

УДК 539.3

ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ СРЕД С ДЕФЕКТАМИ

Березин А.В., Жиркевич В.Ю.

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены примеры оценки момента потери устойчивости процесса деформирования, который определяется как момент начала деформирования при убывающем приложенном напряжении при монотонном нагружении. Рассмотрены два примера процессов: шейка образца при одноосном испытании и заклепочное соединение обшивки фюзеляжа самолета. В последнем случае помимо упомянутого способа оценки момента потери устойчивости рассмотрена также возможность применения выведенного по результатам конечно-элементного моделирования критерия, связанного с соотношением эффективных напряжений, определяемых как растягивающая сила, деленная на площадь проходящего вдоль трещин поперечного сечения модели, еще сохраняющего свою целостность, и эффективной деформации, определяемой как максимальное смещение концов растягиваемого образца, деленное на исходную длину ненагруженной модели. При применении этих двух способов получены достаточно близкие результаты, что выражается в получении для обоих случаев сходных оценок вычисленных значений количества циклов нагружения, которое необходимо, чтобы трещина в алюминиевом 2024-Т3, из которого изготовлена обшивка фюзеляжа, достигла критической длины. Отмечена обусловленная разнообразием уровней нагрузок и приемов нагружения необходимость получения значительного числа требующихся для расчета зависимостей из соответствующих экспериментов. В качестве основного метода определения момента страгивания усталостной трещины рекомендован метод акустической эмиссии. Необходимость обращения к экспериментальным методам определения законов роста трещин и отвечающих за это параметров материала обусловлена зависимостью роста микродефектов от широкого круга внешних условий: типа окружающей среды, температуры, давления и т.п.

При использовании предложенных критериев может быть разработана методика оценки наступления критического состояния применяемых в различных областях техники деталей, содержащих дефекты и подверженных действию внешних нагрузок. Это позволит своевременно прогнозировать момент их возможного выхода из строя.

Ключевые слова: устойчивость; деформирование; рост трещины; критерий; напряжения

ESTIMATION OF PROCESS STABILITY DEFORMING THE DEFECTS-CONTAINED MEDIA

Berezin A.V., Zhirkevich V.J.

FBFR Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

ABSTRACT

Examples of the estimation of the moment of loss of stability of the deformation process, which is defined as the time of the beginning of deformation with decreasing applied stress under monotonic loading, are considered. Two examples of processes are considered: the

necking in sample during the uniaxial tensile testing and the riveted joint of the fuselage of the aircraft. In the second case, in addition to the above method for estimating the moment of loss of stability, we also considered the possibility of applying the criterion derived from the results of finite element modeling, related to the ratio of effective stresses, defined as the tensile force divided by the cross-sectional area of the cross-section of the model still retaining its integrity, to effective deformation, defined as the maximum displacement of the ends of the stretched sample divided by the initial length of the unloaded model. When these two methods are used, fairly close results are obtained, what is demonstrated in obtaining for both cases similar estimates of the calculated values of the number of loading cycles, which is necessary for the crack in the aluminum 2024-T3 used in manufacturing the fuselage skin, to reach the critical length. Due to the variety of load levels and loading methods, the need for obtaining from the corresponding experiments a significant number of dependencies, required for the calculation, is noted. The method of acoustic emission is recommended as the main method for determining the starting moment of the motion of the fatigue crack. The need to refer to experimental methods for determining the laws of crack growth and the material parameters responsible for this is due to the dependence of the growth of microdefects on a wide range of external conditions: type of environment, temperature, pressure, etc.

When using the proposed criteria, a methodology can be developed for assessing the onset of a critical state of parts used in various engineering areas that contain defects and are exposed to external loads. This will allow time to predict the time of their possible failure.

Keywords: stability; deformation; crack growth; criterion; stresses

1. ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ШЕЙКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассматривается модель пластического тела, аналогичная модели Батдорфа-Будянского [1], опирающаяся на идею накопления повреждений, развитую впоследствии многими известными учеными [2,3 и др.]

В [4] показано, что в модели пластического тела теории скольжения с учетом образования и роста микродефектов происходит потеря устойчивости пластического течения путем образования локального сдвига, когда деформирование происходит только по одной системе скольжения при убывающем напряжении в этой плоскости, в результате образуется микротрещина, развитие которой определяется условиями роста. На диаграмме деформирования в этом случае образуется максимум при $d\sigma/d\varepsilon = 0$ в этой точке. Для дефектного материала с дефектами типа пор радиуса R условие потери устойчивости записывается в виде [4]

$$1 - \frac{R}{a} - \frac{R'_\varepsilon(\varepsilon)}{a} F_1'[\sigma_1] \sigma_1 = 0,$$

которое сводится к виду

$$\sigma = \frac{\sqrt{2}(a-R)^2}{aR'_\varepsilon(\varepsilon)F_1'(\sigma_1)}, \quad (1)$$

где R – эффективный размер дефекта или поврежденной области; R'_ε – производная по деформации зависимости $R = R(\varepsilon, \dots)$; $F_1'(\sigma_1)$ – производная по σ_1 закона связи деформаций от эффективных напряжений в области предразрушения, определяемых в данном случае как $\sigma_1 = \sigma / [\sqrt{2}(1 - R/a)]$, где a – расстояние между ближайшими дефектами.

С помощью формулы (1) по размерам дефектов в шейке цилиндрического образца можно определить соответствующие напряжения момента потери устойчивости, т.к. каждая точка на кривой нагрузки – перемещение захватов испытательной машины после образования шейки является неустойчивой при одноосном нагружении. Обычно выделяется три стадии развития поврежденности при воздействии нагрузки: начальная, основная и завершающая. Эти стадии идентифицируются достаточно успешно методами акустической эмиссии [5]. Условием потери устойчивости соответствует вторая точка перелома на кривой зависимости суммарного количества актов акустической эмиссии от квадратного корня остаточной деформации [5]. Параметры материала ВТ-5 для одноосного растяжения следующие

$$\ln R/R_0 = a_1 \varepsilon + a_2,$$

где R_0 – начальный размер равновесной трещины при достижении напряженно-деформированным состоянием условий зарождения микротрещин, $a_1 = 5$, $a_2 = 0.55$.

В соответствии с [7] для пластического деформирования сдвигом γ с наложенным гидростатическим напряжением с соответствующим сдвигом γ_0 в случае пропорционального нагружения

$$\ln \frac{R}{R_0} = \frac{\gamma - \gamma_0}{2(1-n)} \frac{\text{sh} \left(\frac{(1-n)\sigma_0}{\sigma_i} \right)}{\sigma_i},$$

где σ_0 – шаровая часть тензора напряжений; σ_i – интенсивность напряжений; n – показатель упрочнения для материала со степенным упрочнением, откуда производная R по γ при обозначении $u = \sigma_0/\sigma_i$

$$\begin{aligned} R'_\gamma(\gamma, u) &= \frac{d}{d\gamma} \left\langle R_0 \exp \left\{ \frac{\gamma - \gamma_0}{2(1-n)} \text{sh} \left[(1-n)u \right] \right\} \right\rangle = \\ &= \frac{R_0}{2(1-n)} \text{sh} \left[(1-n)u \right] \exp \left\{ \frac{\gamma - \gamma_0}{2(1-n)} \text{sh} \left[(1-n)u \right] \right\}, \end{aligned}$$

а согласно (2.2.5) в [4] на плоскостях скольжения, где образовались микротрещины

$$F_1 = c_1 \left[\frac{\sigma}{\sigma_L (1-R/a)} - 1 \right]; \quad F'_1 = \frac{c_1}{\sigma_L (1-R/a)},$$

откуда

$$\sigma = \frac{\sqrt{2}(a-R)^2}{aR_0 \frac{\text{sh} \left[(1-n)u \right]}{2(1-n)} \exp \left\{ \frac{\gamma - \gamma_0}{2(1-n)} \text{sh} \left[(1-n)u \right] \right\} \frac{c_1}{\sigma_L (1-R/a)}}.$$

Согласно [5] для материала ВТ-5 взяты следующие значения констант: $R_0 = 0.017$ мм, $a = 0.05$ мм, $c_1 = 0.1$, $\sigma_L = 450$ МПа, $n = 23$, $u = 1/3$.

С помощью кривых распределений дефектов по размерам в зависимости от остаточной деформации были определены базисные значения размеров дефектов. С помощью формулы (1) вычислены напряжения потери устойчивости

пластического деформирования для различных размеров дефектов. Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Остаточная деформация, %	R , мм	$\Delta = 0.75(\varepsilon - \varepsilon_0)$	σ , МПа
11	0.00522	0	613
22	0.0184	0.0715	68
42	0.0281	0.2325	2

2. ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ ОБШИВКИ ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА

С целью исследования процесса разрушения на модели, максимально приближенной к реальной конструкции заклепочного соединения обшивки МС-21, была выбрана пластина толщиной 1.4 мм из алюминиевого сплава 2024-Т3, содержащая развивающиеся навстречу друг другу трещины, зародившиеся, около отверстий диаметром 4 мм, расположенных на расстоянии 20 мм друг от друга. При этом пластина подвергается одноосному растяжению силой в перпендикулярном к трещинам направлении, вызывающей в неповрежденном сечении пластины максимальные напряжения 120 МПа. Для того, чтобы применить критерий, аналогичный (1), в случае трещин возьмем прямую, соединяющую трещины от соседних заклепок. Тогда, если действующая нагрузка ортогональна этому направлению и соответствует оси x , эффективное напряжение будет

$$\sigma_1 = \sigma_0 \left(1 - \frac{L}{a} \right)^{-1},$$

где L – длина трещины. Аналогично модели деформирования тела с микротрещинами, описанной пунктами 5-7 главы 2 в [4], можно определить, что $\varepsilon_0 = \sigma_0 / c_0$ при $\sigma_0 < \sigma_T$, $\sigma_x / \sigma_T = 1 + \varepsilon_x / c_1$ при $\sigma_x > \sigma_T$, где c_0 – касательный модуль кривой деформирования тела без трещин, c_1 – коэффициент пропорциональности кривой деформирования тела с трещинами, σ_T – предел текучести материала.

Для случая заклепочного стыка с называвшимися выше размерами были проведены исследования соответствующей конечно-элементной модели, в ходе которых строились кривые (рис.1), показывающие изменение предложенного в [6] критерия σ_e / e , где σ_e – эффективные напряжения, определяемые как растягивающая модель сила, деленная на площадь проходящего вдоль трещин поперечного сечения модели, еще сохраняющую свою целостность, e – общая деформация модели, определяемая как максимальное смещение ее концов, деленное на исходную длину ненагруженной модели. При этом выяснилось, что данные кривые обнаруживают выраженный максимум в момент, когда происходит смыкание (рис.2) зон пластичности, отмеченных на рисунке штриховкой «в горошек», при вершинах развивающихся навстречу друг другу трещин, после чего быстрое разрушение конструкции оказывается неизбежным. Через σ_a на рис.1 обозначены действующие напряжения, определяемые как

прилагаемая растягивающая сила, деленная на площадь неповрежденного образца.

С целью оценки скорости роста трещины в зависимости от ее длины использовались данные натурных испытаний, по которым были построены графики для ряда образцов, объединенных общим характером разрушения, соответствующим принятому в примененной конечно-элементной модели.

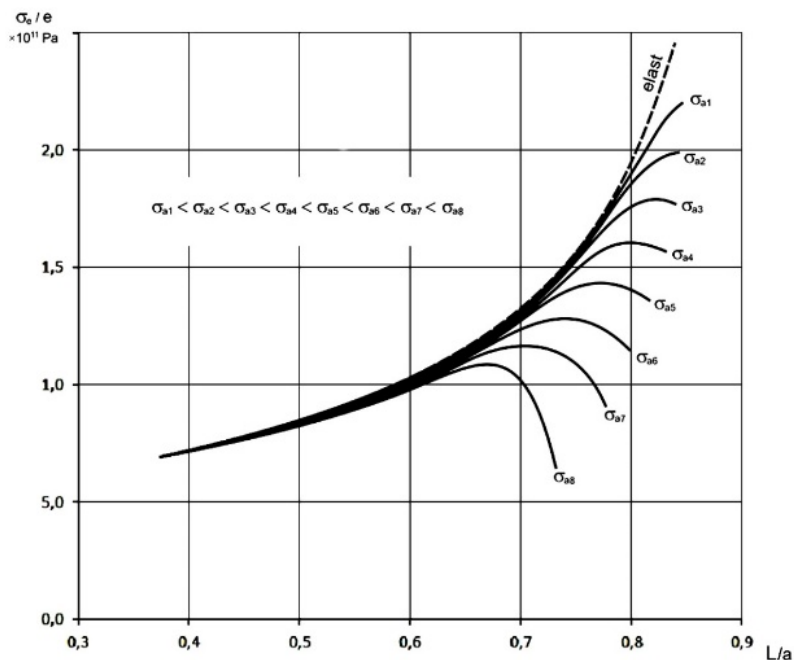


Рис.1. Зависимости отношения σ_e/e от параметра L/a .

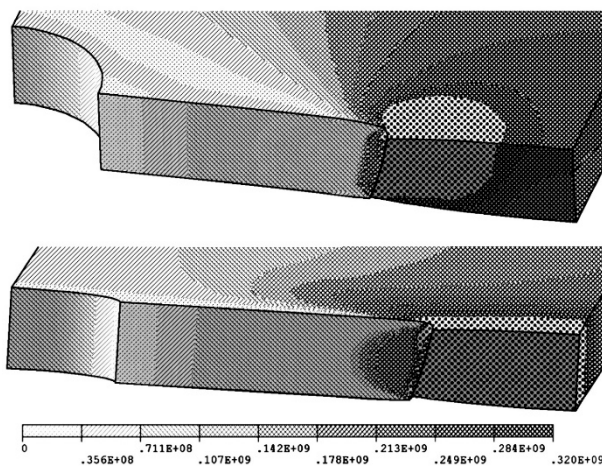


Рис.2. НДС при критическом значении длины трещины.

Для описания этих зависимостей была подобрана линейная эмпирическая формула

$$V_L = 0.025 + 2.2 \cdot 10^{-5} \cdot L,$$

где L задается в мкм, а V_L в мкм/цикл.

Поскольку

$$V_L(L) = dL/dN,$$

где N – число циклов, то можно записать

$$dN = dL/V_L(L),$$

или

$$N = \int \frac{dL}{0.025 + 2.2 \cdot 10^{-5} \cdot L}.$$

Откуда с учетом условия $N(0) = 0$ можно найти

$$N(L) = 45454.5 \cdot \ln(1 + 0.88 \cdot 10^{-3} L).$$

Прилагавшейся в конечноэлементной модели нагрузке в 120 МПа соответствует кривая, которая имеет максимум при $L/a = 0.67$, что означает размерную длину трещины около 5.4 мм и, соответственно, число циклов около $80 \cdot 10^3$.

Принимая во внимание, что в течение определенного числа циклов движения трещины может не происходить, примененное выше выражение для N имеет смысл уточнить в виде

$$N = \int_{N_0}^N \frac{dL}{0.025 + 2.2 \cdot 10^{-5} L}, \quad (2)$$

где N_0 – число циклов, которое образец выдерживает без движения усталостной трещины.

Кроме того, для одноосного нагружения плоской пластины условие неустойчивости, аналогичное (1), записывается в виде

$$\sigma = \frac{(L-a)^2}{aL'F_1' \left[\frac{\sigma}{(1-L/a)} \right]},$$

где a – расстояние между соседними трещинами, идущими от заклепок, в данном случае равно диаметру заклепки, F_1' – закон связи между тензорами напряжений и деформациями в поврежденном материале, L' – скорость роста трещины в поврежденном образце в зависимости от числа циклов усталостного нагружения. Для образцов сплава в нелинейной области

$$\frac{\sigma}{\sigma_T} = 1 + \frac{\varepsilon}{c_1} \quad \text{и} \quad F_1' = \frac{c_1}{\sigma_T},$$

и соответственно, $c_1 = 4.48$. Подставляя значения L' и F_1' в выражение для усталостной кривой, получим

$$\sigma = \frac{(L-a)^2 \sigma_T}{a(0.025 + 2.2 \cdot 10^{-5} L) \cdot 4.48}.$$

Соответственно при $\sigma = 120$ МПа, $\sigma_T = 320$ МПа, $a = 4$ мм получим длину неустойчивой трещины $L_{crit} = 6.659$ мм. Для того, чтобы вырастить трещину такой длины при $\sigma = 120$ МПа по формуле (2) нужно $87 \cdot 10^3$ циклов.

Полученные двумя различающимися способами оценки числа циклов в $80 \cdot 10^3$ и $87 \cdot 10^3$ циклов соответственно, следует рассматривать как достаточно близкие, что говорит в пользу применимости обоих описанных способов. Хотя при этом оба значения оказываются меньше наблюдавшихся в эксперименте. Объяснение этому достаточно очевидно: в рассматриваемых случаях

исследовалась трещина в одиночной пластине, в то время как эксперимент проводился со стыком, включающим в себя две соединяемые пластины и дублеры. Это приводит к перераспределению приложенной нагрузки между всеми элементами стыка, в результате чего на внутреннюю пластину приходится заведомо меньшая часть, чем общее задаваемое напряжение.

Законы роста трещин при других уровнях нагрузок и различных приемах нагружения должны определяться экспериментально. Это связано с ростом микродефектов при различных внешних условиях – температуры, давлении, типа окружающей среды и т.п. Здесь а качестве основного метода определения момента страгивания усталостной трещины можно рекомендовать метод акустической эмиссии [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Batdorf S.B., Budiansky B. *A mathematical theory of plasticity based on the concept of slip* // Tech. Note. NASA. – 1949. – No.1871.
2. Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
3. Христианович С.А. *Деформация упрочняющегося пластического материала* // Изв. АН СССР. МТТ. – 1974. – №2. – С.148-174.
4. Березин А.В. *Влияние повреждений на деформационные и прочностные характеристики твердых тел*. – М.: Наука, 1990. – 135 с.
5. Козинкина А.И. *Особенности акустико-эмиссионного исследования повреждений*. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2015. – 151 с.
6. Березин А.В., Жиркевич В.Ю., Кулемин А.В., Нестеренко Б.Г., Клемяшов А.Г. *Обоснование безопасности эксплуатации конструкций фюзеляжей с многоочаговыми трещинами* // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2018. – №1. – С.69-86.
7. McClintock F.A., Kaplan SM, Berg C.A. *Ductile fracture by hole growth in shear bands* // Intern. J. Fract. Mech. – 1966. – Vol.2. – No.4. – Pp.614-627.

REFERENCES

1. Batdorf S.B., Budiansky B. *A mathematical theory of plasticity based on the concept of slip*. Tech. Note. NASA, 1949, No.1871.
2. Rabotnov J.N. *Polzuchest' ehlementov konstruksij [Creep of structural elements]*. Moskva, Nauka, 1966, 752 p.
3. Khristianovich S.A. *Deformatsiya uprochnyayushhegosya plasticheskogo materiala [Deformation of the hardening plastic material]*. Izvestiya Akademii nauk SSSR, Mekhanika tverdogo tela, 1974, No.2, Pp.148-174.
4. Berezin A.V. *Vliyanie povrezhdenij na deformatsionnye i prochnostnye kharakteristiki tverdykh tel [Influence of damages on deformation and strength characteristics of solids]*. Moskva, Nauka, 1990, 135 p.
5. Kozinkina A.I. *Osobennosti akustiko-ehmissionnogo issledovaniya povrezhdenij [Particularities of the acoustic emission investigation of damages]*. Rostov-na-Donu, Don State Technical University, 2015, 152p.
6. Berezin A.V., Zhirkevich V.Iu., Kulemin A.V., Nesterenko B.G., Klemiashov A.G. *Obosnovanie bezopasnosti ehkspluatatsii konstruksij fyuzelyazhej s mnogoochagovymi treshhinami [The rationale of safety exploitation of fuselage*

structures with multiply site damages]. Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii, 2018, No.1, Pp.69-86.

7. McClintock F.A., Kaplan SM, Berg C.A. *Ductile fracture by hole growth in shear bands*. Intern. J. Fract. Mech., 1966, Vol.2, No.4, Pp.614-627.

Поступила в редакцию 18 сентября 2018 года.

Сведения об авторах:

Березин Александр Васильевич – д.ф.-м.н., проф., гл.н.с., Лаборатория виброакустической диагностики машин, ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия; e-mail: berezin@imash.ru

Жиркевич Василий Юльевич – к.т.н, с.н.с., Лаборатория виброакустической диагностики машин, ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия; e-mail: basiliuss@gmail.com