

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
УСЛОВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВАКУУМА НА ПОВЕДЕНИЕ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

В работах [1] - [5] показано, что вакуум оказывает влияние на механические характеристики металлов и сплавов. Эффект воздействия вакуума в большинстве случаев связывается с условиями выхода дислокаций на свободную поверхность в процессе деформирования. Условия выхода дислокаций в свою очередь определяются энергетическим состоянием свободной поверхности, зависящим от наличия окисных пленок и адсорбированного вещества среды [6], [7].

Однако в указанных работах не объясняются условия, при которых проявляется воздействие вакуума.

Если вакуум рассматривать как среду, влияющую на энергетическое состояние свободной поверхности в соответствии с адсорбционным законом Гиббса [8], то, по нашему мнению, должны существовать условия, при которых это влияние проявляется.

При проведении механических испытаний такие условия будут реализованы в том случае, если скорость приращения поверхности на единицу свободной площади в единицу времени в процессе деформирования превышает скорость протекания процесса адсорбции окружающей среды или скорость образования окисной пленки.

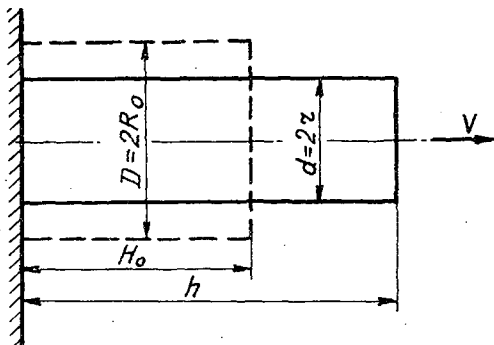
Рассмотрим условия, при которых реализуется влияние вакуума на механические характеристики (для случая одноосного растяжения цилиндрического образца). Сделаем следующие допущения: энергетическое состояние свободной поверхности определяется только протеканием адсорбционно-десорбционных процессов и не зависит от процессов дегазации и испарения вещества образца; процесс деформации рассматривается до момента образования шейки; объем образца в процессе деформирования остается постоянным; форма образца при деформировании остается подобной исходной.

Схема деформирования образца при одноосном растяжении приведена на рис. 1.

Примем обозначения: $K_s = \frac{1}{S} \frac{dS}{d\tau}$ - скорость приращения

поверхности на единицу
поверхности в единицу
времени при деформиро-
вании; $s = 2\pi zh$ - те-
кущая площадь поверхнос-
ти образца; $S_0 = 2\pi R_0 H_0$ -
начальная площадь поверх-
ности образца; τ - вре-
мя.

Тогда



$$K_s = \frac{1}{2} \frac{v}{H_0 + \int_0^{\tau} v d\tau} \quad , I)$$

Р и с. 1. Схема деформирования образца при одноосном растяжении: R_0, z - начальный и текущий радиусы образца; H_0, h - начальная и текущая длина образца

Для постоянной скорости деформирования из уравнения (I) сле-
дует:

$$K_s = \frac{1}{2} \frac{v}{H_0 + v\tau} \quad (2)$$

Для более удобного анализа зависимости $K_s = f(\tau)$ при $v = const$ целесообразно перейти к безразмерным величинам \bar{K}_s и t ,

$$\text{где } \bar{K}_s = K_s \frac{H_0}{v}; \quad t = \frac{\tau v}{H_0} \quad (3)$$

Подставляя значения \bar{K}_s и t в уравнение (2), получим

$$\bar{s} = \frac{1}{2(1+t)} \quad (4)$$

Найдем зависимость скорости покрытия единицы поверхности об-
разца адсорбированным газом в единицу времени в процессе его де-
формирования. Обозначим эту величину через K_B :

$$K_B = \frac{1}{S\theta} \frac{dS\theta}{dt} \quad (5)$$

где θ - текущая степень заполнения единицы поверхности образца
в любой момент времени при его деформировании.

Дифференцируя уравнение (5), получаем

$$K_B = \bar{K}_s + \bar{K}_\theta \quad (6)$$

Здесь

$$\bar{K}_\theta = \frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

- скорость изменения степени заполнения единицы поверхности образца в единицу времени, отнесенная к текущей степени заполнения единицы поверхности.

Для отыскания значения \bar{K}_θ необходимо найти функциональную зависимость величины θ от параметров среды, определяющих процессы адсорбции-десорбции, и от времени.

Пусть в момент времени τ образец имел поверхность S и степень заполнения θ . За время $\tau + d\tau$ в процессе деформирования образца произошло приращение поверхности ds и степени заполнения $d\theta$.

Уравнение заполнения поверхности адсорбированным веществом среды за время $d\tau$ можно записать в виде

$$\theta s + \bar{\theta} ds = (\theta + d\theta)(s + ds),$$

где $\bar{\theta}$ - степень заполнения вновь образованной единицы поверхности в любой момент времени.

Пренебрегая малой величиной второго порядка, получим

$$\frac{d\theta}{ds/s} = \bar{\theta} - \theta. \quad (8)$$

Так как $ds/s = \kappa_s d\tau$, то уравнение (8) можно представить в виде

$$\frac{d\theta}{d\tau} + \kappa_s \theta = \kappa_s \bar{\theta}. \quad (9)$$

Уравнение (9) - линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Если $\theta = \theta_0$ при $\tau = 0$, его решение имеет вид

$$\theta = e^{-\int_0^\tau \kappa_s d\tau} \left[\theta_0 + \int_0^\tau \kappa_s \bar{\theta} e^{\int_0^\tau \kappa_s d\tau} d\tau \right]. \quad (10)$$

Для окончательного решения уравнения (10) необходимо установить связь $\bar{\theta} = f(\tau)$, т.е. установить закон изменения во времени степени заполнения вновь образованной единицы поверхности.

Представим себе единицу чистой поверхности, на которой могут располагаться N_0 адсорбированных частиц среды. Пусть в момент времени τ на единице поверхности находилось N частиц адсор-

ванной среды. За время $d\tau$ из-за протекания адсорбционно-десорбционных процессов на единице поверхности стало $N+dN$ частиц. Приращение dN частиц произойдет за счет:

1. Протекания процесса адсорбции

$$\frac{N_0 - N}{N_0} n d\tau,$$

$n = \gamma \alpha$ - количество частиц, которые адсорбируются на поверхности;

γ - коэффициент аккомодации;

α - количество частиц среды, которое падает на единицу поверхности в единицу времени.

Согласно молекулярно-кинетической теории, число молекул, падающих на единицу поверхности в секунду, описывается уравнением

$$= P (2\pi m k T)^{-1/2},$$

P - давление среды;

m - масса молекулы;

k - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура.

2. Протекание процесса десорбции

Количество десорбированных частиц за время $d\tau$ равно

$$N + \frac{N_0 - N}{N_0} n d\tau) \alpha d\tau,$$

α - величина обратно пропорциональная времени оседлой жизни молекулы в адсорбированном состоянии.

Время оседлой жизни молекулы в адсорбированном состоянии равно [9]:

$$= \tau_0 \exp(E/RT),$$

τ_0 - период колебания молекул, нормальных к поверхности;

E - энергия активации процесса десорбции;

R - универсальная газовая постоянная.

Следовательно, за время $d\tau$ на единице поверхности будет находиться следующее количество адсорбированных частиц среды:

$$dN = (N + \frac{N_0 - N}{N_0} n d\tau) - (N + \frac{N_0 - N}{N} n d\tau) \alpha d\tau.$$

Преобразуя и заменяя отношение N/N_0 на θ , а соотношение $\frac{n}{N_0}$ на \bar{n} и пренебрегая величиной, пропорциональной $(d\tau)^2$, получим

$$\frac{d\bar{\theta}}{d\tau} = \bar{n} - (\bar{n} + \alpha)\theta. \quad (II)$$

Уравнение (II) - линейное дифференциальное уравнение первого порядка.

Его решение, если при $\tau=0$ $\theta=0$, имеет вид

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{n}}{\bar{n} + \alpha} \left[1 - e^{-(\bar{n} + \alpha)\tau} \right]. \quad (I2)$$

Из уравнения (I2) следует, что при динамическом равновесии процессов адсорбции и десорбции, т.е. при $\tau \rightarrow \infty$, степень заполнения единицы поверхности описывается выражением

$$\bar{\theta}_p = \frac{\bar{n}}{\bar{n} + \alpha}. \quad (I2a)$$

Подставляя (I) в уравнение (IO), получим

$$\theta = \exp\left(-\int_0^\tau \frac{1}{2} \frac{v}{H_0 + \int_0^\tau v d\tau} d\tau\right) \left[\theta_0 + \int_0^\tau \left\{ \frac{1}{2} \frac{v}{H_0 + \int_0^\tau v d\tau} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp\left(\int_0^\tau \frac{1}{2} \frac{v d\tau}{H_0 + \int_0^\tau v d\tau}\right) \frac{\bar{n}}{\bar{n} + \alpha} (1 - \exp - (\bar{n} + \alpha)\tau) \right\} d\tau \right]. \quad (I3)$$

При $v = \text{const}$ уравнение (I3) преобразуется в безразмерное соотношение

$$\theta = \frac{1}{\sqrt{1+t}} \left\{ \theta_0 + \frac{\bar{n}}{\bar{n} + \alpha} (\sqrt{1+t} - 1) - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\bar{n} \sqrt{\frac{v}{H_0}}}{(\bar{n} + \alpha)^{3/2}} e^{-\frac{\bar{n} + \alpha}{v/H_0}} \left[e z f \sqrt{\frac{\bar{n} + \alpha}{v/H_0}} \sqrt{1+t} \right. \right. \\ \left. \left. - e z f \sqrt{\frac{\bar{n} + \alpha}{v + H_0}} \right] \right\}. \quad (I4)$$

В связи с тем, что начало процесса деформирования образца начинается в условиях динамического равновесия, т.е. когда скорость адсорбции равна скорости десорбции,

$$\theta_0 = \bar{\theta}_p = \frac{\bar{n}}{\bar{n} + \alpha}. \quad (I5)$$

Подставляя (15) в уравнение (14), получим

$$\theta = \frac{\theta_0}{\bar{n} + \alpha} \left[1 - \frac{\sqrt{\pi} e^{\beta^2}}{2\beta} \frac{1}{\sqrt{1+t}} (ezf\beta\sqrt{1+t} - ezf\beta) \right], \quad (16)$$

где $\beta = \sqrt{\frac{\bar{n} + \alpha}{v/H_0}}$;

$$\bar{K}_B = \frac{A}{2(1+t)} \left[\frac{ezf\beta\sqrt{1+t} - ezf\beta - (2\sqrt{1+t}) \frac{\beta}{\sqrt{\pi}} \exp(-\beta^2(1+t))}{\sqrt{1+t} - A(ezf\beta\sqrt{1+t} - ezf\beta)} \right], \quad (17)$$

где $A = \frac{\sqrt{\pi} e^{\beta^2}}{2\beta}$.

Соотношения (4), (6) и (17) позволяют записать K_B для случая постоянной скорости перемещения захватов машины в виде

$$K_B = \frac{1}{2(1+t)} \left\{ 1 + A \frac{ezf\beta\sqrt{1+t} - ezf\beta - (2\sqrt{1+t}) \frac{\beta}{\sqrt{\pi}} \exp[-\beta^2(1+t)]}{\sqrt{1+t} - A(ezf\beta\sqrt{1+t} - ezf\beta)} \right\}. \quad (18)$$

Совместный анализ уравнений (4) и (18) позволяет определять границы влияния вакуума на механические свойства металлов и сплавов при выбранных размерах образца, скорости перемещения захватов испытательной машины и давления среды. При $\bar{K}_S > K_B$ воздействие вакуума должно влиять на механические свойства металлов и сплавов. При $\bar{K}_S < K_B$ влияние вакуума должно отсутствовать.

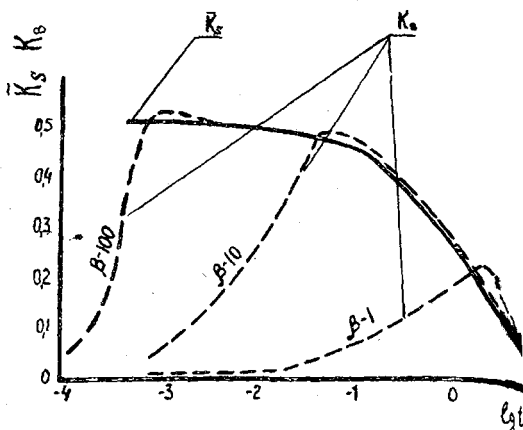
Аналитическое определение значения t , при котором $K_B > \bar{K}_S$, (следовательно, вакуум перестает оказывать воздействие) вызывает определенные трудности. Поэтому более удобно пользоваться графиком зависимости K_B и \bar{K}_S от t при фиксированных значениях β , который позволяет установить границы воздействия вакуума при проведении механических испытаний образцов. Такой границей на графике является точка пересечения кривых $K_B = f(t)$ и $\bar{K}_S = f(t)$.

График зависимости K_B и \bar{K}_S от t приведен на рис. 2. Зависимость временного интервала воздействия вакуума от β представлена на рис. 3.

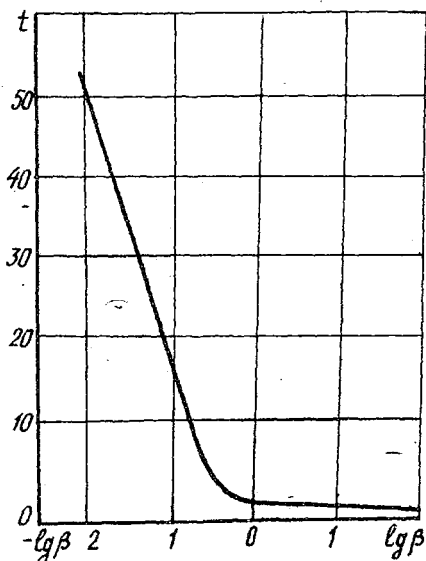
Полученные теоретические результаты позволяют не только определить условия, при которых проявляется воздействие вакуума, но и объяснить некоторые экспериментальные данные, приведенные в литературе [7], [10],

Анализ результатов данной работы показывает, что максимальный эффект воздействия вакуума должен проявляться на начальных стадиях процесса испытания, когда \bar{K}_S имеет наибольшее значение.

Этот вывод подтверждается результатами ряда экспериментальных работ [7], [10].



Р и с. 2. Зависимость \bar{K}_S и K_B от безразмерного времени t : - - $K_B = f(t)$ — $K_S = f(t)$



Р и с. 3. Зависимость длительности воздействия вакуума от коэффициента интенсивности покрытия β

В работе [10] отмечено, что испытание металлов и сплавов в вакууме сопровождается процессом газовой выделения. Приведенные кривые кинетики процесса газовой выделения при испытаниях носят экспоненциальный характер. Эту закономерность можно объяснить видом изменения величины \bar{K}_S , которая характеризует скорость приращения площади поверхности образца при испытании.

Л и т е р а т у р а

1. Gough H.J., Sopwith D.G., *J. Inst. Metals*, 1932, 49, p. 93.
2. Shahinian P., *Trans Am Soc. Metals*, 1956, 48, p.952.
3. Pickus M.R., Pazkeз E.R., *Special Technical Publication* №108, 1951, p. 26.
4. В е р к и н Б.И., Л ю б а р с к и й И.М., Б о й ч у к Н.М., Т р и а н б е р г Н.М., А л е к с е е в А.И. Космические исследования на Украине, вып. I (Киев, "Наукова думка", 1973, с. 28.
5. Fogestiez H., Clauss A., *Revue de Metallurgie*, LII, 1956, № 12, p.961.
6. К р а м е р И., Д е м е р Л. Влияние среды на механические свойства металлов. М., "Металлургия", 1964.
7. Kzamez J.R., Podlaseck S., *Acta metallurgica*, vol.11, №1, 1963, p.70-71.
8. Оно С., Кондо С. Молекулярная теория поверхностного натяжения жидкости. И., Л., 1963, с. 25.
9. Ф р е н к е л ь Я.И. Введение в теорию металлов. М., Гостехиздат, 1948.
10. Feuzstein S., Rice L., Conzad H., *Appl. Physics Letters*, vol.4, 1964, № 8, p. 154.

УДК 669.715

Ю.С.Старостин, В.Р.Каргин,
Г.В.Чертков

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБ СО СПИРАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ

Для изготовления деталей, применяемых в технике, - шнеков, направляющих, завихрителей, теплообменников используются тонкостенные трубные полуфабрикаты из алюминиевых сплавов со спиральными внешними или внутренними ребрами. Изготавливают их в основном путем прокатки или прессования труб или профилей с прямыми продольными ребрами с последующим закручиванием ребер в холодном состоянии на растяжных машинах с вращающейся головкой [1], [2]. Однако в литературе методика расчета технологической операции пластического кручения не рассматривается, поэтому целью данной работы было устранение этих пробелов.