

ная разница в износостойкости поверхности на этом этапе связана с тем, что при частоте 18 кГц более активно протекают процессы в расплаве, что ускоряет формирование карбонитридного слоя играющего решающую роль в процессе приработки. Более длинным является участок установившегося износа особенно при использовании колебаний частотой 18 кГц.

Формоизменение исходной поверхности проходит медленнее, что связано в первую очередь с более толстым поверхностным карбонитридным слоем. При установившемся износе не отмечается выкрашивания участков контактного слоя. Результаты электронно-микроскопического анализа показали, что процесс изнашивания в приближенных к эксплуатационным условиям протекает преимущественно вследствие окислительно-абразивного истирания материала. Это один из наименее интенсивных механизмов износного разрушения. Равномернее протекает износ и на заключительной стадии испытаний, что свидетельствует о возможности более стабильной работы упрочненных деталей на протяжении продолжительного срока службы при устранении опасности неожиданного выхода их из строя при длительной эксплуатации. Результаты испытаний показывают, что использование при упрочнении частоты 18 кГц дает лучшие результаты по сравнению с частотой 3 кГц. Дополнительным резервом повышения износостойкости в случае использования колебаний является увеличение времени обработки до 3-4 часов.

Литература. 1. Бельский С.Е., Тофпенец Р.Л Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. Мн, Наука и техника, 1984, 127 с.
2. Довгялло И.Г., Сурус А.И., Бельский С.Е. Влияние механических колебаний при низкотемпературном азотировании на характеристики упрочненного слоя. Труды БГТУ, выпуск VII, Мн., 1999. С.153-158.

УДК 539.3

Орлов С. А.

ЦИКЛИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

1. Повторное знакопеременное нагружение. Рассмотрим твердое тело, не имеющее начальных напряжений и деформаций. Пусть в момент времени $t_0 = 0$ на тело начинают действовать объемные F'_i и, на части внешней границы S_σ , поверхностные силы R'_i . Эти силы и граничное перемещение u'_{0i} на части границы S_u вызывают в теле напряжения σ'_{ij} , деформации ϵ'_{ij} и перемещения u'_i . Одновременно на тело начинает воздействовать нейтронный поток $I = \varphi t$. Предполагается, что под действием этих сил и граничных перемещений в теле появляются области пластических деформаций.

Предел пластичности σ_s под воздействие нейтронного облучения увеличивается и вполне удовлетворительно описывается формулой радиационного упрочнения [1]:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \left[1 + A(1 - \exp(-\xi I))^{1/2} \right],$$

где $\sigma_{s,0}$ – предел пластичности необлученного материала; A, ξ – константы материала, получаемые из эксперимента. Например, для алюминиевого сплава 356 $A = 1,09$; $\xi = 9,73 \cdot 10^{-26} \text{ м}^2$.

В упругих областях твердого тела справедлив закон Гука:

$$s'_{ij} = 2G\varepsilon'_{ij}, \quad \sigma' = 3K\varepsilon', \quad (1)$$

где $s'_{ij} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij}\sigma'$, $\varepsilon'_{ij} = \varepsilon'_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon'$, – компоненты девиаторов, а $\sigma' = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$, $\varepsilon' = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})/3$ – шаровые составляющие тензоров напряжений и деформаций; G, K – модули сдвига и объемной деформации; δ_{ij} – дельта Кронекера.

Для тех областей твердого тела, где появились пластические деформации, в случае простых (по А. А. Ильюшину) нагружений связь девиаторов можно представить в виде

$$s'_{ij} = 2G\varepsilon'_{ij}f'(\varepsilon'_u, I, a'_k)$$

где $f'(\varepsilon'_u, I, a'_k)$ – универсальная, независящая от вида напряженного состояния функция пластичности, зависящая от интенсивности деформаций ε'_u , нейтронного потока I и аппроксимационных параметров a'_k . Для конкретных материалов функцию пластичности можно определить по соответствующим экспериментальным данным.

Таким образом, в деформируемом теле связь между напряжениями и деформациями представима в виде

$$s'_{ij} = 2G\varepsilon'_{ij}f'(\varepsilon'_u, I, a'_k), \quad \sigma' = 3K\varepsilon', \quad (2)$$

причем функцию пластичности следует положить $f'(\varepsilon'_u, I, a'_k) = 1$ в тех областях, где $\varepsilon'_u \leq \varepsilon'_s$, ε'_s – деформация, соответствующая пределу пластичности σ'_s при нагружении из естественного состояния.

К соотношениям (1), (2) добавим дифференциальные уравнения равновесия и граничные условия, а также соотношения Коши в предположении малости деформаций

$$\begin{aligned} \sigma'_{ij,j} + F'_i &= 0; \\ \sigma'_{ij}l_j &= R'_i \text{ на } S_\sigma, \quad u'_i = u'_{0i} \text{ на } S_u; \\ 2\varepsilon'_{ij} &= u'_{i,j} + u'_{j,i}. \end{aligned} \quad (3)$$

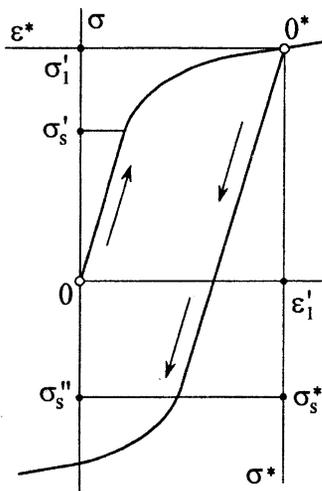
где l_j – направляющие косинусы нормали к части поверхности тела S_σ .

Пусть теперь, начиная с момента $t = t_1$, осуществляется мгновенная разгрузка и последующее нагружение усилиями F''_i, R''_i обратного знака с граничным перемещением u''_{0i} . При этом будем предполагать, что с этого момента времени воздействие нейтронного потока прекращается ($\varphi = 0$) и уровень облучения остается постоянным и равным его значению перед разгрузкой $I_1 = \varphi t_1$. Схематично этот процесс показан на рисунке.

Эти воздействия вызывают в теле напряжения σ''_{ij} , деформации ε''_{ij} и перемещения u''_i , для которых остаются справедливыми соотношения (3). Связь напряжений с деформациями для них запишем следующим образом

$$\begin{aligned} s''_{ij} &= 2G\varepsilon''_{ij}f''(\varepsilon'_u, \varepsilon''_u, I_1, a''_k) \\ \sigma'' &= 3K\varepsilon''. \end{aligned} \quad (4)$$

где ε_s'' , σ_s'' – деформация и напряжение предела пластичности при повторном нагружении.



Сложность краевой задачи для величин σ_{ij}'' , ε_{ij}'' заключается в зависимости искомого решения от точки разгрузки $(\varepsilon_1', \sigma_1')$, так как в каждой точке необходимо ставить свою краевую задачу и получать свое решение. Рассмотрим одну возможность избежать этих трудностей, основанную на распространении теории переменного нагружения В. В. Москвитина [2] на тела, подвергнутые облучению. Введем разности для момента времени $t > t_1$:

$$\sigma_{ij}^*(t) = \sigma_{ij}'(t_1 + t) - \sigma_{ij}''(t), \quad \varepsilon_{ij}^*(t) = \varepsilon_{ij}'(t_1 + t) - \varepsilon_{ij}''(t), \quad (5)$$

Аналогично для девиаторов и шаровых частей тензоров напряжений и деформаций.

Рисунок

В силу линейности введенных разностей, соотношения (3) выполняются и для величин со звездочками:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}^* + F_i^* &= 0, \quad F_i^* = F_i' - F_i''; \\ \sigma_{ij}^* l_j &= R_i^*, \quad R_i^* = R_i' - R_i'', \quad \text{на } S_\sigma; \\ u_i^* &= u_{0i}^* = u_{0i}' - u_{0i}'', \quad \text{на } S_u; \\ 2\varepsilon_{ij}^* &= u_{i,j}^* + u_{j,i}^*. \end{aligned} \quad (6)$$

Участок нелинейности на диаграмме описывается соотношением

$$s_{ij}^* = 2G\varepsilon_{ij}^* f^*(\varepsilon_u^*, \varepsilon_s', I_1), \quad (7)$$

где $f^*(\varepsilon_u^*, \varepsilon_s', I_1)$, вообще говоря, некоторая новая фиктивная функция нелинейности.

Соотношения (5) – (7) образуют новую краевую задачу для величин со звездочками. Предположим, что функцию f^* в любой точке кривой деформирования можно приблизить функцией f' , то есть описать таким же аналитическим выражением только с другими параметрами a_k^*

$$f^* = f'(\varepsilon_u^*, a_k^*, I_1).$$

В этом случае соотношения для напряжений со звездочками принимают вид

$$s_{ij}^* = 2G\varepsilon_{ij}^* f'(\varepsilon_u^*, a_k^*, I_1); \quad \sigma^* = 3K\varepsilon^*. \quad (8)$$

Сравнивая соотношения (1) – (3) для тела при нагружении из естественного состояния и соотношения для величин со звездочками (6) – (8), отмечаем, что они совпадают с точностью до обозначений. Поэтому решение задачи для величин со звездочками можно получить из известного решения задачи, соответствующей нагружению из естественного состояния, путем некоторых замен. Например, если известно перемещение $u_i' = u_i'(x, \varepsilon_u', \varepsilon_s', I, a_k')$, то соответствующее перемещение $u_i^* = u_i'(x, \varepsilon_u^*, \varepsilon_s', I, a_k^*)$, а искомое перемещение при повторном знакопеременном нагружении определяется из соотношения

$$u_i''(t) = u_i'(t_1 + t) - u_i^*(t). \quad (9)$$

Напряжения и деформации также вычисляются по формулам типа (9).

2. Циклическое нагружение. Полученный результат распространим на случай любого n -го циклического нагружения. Пусть при n -ом нагружении внешними силами F_i^n, R_i^n при граничных перемещениях u_{ij}^n возникают напряжения σ_{ij}^n , деформации ϵ_{ij}^n и перемещения u_i^n . При этом должны удовлетворяться уравнения равновесия, граничные условия и соотношения Коши (3). Введем следующие разности:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^{*n} &= (-1)^n (\sigma_{ij}^{n-1} - \sigma_{ij}^n), & \epsilon_{ij}^{*n} &= (-1)^n (\epsilon_{ij}^{n-1} - \epsilon_{ij}^n), \\ u_i^{*n} &= (-1)^n (u_i^{n-1} - u_i^n).\end{aligned}\quad (10)$$

Примем, что при любом n -ом нагружении связь между шаровыми составляющими тензоров напряжений и деформаций остается упругой. Повторя предыдущее предположение о возможности описания кривых $s'_{ij} \sim \epsilon'_{ij}$ и $s_{ij}^{*n} \sim \epsilon_{ij}^{*n}$ функциями нелинейности одинакового аналитического вида f' :

$$s_{ij}^{*n} = 2G\epsilon_{ij}^{*n} f'(\epsilon_u^{*n}, I_1, a_k^{*n}), \quad (11)$$

закключаем, что решение задачи для величин со звездочками (10), (11) при любом n -ом нагружении можно получить из решения задачи, соответствующей нагружению из естественного состояния. Например, если известно перемещение $u_i' = u_i'(x, \epsilon_u', \epsilon_s', I, a_k')$, то соответствующая величина со звездочкой будет $u_i^{*n} = u_i'(x, \epsilon_u^{*n}, \epsilon_s^{*n}, I_1, a_k^{*n})$. Искомое перемещение u_i^n найдем, обобщая (9):

$$u_i^n = u_i' - \sum_{k=2}^n (-1)^k u_i^{*k}. \quad (12)$$

Напряжения и деформации вычисляются по формулам типа (12).

Таким образом, выводы известной теоремы В. В. Москвитина о переменных нагружениях упругопластических тела, распространена на случай комплексного радиационно-силового воздействия.

Литература 1. Старовойтов Э. И. Сопротивление материалов. Гомель, 1999.–220с. 2. Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука, 1981.–344с.

УДК 539.3

А. Н. Панов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА КОНСТРУКЦИИ НА ЭТАПЕ АНАЛИЗА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

*Институт надежности машин НАН
Минск, Беларусь*

Величина назначенного ресурса автомобиля при первой категории условий эксплуатации (ГОСТ 21624) определяется техническими условиями (ТУ) изготовителя. Критерием достижения ресурса является предельное состояние рамы и кабины. Критерием предельного состояния рамы является разрушение ее несущих элементов. Понятие категории эксплуатации условно. Но это позволяет установить шкалу, по которой можно сравнивать ресурс автомобилей. На автополигоне НАМИ накоплен опыт форсированных испытаний с приведением пробега к условиям первой категории. Опыт испы-