

УДК 539.3

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОНЯТИЯ НАКОПЛЕННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Ю.М. Темис, Б.Ф. Шорр

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
Москва

На основании анализа экспериментов показано, что накопленная пластическая деформация (НПД) отвечает структурному параметру, определяющему упрочнение (разупрочнение) и разрушение материала, только при знакопостоянном деформировании. При знакопеременных процессах одной и той же величине НПД соответствуют различная повреждаемость и число циклов до разрушения, а роль структурного параметра играет величина НПД, отнесенная к ее значению при разрушении от малоциклового усталости. При произвольных знакопеременных процессах развитие обратимой анизотропной деформации от НПД не зависит.

Ключевые слова: теория пластичности, экспериментальная пластичность, накопленная пластическая деформация, знакопеременные процессы, повреждаемость.

1. Введение

В теории пластичности для учета влияния необратимых изменений структуры материала на его деформирование широко применяется понятие *накопленной пластической деформации* (НПД), или параметр Одквиста. Величина НПД, которую будем обозначать как $\varepsilon_{p\Sigma}$, является неубывающей функцией процесса деформирования, и ее предельная величина соответствует разрушению. При одноосных процессах НПД определяется суммированием абсолютных значений приращений пластической деформации

$$\varepsilon_{p\Sigma} = \int |d\varepsilon_p|.$$

При растяжении или сжатии образца разрушению соответствует величина $\varepsilon_{p\Sigma} = \delta$. Отличать ее от текущей пластической деформации

$$\varepsilon_p = \int d\varepsilon_p$$

имеет смысл только при знакопеременных процессах, когда в некоторые моменты приращение $d\varepsilon_p$ имеет знак, противоположный знаку самой пластической деформации, т.е. $\varepsilon_p d\varepsilon_p < 0$, причем всегда $\varepsilon_{p\Sigma} \geq \varepsilon_p$.

При сложном напряженном состоянии НПД принято определять как

$$\tilde{\varepsilon}_{p\Sigma} = \int (d\varepsilon_p)_i, \quad (1.1)$$

где

$$(d\epsilon_p)_i = \sqrt{3d\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p / 2}$$

– интенсивность приращений компонент пластической деформации. Значение $\tilde{\epsilon}_{p\Sigma}$ совпадает с длиной траектории пластического деформирования и при разрушении может значительно превышать величину δ , в то время как реальная пластическая деформация в момент разрушения в одноосном случае по модулю, а в многоосном случае как второй инвариант тензора пластических деформаций не превосходит δ .

При представлении тензора пластической деформации в векторной форме $\mathbf{\epsilon}_{pi}$ [1] с компонентами $\sqrt{3/2}\epsilon_{ij}^p$ его величина равна $\epsilon_{pi} = \sqrt{3\epsilon_{pi}\epsilon_{pi}/2}$, а величина вектора $d\mathbf{\epsilon}_{pi}$ с компонентами $\sqrt{3/2}d\epsilon_{ij}^p$ совпадает с интенсивностью приращений $(d\mathbf{\epsilon}_{pi})_i$.

При сложном напряженном состоянии различие между знакопостоянными и знакопеременными процессами может быть выявлено, если рассмотреть проекцию $d\hat{\mathbf{\epsilon}}_{pi}$ приращения вектора $d\mathbf{\epsilon}_{pi}$ на направление самого вектора $\mathbf{\epsilon}_{pi}$, определяемую как

$$d\hat{\mathbf{\epsilon}}_{pi} = \frac{3\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p}{2\epsilon_{pi}}. \quad (1.2)$$

Скалярная величина $d\hat{\mathbf{\epsilon}}_{pi}$ совпадает с приращением интенсивности пластической деформации $d\epsilon_{pi} = d(\sqrt{3\epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p / 2})$. При знакопостоянных процессах, когда $\epsilon_{pi} d\epsilon_{pi} \geq 0$, или $\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p \geq 0$, неубывающая величина

$$\epsilon_{p\Sigma} = \int d\epsilon_{pi} \quad (1.3)$$

отражает общее увеличение интенсивности пластической деформации, поскольку к моменту разрушения она имеет тот же порядок δ , что при одноосном нагружении, т.е., в отличие от $\tilde{\epsilon}_{p\Sigma}$, полнее соответствует понятию НПД.

В случае знакопеременных процессов при $\epsilon_{pi} d\epsilon_{pi} < 0$ или $\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p < 0$ проекция $\hat{\mathbf{\epsilon}}_{pi}$ убывает и может, как и при одноосной деформации, изменять знак.

В настоящей работе в развитие [2] проводится анализ экспериментальной обоснованности применения НПД в качестве критерия необратимых изменений структуры материала в зависимости от условий знакопостоянного или знакопеременного процесса деформирования. Рассматривается диапазон температур, в котором влияние ползучести не проявляется. Деформации считаются малыми: $\epsilon_{pi} \ll 1$; тело в ненагруженном состоянии – изотропным.

2. Знакопостоянные процессы

2.1. Эксперименты показывают, что диаграмма деформирования $\sigma_0 = f(\epsilon_0)$ одноосного нагружения мало изменяется при многократных разгрузках в пределах упругой области, в том числе и при изменении знака напряжения. Также остается почти неизменной зависимость $\sigma_0 = \psi(\epsilon_{p0})$, где $\epsilon_{p0} = \epsilon_0 - \sigma_0/E$ – монотонно возрастающая пластическая часть деформации. Величина НПД, равная $\epsilon_{p\Sigma} = \epsilon_{p0}$, изменяется в пределах $0 \leq \epsilon_{p\Sigma} \leq \delta$, где δ – относительная остаточная деформация при разрушении; для конструкционных материалов $\delta \approx (5\div 30)\%$. Параметры диаграммы деформирования («мгновенный» предел текучести σ_e , ширина упругой области h_e и др.) представляются однозначными функциями НПД.

2.2. При сложном напряженном состоянии возможны знакопостоянные процессы нескольких видов.

а) При *пропорциональном* (простом) нагружении с разгрузками в упругой области направления векторов $\boldsymbol{\varepsilon}_{pi}$, $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ и $\boldsymbol{\sigma}_i$ сохраняются постоянными и величина НПД определяется как

$$\varepsilon_{p\Sigma} = \int d\varepsilon_{pi} = \varepsilon_{pi}.$$

По мере нагружения НПД увеличивается в соответствии с обобщенной диаграммой деформирования $\boldsymbol{\sigma}_i = f(\boldsymbol{\varepsilon}_i)$, перестроенной в координаты $\boldsymbol{\sigma}_i = f(\boldsymbol{\varepsilon}_{pi})$, и выполняет те же функции, что и при одноосном нагружении.

б) При *активном непропорциональном* (сложном) деформировании, когда интенсивности полной $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ и пластической $\boldsymbol{\varepsilon}_{pi}$ деформаций непрерывно возрастают, чему соответствует плавное изменение направления вектора интенсивности напряжений $\boldsymbol{\sigma}_i$, направление вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_{pi}$ при законе текучести $d\boldsymbol{\varepsilon}_{pi} \parallel \boldsymbol{\sigma}_i$ также перестраивается плавно, так что условие знакопостоянного нагружения $\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p > 0$ выполняется при достаточно больших углах поворота вектора $\boldsymbol{\sigma}_i$. Экспериментальные наблюдения некоторых авторов над развитием пластического течения при таких траекториях деформирования показали, что получающаяся зависимость $\boldsymbol{\sigma}_i = f(\boldsymbol{\varepsilon}_{pi})$ достаточно близка к обычной обобщенной диаграмме деформирования, что позволяет в расчетной практике применять гипотезу о единой кривой деформирования и в большом числе случаев использовать соотношения теории малых упругопластических деформаций [1].

в) При *заданном законе* изменения направления вектора $\boldsymbol{\sigma}_i$ при активном нагружении и после разгрузок повороты вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_{pi}$ отстают от поворотов $\boldsymbol{\sigma}_i$, так как при пластическом течении $d\boldsymbol{\varepsilon}_{pi} \parallel \boldsymbol{\sigma}_i$, в отличие от упругих деформаций, когда $d\boldsymbol{\varepsilon}_{ei} \parallel d\boldsymbol{\sigma}_i$. Поэтому условие $\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p > 0$ выполняется только при определенных ограничениях.

При *ступенчатом* изменении направления вектора $\boldsymbol{\sigma}_i$ указанное условие выполняется, когда оно происходит в пределах одного октанта системы в главных координатах $\boldsymbol{\sigma}_1, \boldsymbol{\sigma}_2, \boldsymbol{\sigma}_3$, а при плоском напряженном состоянии – в пределах одного квадранта.

Поведение материалов в указанных условиях нагружения экспериментально изучалось в ряде работ.

Так, в [3] испытывались трубчатые образцы из стали при совместном растяжении и кручении. Измерялись нормальные $\boldsymbol{\sigma}_{11}$ и касательные $\boldsymbol{\sigma}_{12}$ напряжения, продольные $\boldsymbol{\varepsilon}_{11}$ и сдвиговые $\boldsymbol{\varepsilon}_{12} = 0,5\gamma$ деформации. Пластическая деформация отдельно не выделялась. Последовательность нагружения состояла из четырех этапов: I – растяжение осевой силой в упругопластической области, II – продолжение активного нагружения при кручении с увеличением касательных напряжений при постоянных нормальных напряжениях, III – осевая разгрузка до $\boldsymbol{\sigma}_{11} = 0$ при сохранении постоянных касательных напряжений, IV – полная разгрузка.

На рис. 1,а показано протекание рассматриваемого процесса в относительных координатах $\bar{X}_\sigma = \boldsymbol{\sigma}_{11}/\boldsymbol{\sigma}_0$, $\bar{Y}_\sigma = \sqrt{3}\boldsymbol{\sigma}_{12}/\boldsymbol{\sigma}_0$, а на рис. 1,б – в координатах $\bar{X}_\varepsilon = \boldsymbol{\varepsilon}_{11}/\boldsymbol{\varepsilon}_0$, $\bar{Y}_\varepsilon = \sqrt{4/3}\boldsymbol{\varepsilon}_{12}/\boldsymbol{\varepsilon}_0$, в которых интенсивности напряжений и деформаций определяются величинами соответствующих векторов по формулам

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_i = \sqrt{\bar{X}_\sigma^2 + \bar{Y}_\sigma^2}, \quad (2.1)$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \sqrt{\bar{X}_\varepsilon^2 + \bar{Y}_\varepsilon^2}. \quad (2.2)$$

Экспериментальным данным работы [3] отвечают значения $\sigma_0 = 100$ МПа и $\varepsilon_0 = 0,01$. Жирными штриховыми стрелками показаны положения векторов $\bar{\sigma}_i$ и $\bar{\varepsilon}_i$ в конце активного нагружения. Этапы III и IV отвечают упругой разгрузке. Проекции вектора пластической деформации на координатные оси не меняют знака, т.е. нагружение остается знакопостоянным.

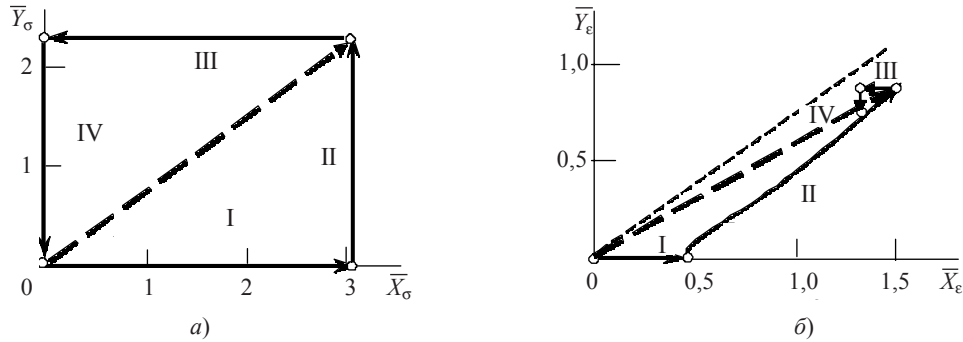


Рис. 1

Расчеты показали, что экспериментальная зависимость $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ достаточно точно описывается обычной диаграммой деформирования. Величина НПД – $\tilde{\varepsilon}_{p\Sigma}$, рассчитанная суммированием приращений $\Delta\varepsilon_{pi}$ по длине траектории активного деформирования, оказалась на 6% больше интенсивности пластической деформации $\varepsilon_{pi} = \varepsilon_i - \sigma_i/E$ для конца активного нагружения. Приращение пластической деформации происходило в направлении действия вектора $\bar{\sigma}_i$, что соответствует теории пластического течения, но максимальная величина интенсивности деформации $(\varepsilon_i)_{\max}$ и ее компоненты $(\varepsilon_{11})_{\max}$ и $(\sqrt{4/3}\varepsilon_{12})_{\max}$ в конце активного нагружения приближенно соответствуют деформационной теории пластичности.

г) При плавных изменениях направления вектора $\bar{\sigma}_i$, в частности по траектории нагружения в виде развертывающейся спирали Архимеда, его повороты при сохранении условия $\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p > 0$ могут быть значительными, но отставание вектора $\mathbf{\varepsilon}_{pi}$ ведет к тому, что это условие в конечном счете нарушается, что подтверждается наблюдениями.

Во всех случаях знакопостоянных процессов величина НПД, рассчитанная по формулам (1.1) или (1.3), с достаточной точностью выполняет функцию структурного параметра материала. При этом $\tilde{\varepsilon}_{p\Sigma} \approx \varepsilon_{p\Sigma} = \varepsilon_{pi}$ и $(\varepsilon_{p\Sigma})_{\max} \approx \delta$, т.е. накопление пластической деформации практически ограничивается обычной диаграммой деформирования.

3. Знакопеременные процессы. Циклическое нагружение

3.1. При стабильных циклах нагружениях с постоянным размахом изменение величины пластической деформации за цикл равно нулю, а НПД возрастает на удвоенную величину размаха деформаций (т.е. ширины петли гистерезиса) $\Delta\varepsilon_{p\Sigma} = 2\Delta\varepsilon_p$. За N полуциклов НПД достигает величины $\varepsilon_{p\Sigma} = N\Delta\varepsilon_p$, а при разрушении

$$(\varepsilon_{p\Sigma})_d = N_d \Delta\varepsilon_p. \quad (3.1)$$

Применительно к малоцикловой усталости (МЦУ) зависимость числа полуциклов N_d от размаха пластических деформаций $\Delta\epsilon_p$ достаточно хорошо аппроксимируется известной формулой Коффина–Мэнсона

$$\Delta\epsilon_p N_d^m = C, \quad (3.2)$$

где показатель степени $m = (0,5 \div 0,6)$, а коэффициент C , как это следует из формулы (3.2) при $N_d = 1$, имеет порядок δ .

Из формул (3.1) и (3.2) вытекает, что

$$(\epsilon_{p\Sigma})_d N_d^{m-1} = C \quad (3.3)$$

или в логарифмической системе координат

$$\lg \Delta\epsilon_p = \lg C - m \lg N_d,$$

$$\lg(\epsilon_{p\Sigma})_d = \lg C + (1 - m) \lg N_d. \quad (3.4)$$

Зависимости (3.4) при $m=0,5$ и $C \approx 0,09$ показаны на рис. 2, а лучами I и II. Для каждого значения $\Delta\epsilon_p$ линия II легко строится графически, как показано на рис. 2, а для $\Delta\epsilon_p = 0,5\%$ и $\Delta\epsilon_p = 2\%$, или по соотношению $\lg(\epsilon_{p\Sigma})_d = [\lg C - (1 - m) \lg \Delta\epsilon_p] / m$.

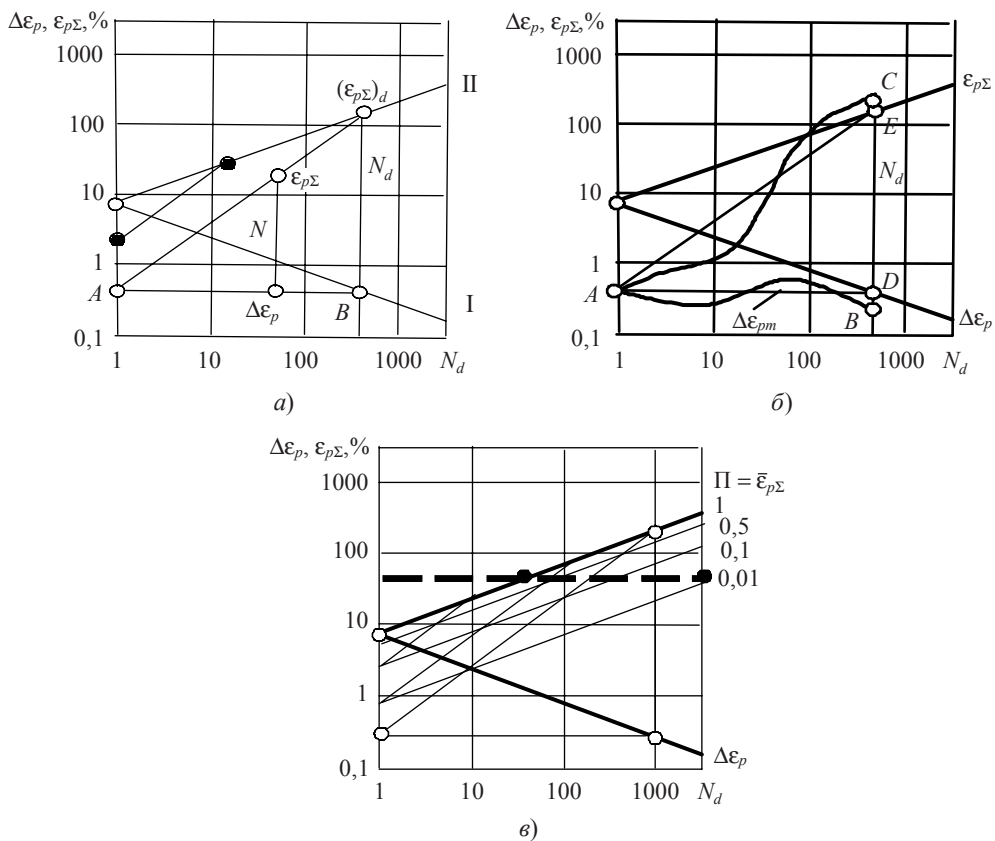


Рис. 2

При малоцикловом разрушении величина НПД достигает значений $(\Delta\epsilon_{p\Sigma})_d = (300 \div 500)\%$ и выше и этот эффект никак не может быть описан результатами

знакопостоянных испытаний. Из рис. 2,а видно, что разрушение наступает не при определенной величине НПД, а в очень широком диапазоне ее значений в зависимости от того, при каких размахах пластической деформации $\Delta\epsilon_p$ проводится их суммирование. Отметим также парадоксальный характер связи НПД с величиной N_d : чем больше $(\Delta\epsilon_{p\Sigma})_d$, тем выше число N_d ! Связано это с тем, что при $m < 1$ число N_d растет быстрее, чем уменьшается размах $\Delta\epsilon_p$, и их произведение растет. Однако, как следует из рис. 2, при малых значениях $\Delta\epsilon_p$ величина $(\Delta\epsilon_{p\Sigma})_d$ при достижении некоторого предельного значения перестает расти и затем убывает, а при испытаниях в упругой области с размахом деформаций, близким деформации предела упругости или ниже, $(\Delta\epsilon_{p\Sigma})_d = 0$.

Таким образом, при знакопеременном циклическом нагружении НПД является не структурным параметром материала, а лишь возможной формой представления результатов испытаний на МЦУ при разных размахах пластической деформации.

3.2. Если под воздействием меняющихся нагрузок размахи циклов $\Delta\epsilon_p$ становятся *переменными*, зависимость $\Delta\epsilon_p(N)$ можно представить кривой *AB* на рис. 2,б, а «накопленную» за это число полуциклов пластическую деформацию $\epsilon_{p\Sigma} = \Sigma\epsilon_p$ – кривой *AC*. Разрушение от МЦУ наступает при числе циклов N_d , соответствующем величине $(\epsilon_{p\Sigma})_d$ и некоторому среднему значению размаха $\Delta\epsilon_{pm} = (\epsilon_{p\Sigma})_d/N_d$. При стабильном или быстро стабилизирующемся состоянии материала можно ожидать, что положения точек *B* и *C* будут не сильно отличаться от точек на линиях I и II, полученных при постоянных циклах деформирования.

На рис. 3 точками показаны значения НПД, полученные в [4] обработкой результатов циклических испытаний одного и того же титанового сплава, проведенных авторами [4] и рядом других исследователей при различных условиях испытаний: 1 – постоянная нагрузка, 2 – постоянная деформация, 3 – случайная общая деформация, 4 – случайная пластическая деформация, 5 и 6 – при других процессах деформирования. Видно, что в пределах до $N_d \approx 3000$ допустима аппроксимация результатов всех опытов *единой* линией $\ln N_d = f(\ln \epsilon_{p\Sigma})$ – прямой I, которой соответствует *единая* линия $\ln N_d = f(\ln \Delta\epsilon_{pm})$ – прямая II, так как отклонения в циклах от этих прямых имеют тот же порядок, что и разброс точек при обычных испытаниях на МЦУ. Аналогичные испытания других материалов показали близкие результаты.

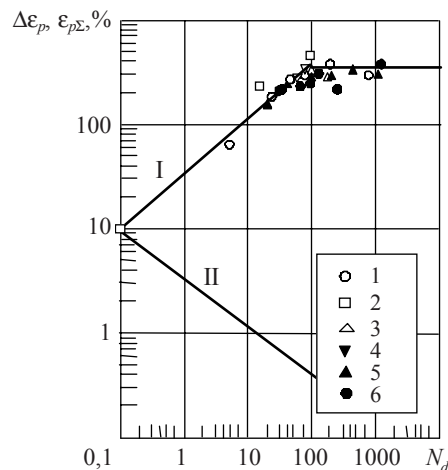


Рис. 3

Это позволяет проводить приближенные расчеты на МЦУ при переменных циклах, используя зависимость $N_d = f(\epsilon_{p\Sigma})_d$, полученную обработкой испытаний при постоянных циклах деформирования.

3.3. Используемая в расчетах МЦУ степень повреждения (повреждаемость) материала при циклических нагружениях может оцениваться функцией $\Pi(N)$, возрастающей от $\Pi(0) = 0$ в исходном состоянии до $\Pi(N_d) = 1$ при разрушающем числе полуциклов N_d . Применительно к МЦУ выразим повреждаемость через относительную НПД [4], деля ее текущее значение $\epsilon_{p\Sigma}(N)$ на величину при разрушении для рассматриваемого процесса, равную $(\epsilon_{p\Sigma})_d = \epsilon_{p\Sigma}(N_d)$:

$$\Pi(N) = \frac{\epsilon_{p\Sigma}(N)}{(\epsilon_{p\Sigma})_d} = \bar{\epsilon}_{p\Sigma}(N). \quad (3.5a)$$

При постоянном размахе пластических деформаций $\Delta\epsilon_p$

$$\Pi(N) = \bar{\epsilon}_{p\Sigma}(N) = \frac{N}{N_d}, \quad (3.5b)$$

где число $N_d = f(\Delta\epsilon_p)$ определяется кривой МЦУ (3.2).

На рис. 2,в изображены линии постоянных значений повреждаемости $\Pi = \bar{\epsilon}_{p\Sigma}$, а также проведена штриховая линия $\epsilon_{p\Sigma} = \text{const}$. Одной и той же НПД в зависимости от размаха пластической деформации в цикле отвечают отличающиеся на несколько порядков значения повреждаемости.

При переменных циклах возможны различные подходы к оценке повреждаемости по относительной НПД:

а) При линейном суммировании повреждаемости

$$\Pi(N) = \sum_{k=1}^{k=N} \frac{\Delta\epsilon_p^{(k)}}{(\epsilon_{p\Sigma})_d^{(k)}} = \sum_{k=1}^{k=N} \Delta\bar{\epsilon}_{p\Sigma}(k) = [\bar{\epsilon}_{p\Sigma}(N)], \quad (3.6)$$

где $\Delta\epsilon_p^{(k)}$ – увеличение НПД за k -й полуцикл, $(\epsilon_{p\Sigma})_d^{(k)}$ – величина НПД при разрушении, которую приближенно можно считать соответствующей кривой МЦУ для размаха $\Delta\epsilon_p^{(k)}$, а $[\bar{\epsilon}_{p\Sigma}(N)]$ – эквивалентная относительная НПД за N полуциклов.

Число циклов до разрушения равно половине от числа полуциклов N_d , при котором

$$\Pi(N_d) = [\bar{\epsilon}_{p\Sigma}(N_d)] = 1. \quad (3.7)$$

б) В случае существенно меняющихся циклов можно пользоваться выражением (3.5а), рассчитывая текущую величину $\epsilon_{p\Sigma}(N)$ по среднему за N размаху $\Delta\epsilon_{pm}^{(k)}$ и оценивая соответствующее разрушающее значение $\epsilon_{p\Sigma}(N)_d$ в предположении, что дальнейшее протекание процесса будет происходить при том же значении $\Delta\epsilon_{pm}^{(k)}$.

3.4. При нестабильном состоянии материала, когда процессы его упрочнения или разупрочнения охватывают большую часть циклической долговечности, зависимости $f(\Delta\epsilon_p, N_d) = 0$ и $f(\epsilon_{p\Sigma}, N_d) = 0$, получаемые обработкой результатов испытаний по различным программам нагружения, могут несколько различаться и в логарифмических координатах становятся нелинейными даже при постоянных циклах. Используя указанные зависимости в осредненном виде, можно проводить приближенную оценку числа N_d по формулам (3.6) и (3.7).

4. Произвольные знакопеременные процессы

При описании одноосного нагружения в системе координат ϵ_0, σ_0 произвольный знакопеременный процесс представляется в виде последовательности участков, на которых деформации развиваются в постоянном направлении, как показано на рис. 4,а отрезком кривой AB между двумя точками изменения знака $d\epsilon_0$ [5]. Это позволяет рассматривать участок AB как текущий полуцикл некоторого циклического процесса с переменным размахом $\delta\epsilon_0$, считать число полуциклов N равным числу смен направлений развития пластической деформации и *при заданном протекании процесса* использовать для расчета числа циклов до разрушения $0,5N_d$ соотношения раздела 3.

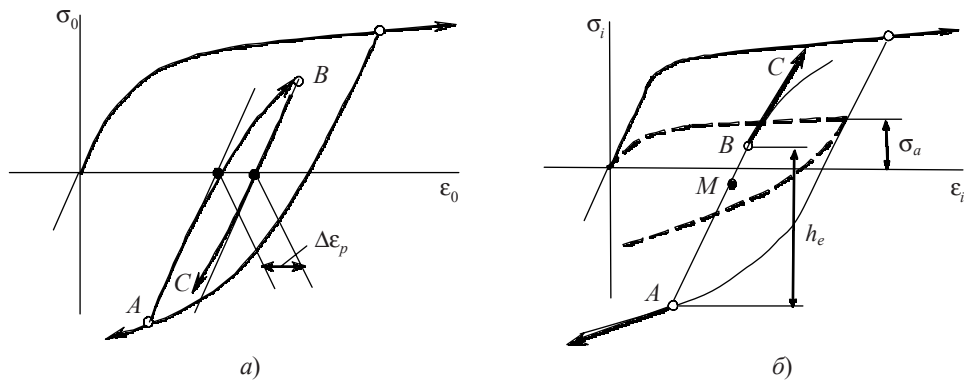


Рис. 4

Аналогичный подход распространяется на сложное пропорциональное нагружение, представленное в координатах ϵ_i, σ_i .

Для расчета картины деформирования нужны опирающаяся на эксперименты модель процесса и соответствующие характеристики материала. При этом в рамках использования понятия о НПД следует принимать во внимание следующие факторы:

а) *Необратимые изотропные* изменения характеристик материала, связанные с его упрочнением или разупрочнением, и прежде всего, ширина упругой зоны h_e (рис. 4,б), в пределах которой могут меняться «активные» напряжения σ^* [6], определяются эквивалентной относительной НПД – $[\bar{\epsilon}_{p\Sigma}(N)]$ согласно соотношению (3.6).

б) Процесс *обратимого анизотропного* смещения центра упругой области, определяющегося «остаточными микронапряжениями» σ_a [6], и *различный темп их обратимого изменения* $d\sigma_a/d\epsilon_p$ в зависимости от направления нагружения (при переходе от текущей точки M к точкам B и C на рис. 4,б) не зависят от НПД, но нестабильное состояние материала может изменять величину некоторых его характеристик.

в) Пока состояние материала остается стабильным, указанные анизотропные процессы деформирования протекают одинаково при различных значениях пластической деформации, т.е. не зависят ни от НПД, ни от ее относительной величины $[\bar{\epsilon}_{p\Sigma}(N)]$.

Возможные подходы к расчету произвольных знакопеременных процессов рассматривались в работах Ю.М. Темиса, Б.Ф. Шорра, Ю. Шабоша, В.Г. Зубчанинова, В.С. Бондаря и В.В. Даншина и др., где в той или иной степени учитывались указан-

ные выше факторы, но эти вопросы нуждаются в дальнейшем экспериментальном и теоретическом изучении.

Литература

1. *Ильюшин, А.А.* Пластичность / А.А. Ильюшин. – М.: Гос. тех.-теор. издат, 1948. – 376 с.
2. *Темис, Ю.М.* О роли накопленной пластической деформации в теории пластичности / Ю.М. Темис, Б.Ф. Шорр // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4 (4). – С. 1879–1881.
3. *Зубчанинов, В.Г.* Экспериментальная пластичность. Кн. 2. Процессы сложного нагружения / В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков, В.В. Гаранников. – Тверь: ТГТУ, 2004. – 184 с.
4. Development of finite element based strain accumulation model for the prediction of fatigue lives in highly stressed Ti components / I.V. Putschkov [et al.] // Int. J. Fatigue. – 1995. – Vol. 17, No 6. – P. 385–398.
5. *Темис, Ю.М.* Пластичность и ползучесть деталей ГТД при циклическом нагружении / Ю.М. Темис // Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении / ЦИАМ, 1989. – Вып. 4. – С. 32–50.
6. *Кадашевич, Ю.И.* Теория пластичности, учитывающая остаточные микронапряжения / Ю.И. Кадашевич, В.В. Новожилов // ПММ. – 1958. – Т. 22. – Вып. 1. – С. 78–89.

[07.11.2011]

ON THE USE OF ACCUMULATED PLASTIC STRAIN CONCEPT IN THE THEORY OF PLASTICITY

Yu.M. Temis, B.F. Shorr

On the basis of the analysis of experimental data it is shown that the accumulated plastic strain (APS) corresponds with a structural parameter which define hardening (softening) and destruction of material only at sign-constant deformation. At sign-variable loading different damage values and different numbers of destroying cycles correspond to one and the same magnitude of APS and the role of a structural parameter appertains to APS magnitude referred to its value at low-cycle fatigue. At arbitrary sign-variable loading the development of a reversible anisotropic deformation does not depend on APS.

Keywords: theory of plasticity, experimental plasticity, accumulated plastic strain, sign-variable loading, damage.