

НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Предложена модель процесса накопления повреждений в поверхностном слое при поверхностной пластической деформации. Модель основана на гипотезе о подобии кинетики процессов накопления повреждений и процессов размножения дислокаций при значениях использованного ресурса пластичности не превышающих 0,3.

A model of damage accumulation process in a surface under surface plastic deformation is proposed. The model is based on the hypothesis about the similarity of damage accumulation processes and dislocation multiplication processes for the values of plasticity resource utilization not exceeding 0.3.

Проблемы увеличения долговечности деталей машин приводят к развитию различных методов упрочняющей обработки их поверхностного слоя. Одним из таких методов является метод поверхностного пластического деформирования (ППД) [1]. Методы ППД позволяют существенно повысить сопротивление усталости, контактную жесткость, износостойкость и другие характеристики деталей машин. Однако при пластической деформации наряду с процессами упрочнения идут процессы пластического разрыхления [2, 3, 4], которые отрицательно влияют на долговечность деталей. Поэтому актуальной является проблема количественной оценки влияния параметров процесса ППД как на упрочнения, так и на интенсивность накопления повреждений в пластически деформированном металле поверхностного слоя.

В данной работе в качестве меры поврежденности пластически деформированного металла принято величину использованного ресурса пластичности ψ и поставлена задача оценки значений ψ в зависимости от параметров процесса ППД. Предполагается, что при $0 < \psi \leq 0,3$ имеет место развитие дислокационной структуры и образование упругих дефектов в виде субмикропор, залечивающихся при отжиге. При значениях $0,3 < \psi \leq 0,6$ возникают и накапливаются энергетически устойчивые дефекты, которые не устраняются отжигом, при $0,6 < \psi \leq 1,0$ идут процессы объединения микропор и образования микротрещин [3].

Поэтому, для получения качественного поверхностного слоя необходимо, чтобы величина использованного ресурса пластичности не превышала значений $\psi \leq 0,3..0,4$. При таких значениях ψ кинетика процессов накопления и залечивания повреждений близка к кинетике рождения и аннигиляции дислокаций. Кроме того, при ППД имеет место значительная неравномерность напряженно-деформированного состояния, что обуславливает отличие процесса накопления повреждений в поверхностном слое от аналогичных процессов, происходящих при пластической деформации больших объемов металла. Поэтому для описания процессов накопления повреждений используем уравнение, подобное кинетическому уравнению для плотности дислокаций [5]:

$$\frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} - \text{div}(D \nabla \psi) = I(\psi), \quad (1)$$

где $\psi(\vec{r}, t)$ - использованный ресурс пластичности в точке с радиусом \vec{r} в момент времени t ,

D – коэффициент, аналогичный коэффициенту диффузии дислокаций,

$I(\psi)$ - функционал, характеризующий процессы накопления повреждений.

Для качественного описания процесса накопления повреждений ограничимся одномерной моделью, в которой использованный ресурс пластичности ψ зависит только от толщины поверхностного слоя, которую будем описывать координатой x . Рассмотрим пласти-

ческую деформацию поверхностного слоя при вдавливании двух различных пуансонов сферической формы в плоские образцы из стали 20.

Для этого используем экспериментальные результаты работы [6], в которой выполнены исследования для пуансонов, поверхность которых имеет форму шара с диаметром 12,5 и 50 мм. На рис.1 приведено распределение накопленной деформации e_u по глубине поверхностного слоя в сечении, которое совпадает с вертикальной плоскостью симметрии, при вдавливании двух указанных пуансонов с усилием 125 кН.

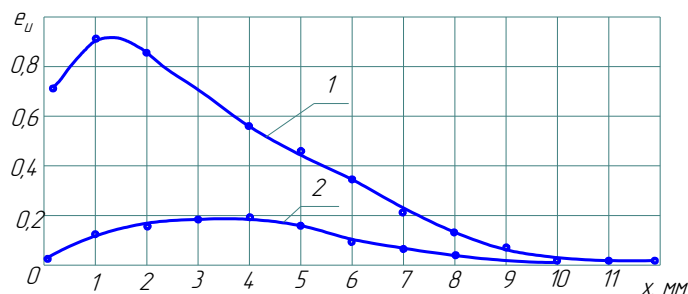


Рис.1 – Распределение накопленной деформации по глубине поверхностного слоя (1- d=12,5, 2- d=50, P=125 кН)

При решении кинетического уравнения (1) используем экспериментальные зависимости $e_u(x)$ (рис. 1), а также примем следующие упрощающие предположения:

1. Показатели η и μ_σ слабо зависят от x , поэтому принимаем их постоянными и равными $\eta = -1,36$; $\mu_\sigma = -0,2$. Для стали 20 предельная деформация e_p при таких значениях η и μ_σ будет равна $e_p = 1,85$ [4].

2. Интенсивность накопления повреждений пропорциональна плотности повреждений, то есть запишем, что:

$$I(\psi) = \beta f(e_u, x), \quad (2)$$

где β - коэффициент интенсивности накопления повреждений.

3. Вместо времени t в уравнении (1) будем использовать монотонно возрастающую величину – степень деформации e_u , которая определяется соотношением:

$$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}_u$ - интенсивность скоростей деформаций, t – время.

При принятых допущениях уравнение (1) принимает вид:

$$\partial \psi(x, e_u) / \partial e_u = \partial^2 \psi(x, e_u) / \partial e_u^2 + \beta f(x, e_u). \quad (4)$$

Решения уравнения (4) получено для области

$$0 \leq x \leq \delta, e_u > 0,$$

где δ - глубина пластически деформированного слоя.

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$\psi(x, 0) = \psi_0, \quad \psi(\delta, e_u) = 0,$$

где ψ_0 - использованный ресурс пластичности в исходном состоянии.

Для принятых начальных и граничных условий решение уравнения (4) дается выражением [7]:

$$\psi(x, e_u) = \frac{\psi_0}{2\sqrt{\pi}} \left\{ e^{\beta \frac{e_u}{e_p}} + \Phi\left(\frac{x - \delta}{2\sqrt{D \frac{e_u}{e_p}}}\right) \right\} + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{e_u} \frac{\delta - x}{\sqrt{D \left(\frac{e_u}{e_p}\right)^2}} \cdot e^{-\frac{(\delta-x)^2}{4D \frac{e_u}{e_p}}} f(x, e_u) de_u \quad (5)$$

где $\Phi(x/2\sqrt{D\frac{e_u}{e_p}})$ - интеграл вероятности.

В данной работе принимали, что в исходном состоянии использованный ресурс пластичности равен нулю, то есть $\psi_0 = 0$. Значения D определяли из условия, что при постоянных значениях η и μ_σ , а также при $e_u = e_p$, величина $\psi = 1$. В рассматриваемом случае для D получено значение $D=35 \text{ мм}^2$. При расчетах использованного ресурса пластичности ψ по уравнению (5) толщину пластически деформированного слоя и распределения степени деформации e_u по его глубине брали из рис. 1. Результаты расчета ψ приведены на рис. 2.

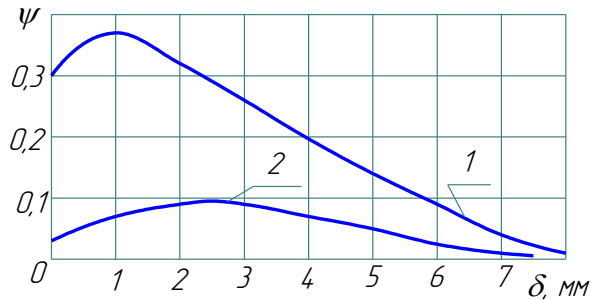


Рис.2 – Распределение использованного ресурса пластичности по глубине поверхностного слоя (1-d=12,5, 2- d=50, P=125 кН)

Анализ полученных результатов показывает, что расчеты ψ по уравнению (5) дают заниженные значения по сравнению с расчетами ψ по критерию Г.А.Смирнова – Аляева [1-3]. Максимальное значение ψ полученное по критерию Г.А.Смирнова- Аляева равняется $\psi_{\max}=0,43$, а по уравнению (5) - $\psi_{\max}=0,37$. Так как расчеты использованного ресурса пластичности ψ по критерию Г.А.Смирнова- Аляева при пластической деформации в условиях всестороннего сжатия дают завышенные значения ψ , то можно считать, что уравнения (4) с достаточной точностью описывает процесс накопления повреждений в поверхностном слое, для пластической деформации которого характерны большая неравномерность напряженного и деформированного состояний.

Выводы

Предложена модель процесса накопления повреждений в пластически деформируемом поверхностном слое, которая описывает этот процесс кинетическим уравнением аналогичным эволюционному уравнению для плотности дислокаций. Полученное решение кинетического уравнения удовлетворительно описывает процесс накопления повреждений при поверхностной пластической деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*, - М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Огородников В.А. *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением*. – К.: Выща школа, 1983, - 173 с.
3. Богатов А.А., Мижирецкий О.И., Смирнов С.В. *Ресурс пластичности металлов при обработке давлением*. – М.: Металлургия, 1989.- 144 с.
4. Алиев И.С., Сивак Р.И. *Оценка пластичности при поверхностной пластической деформации*// Известия ТулГУ. Сер «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением». – Тула: ТулГУ. – 2004. – С. 150-156
5. Малыгин Г.А. *Самоорганизация дислокаций и локализация скольжения в пластически деформируемых кристаллах*// ФТТ. – 1995, т.37 - №1. – С. 3-42
6. Браславский В.М. *Технология обкатки крупных деталей роликами*. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
7. Тихонов А.М., Самарский А.А. *Уравнение математической физики*. - М.: Наука, 1972-736 с.