$$

имеющая четкую физическую интерпретацию с позиций структурно-энергетической теории изнашивания, позволяющая в конкретных условиях внешнего воздействия на материалы прогнозировать их поведение и принимать решения о целесообразности их практического использования.

При повторных воздействиях будут суммироваться повреждения, которые после критического числа воздействий $N_{kp} \gg 1$ вызовут локальные разрушения среды, приводящие при изнашивании к изменению (уменьшению) массы детали вследствие отделения частиц вещества с ее поверхности.

Заключение

Впервые созданные на синергетических принципах структурно-энергетические модели надежности компактных, а также пористых материалов и покрытий с единых позиций позволяют описать процессы самоорганизации диссипативных структур в различных условиях внешнего воздействия. При этом учитывается напряженно-деформированное состояние и неоднородность структуры, особенности масштабных переходов, фазовых превращений и предельная энергоемкость деформируемых сред, впервые представленная энергетическим критерием — критической плотностью потока мощности деформации, а также аккумуляционным периодом накопления повреждений при поверхностной усталости материалов и критической скоростью динамического нагружения, когда происходит разрушение деформируемых сред при распространении в них волн упругих и пластических деформаций.

Структурно-энергетический подход позволил разработать эффективную методологию, позволяющую выявлять: частные физические модели разнообразных процессов разрушения компактных и пористых материалов (покрытий) [17], важнейшие общие и частные зависимости, определяющие их надежность и, в итоге, - работоспособность деталей механизмов и машин.

Практическая значимость изложенного выше научного подхода заключается в открывающихся широких возможностях разработки конкретных методик расчета остаточного ресурса, долговечности и ремонтпригодности весьма ответственных деталей (судовых двигателей, насосов, ДВС и др.) в различных отраслях народного хозяйства: в двигателестроении, на транспорте, в оборонной промышленности [17] и т. д.

Литература

1. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. СПб.: Академия транспорта РФ, 2006. - 608 с.
2. Klebanoff P.S. Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient // NACA 1954. T.N., 3178.
3. Попов В. С. и др. Износостойкость прессформ огнеупорного производства. М: Металлургия, 1971. 160 с.
4. Борщевский Ю. Т., Погодаев Л. И. Повышение кавитационной стойкости двигателей внутреннего сгорания. Киев: «Вища школа», 1980. - 208 с.
5. Иванова В. С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992, 160 с.
6. Осипов К.А. Вопросы теории жаропрочности металлов и сплавов. М.: АН СССР, 1960, - 285 с.
7. Осипов К. А. Некоторые активируемые процессы в твердых металлах и сплавах. М.: АН СССР, 1962, - 180 с.
8. Бершадский Л. И., Заманский Л. С. Управление приработкой кинематических пар трения. // Пробл. трения и изнашивания. Киев, Техника, 1982, № 21, с. 25-38.
9. Греггер Г. Расчёт износа на основе гипотезы аккумуляирования энергии при трении / Исследования по триботехнике. М: НИИ информации по машиностроению, 1975. - С. 187-195.
10. Фляйшер Г. Энергетический метод определения износа // Исследования по триботехнике. М: НИИ информации по машиностроению, 1975. С. 277-291.
11. Wittwer Hans-Joachim. Die kritische Uegeschwindigkeit urtd Bedeutung zur kennzeichnungen des Werkstoffverhaltens bei stobartiger Belastung // Materialprnitung/ 1973. № 15. S. 1.

12. Clark D. S. the Behavior of Metals under Dynamik Loading // Trans. Amer. Soc. etals. № 46. 1954. P. 34.
13. Clark D. S and Wood D. S. The Tensile Impact Properties of some Metals and Alloys // Trans. Amer. Soc. Metals. № 42. 1950. P. 45.
14. Гоуфорз Р. Е. Критерии штампуемости // Высокоскоростное деформирование металлов. М.: Машиностроение, 1966. С. 126-151.
15. Цветков Ю. Н. Методика определения кавитационной износостойкости сплавов, применяемых для изготовления гребных винтов. / Технология и организация судоремонта. С.-Пб.: СПГУВК, 1994. С. 122-134.
16. Аскарлов М. А. Кавитационное разрушение металлов и полимеров. Тбилиси: «Сабчота Сакартвело», 1973. 140 с.
17. Погодаев Л. И. Надежность судового оборудования: монография / Л. И. Погодаев, А. А. Кузьмин, Ю. К. Лопарев – СПб.: Изд-во ГУМРФ им адм. С. О. Макарова. 2015. - 124 с.