

Фам Дык Куан, Александр Тимошенко, Антон Бабак, Виктор Коваль

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Актуальность темы исследования. Задачи, которые предъявляются к ответственным деталям на сегодняшний день, – это повышенные требования к прочности, жесткости с уменьшением металлоёмкости за счет усложнения форм конструкции с применением новых сплавов. Развитие технологий в области машиностроения, требует новых подходов в методике расчета и прогнозирования остаточного ресурса ответственных элементов конструкций, как на стадии проектирования, так и во время эксплуатации. Учет влияния вида напряжённого состояния в методиках расчета использующие только данные простых нагрузок, позволит упростить и сократить время для проведения расчетов. Поэтому актуальным является разработка критерия предельного состояния с учетом вида напряженного состояния.

Постановка проблемы. При прогнозировании ресурсов ответственных элементов конструкций с учетом влияния вида напряженного состояния необходимо знать соответствующую кинетику накопления повреждения и критерий предельного состояния. Эти данные можно получить экспериментально для простых нагрузок, таких как растяжение и кручение, но для других видов напряженного состояния является затрудненным.

Анализ последних исследований и публикаций. Были рассмотрены работы многих авторов по решению данной проблемы основанные на разных подходах.

Выделение неисследованных частей общей проблемы. Анализ изменения критической величины повреждения с учетом параметра залечивания и влияния на ее вида напряженного состояния.

Постановка задачи. Разработка критерия предельного состояния для металлических конструкционных материалов с учетом вида напряжённого состояния.

Изложение основного материала. Зависимость предельного значения повреждения от вида напряженного состояния при переходе от растяжения в кручение происходит с помощью параметра Надаи-Лоде. Законом для перехода принято уравнение эллипса, где в роли угла выступает вид напряженного состояния, а главные радиусы эллипса считаются предельные величины повреждения и деформаций при растяжении и кручении. Учет механизма сжатия происходит за чет параметра залечивания

Выводы в соответствии со статьёй. Предложен критерий предельного состояния металлических конструкционных материалов, учитывающий два механизма разрушения: отрыв и срез, вид напряженного состояния и изменение знака осевого усилия.

Ключевые слова: критерий предельного состояния; сложное напряженное состояние; металлические конструкционные материалы; кинетика накопления повреждений.

Рис.: 8. Табл.: 2. Библ.: 10.

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день большое количество ответственных элементов конструкций в машиностроительной, авиастроительной и других инженерных сферах работают в условиях комбинированного нагружения внешними нагрузками, что приводит к возникновению в них сложного напряженного состояния. При этом для оценки несущей способности используются методы, которые основаны на анализе возникающих в опасной зоне напряжений и деформаций.

Постановка проблемы. Однако на сегодня существующие методики качественной и количественной оценки предельного состояния конструкционных материалов и элементов конструкций на стадии зарождения макротрещины трудоёмкие и сложны в расчетах либо они пригодны только для конкретной марки материала.

Анализ последних исследований и публикаций. Так же много авторов занимались проблемой определения кинетики накопления повреждений и создания модели [1; 2; 3; 4] и критериев предельного состояния.

Выделение неисследованных ранее частей общей проблемы. Исходя из этого, актуальным остаётся разработка критерия предельного состояния с учетом повреждаемости при сложном напряжённом состоянии для металлических конструкционных материалов.

Постановка задачи. Разработка критерия предельного состояния для металлических конструкционных материалов с учетом вида напряжённого состояния.

Изложение основного материала. В роли параметра вида напряженного состояния было принято использовать параметр Надаи-Лоде, который определяется по формуле:

$$\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3, \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Данный параметр позволяет описать не только вид напряженного состояния и влияние второго главного напряжения, но и учитывает скольжение, как один из механизмов пластического деформирования. Он указывает на влияние двух других экстремальных касательных напряжений [5]:

$$\tau_{23} = (\sigma_2 - \sigma_3)/2; \tau_{12} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2.$$

Достоинством такого подхода является возможность описания напряженно-деформированного состояния для различных материалов на основании обобщенной диаграммы Мора. Известно, что при одноосном растяжении $\mu = -1$, при кручении $\mu = 0$, а при сжатии $\mu = 1$. Это означает, что роль площадок с касательными напряжениями при $\mu = -1$ по сравнению с $\mu = 0$ возрастает [5].

По аналогии с подходом Давиденко-Фридмана [6], в работе было предложено три варианта построения кривых изменения критической величины поврежденности от функции вида напряженного состояния $f(\mu)$, которые учитывают два механизма разрушения, как показано на рис. 1.

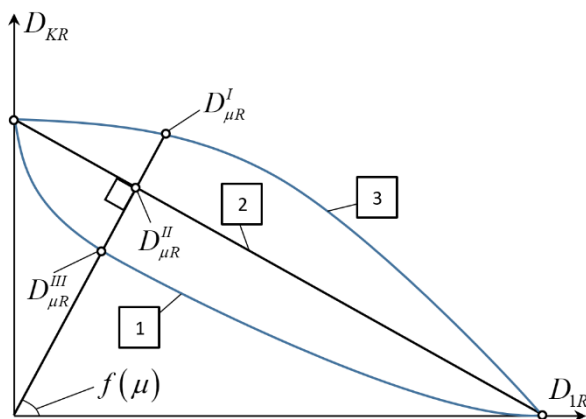


Рис. 1. Варианты изменения критической величины поврежденности в зависимости от функции влияния вида напряженного состояния:

1 – вогнутое криволинейное изменение; 2 – линейное изменение; 3 – выпуклое криволинейное изменение

На основе анализа экспериментальных данных, полученных при простом растяжении, было установлено, что при растяжении критическая величина поврежденности D_{1R} , которая соответствует моменту разрушения, принимает максимальное значение, величина поврежденности при кручении D_{KR} – минимальное, а значения параметра поврежденности, полученные при комбинированном (одновременное действие растяжения и кручения) нагружении находятся между этими двумя величинами.

При сложном напряжённом состоянии накопление повреждений в материале происходит вследствие одновременного действия механизмов отрыва и сдвига, но разрушение образца происходит именно за счёт преобладающего среди них. Таким образом, критическая величина поврежденности $D_{\mu R}$ при сложном напряженном состоянии будет принимать значение в пределах:

$$\begin{cases} D_{KR} \leq D_{\mu R} \leq D_{1R}, \text{ при } \mu \geq 0 \\ D_{KR} \leq D_{\mu R} \leq D_{-1R}, \text{ при } \mu \leq 0, D_{KR} \leq D_{-1R} \\ D_{KR} \geq D_{\mu R} \geq D_{-1R}, \text{ при } \mu \leq 0, D_{KR} \geq D_{-1R} \end{cases} \quad (2)$$

Из кривой 1 на рис. 1, следует, что:

$$\begin{cases} D_{\mu R}^I \leq D_{KR} \leq D_{1R}, \text{ при } \mu \geq 0 \\ D_{\mu R}^I \leq D_{KR} \leq D_{-1R}, \text{ при } \mu \leq 0, D_{KR} \leq D_{-1R} \\ D_{\mu R}^I \geq D_{KR} \geq D_{-1R}, \text{ при } \mu \leq 0, D_{KR} \geq D_{-1R} \end{cases} \quad (3)$$

Значение параметра залечивания для некоторых металлических конструкционных материалов, представленных в работе [9; 10], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина параметра залечивания для некоторых металлических конструкционных материалов

Материал	Параметр h
Сталь 45	0,42...0,47
12X18H10T	0,56...0,66
BT22	0,39...0,48
Д16Т	0,26...0,36

Введем параметр, который будет учитывать знак продольного усилия при комбинации нагрузок, соответствующих растяжению, сжатию и кручению:

$$k = \frac{-\mu}{|\mu|}. \quad (8)$$

Данный параметр может принимать только два значения: 1 при напряжённом состоянии, которое соответствует комбинации растяжения и кручения, -1 при напряжённом состоянии соответствующем комбинации сжатия и кручения.

Учитывая формулу (7) и параметр (8), получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} D = D_{1R}, k = 1; \\ D = h \cdot D_{1R}, k = -1. \end{cases} \quad (9)$$

Перепишем систему (9), в виде уравнения прямой в координатах $D - k$:

$$\frac{D - D_{1R}}{h \cdot D_{1R} - D_{1R}} = \frac{k - 1}{-1 - 1}. \quad (10)$$

В результате преобразования уравнения (10) получим:

$$D = D_{1R} \left[\frac{(k-1)(h-1)}{-2} + 1 \right]. \quad (11)$$

Поскольку параметр Надаи-Люде принимает значения в диапазоне от -1 до 1, в первом приближении, опишем функцию вида напряженного состояния $f(\mu)$ с помощью арккосинуса этого параметра, как представлено на рис. 3.

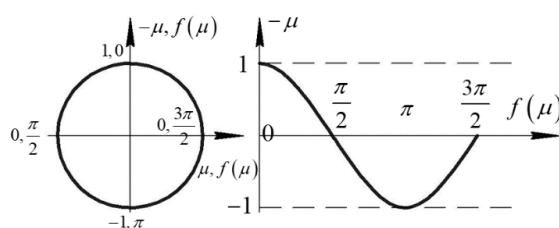


Рис. 3. Зависимость параметра Надаи-Люде от функции вида напряженного состояния

Аналитически это можно записать следующим образом:

$$f(\mu) = \arccos(-\mu). \quad (12)$$

Подставим уравнения (11) и (12) в первое уравнение системы (5), окончательно получим:

$$D_{1R} = \frac{D_{1R} \left[\frac{(k-1)(h-1)}{-2} + 1 \right] \cdot D_{KR}}{\sqrt{D_{KR}^2 \cdot \cos^2 \arccos(-\mu) + \left\{ D_{1R} \left[\frac{(k-1)(h-1)}{-2} + 1 \right] \right\}^2 \cdot \sin^2 \arccos(-\mu)}}. \quad (13)$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Уравнение (13) полностью описывает фигуру – С на рис. 2 и позволяет определять критическую величину повреждаемости в зависимости от вида напряжённого состояния и значения параметра залечивания материала.

Аналогичным образом можно получить эллипс (рис. 4), который описывает критическое значение интенсивности деформаций в зависимости от вида напряжённого состояния.

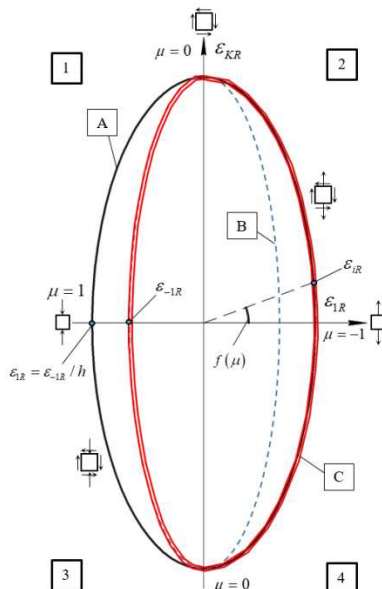


Рис. 4. Зависимость критической величины интенсивности деформаций от функции вида напряжённого состояния

Соответственно, уравнение зависимости критического значения интенсивности деформаций от вида напряжённого состояния, может быть записано как:

$$\epsilon_{1R} = \frac{\epsilon_{KR} \left[\frac{(k-1)(h-1)}{-2} + 1 \right]}{\sqrt{\epsilon_{KR}^2 \cdot \cos^2 \arccos(-\mu) + \left\{ \epsilon_{1R} \left[\frac{(k-1)(h-1)}{-2} + 1 \right] \right\}^2 \cdot \sin^2 \arccos(-\mu)}} \quad (14)$$

Уравнения (13) и (14) демонстрируют зависимости критической величины параметра поврежденности и интенсивности деформаций от вида напряжённого состояния при этом графически они могут быть представлены как показано на рис. 5.

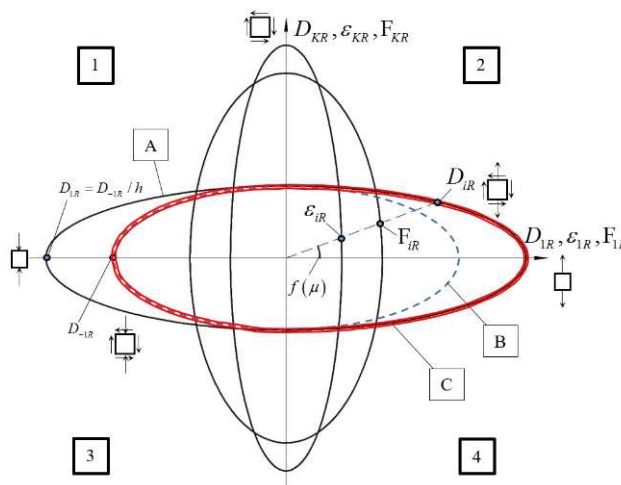


Рис. 5. Зависимость критической величины поврежденности и интенсивности необратимых деформаций от функции вида напряжённого состояния

В работе [7] для материалов Д16Т, 30ХГСА и 12Х18Н10Т были экспериментально установлены критические величины параметра поврежденности в случае простого растяжения и кручения, которые приведены в табл. 2

Таблица 2

Критические величины параметра поврежденности и интенсивности деформаций при растяжении и кручении для материалов Д16Т, 30ХГСА и 12Х18Н10Т

Материал	Д16Т	30ХГСА	12Х18Н10Т
D_{1R}	0,083	0,350	0,475
ε_{1R}	0,066	0,235	0,748
D_{KR}	0,022	0,0151	0,067
ε_{KR}	0,189	0,742	1,057

Используя экспериментальные данные, приведенные в табл. 2 и уравнении (15), получим зависимость критической величины поврежденности от интенсивности деформаций с учетом вида напряжённого состояния для материалов Д16Т, 30ХГСА и 12Х18Н10Т. Графически эти зависимости представлены на рис. 6–8 соответственно, где D_i – скалярная величина повреждаемости.

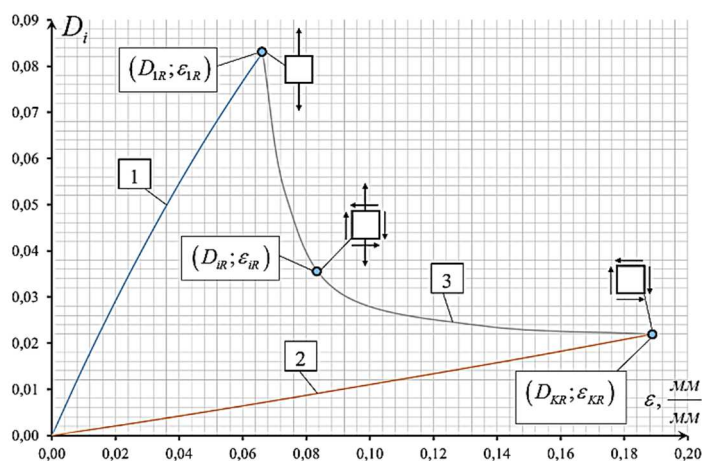


Рис. 6. Зависимость критической величины параметра поврежденности от интенсивности деформаций с учетом влияния вида напряженного состояния для Д16Т

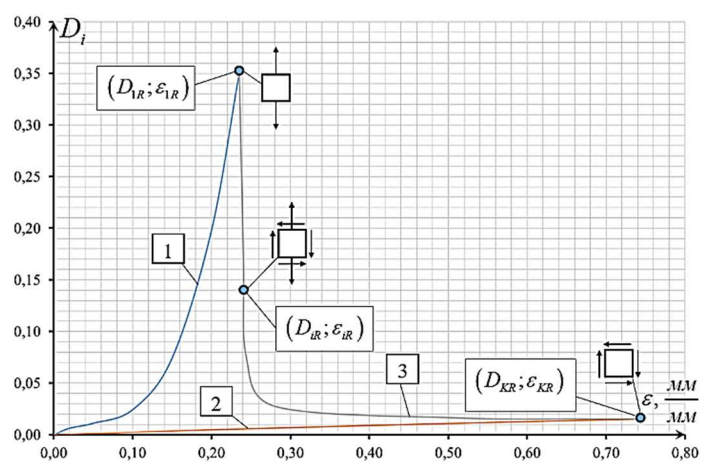


Рис. 7. Зависимость критической величины параметра поврежденности от интенсивности деформаций с учетом влияния вида напряженного состояния для 30ХГСА

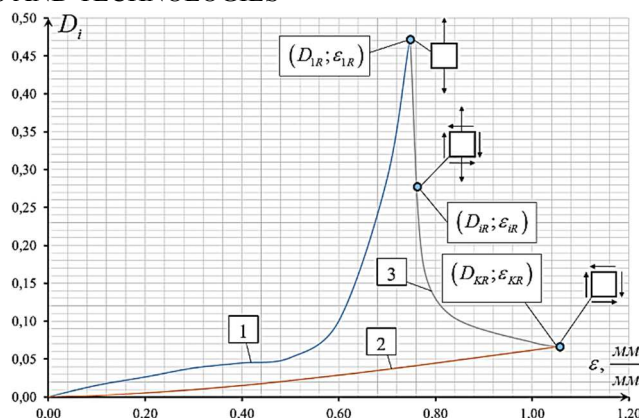


Рис. 8. Зависимость критической величины параметра поврежденности от интенсивности деформаций с учетом влияния вида напряженного состояния для 12X18H10T

Выводы в соответствии со статьей. На основании подхода Давиденко-Фридмана для металлических конструкционных материалов был предложен критерий предельного состояния, учитывающий два механизма разрушения отрывом и срезом, который позволяет оценить прочность конструкции по параметру поврежденности. При этом с помощью введения в рассмотрение параметра залечивания учитывается влияние изменения знака осевой нагрузки. Используя предложенный критерий для 12X18H10T, 30ХГСА и Д16Т были получены расчетные кривые зависимости критического значения параметра поврежденности от величины предельной деформации.

Список использованных источников

1. *Lemaitre J. Engineering Damage Mechan Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures* / J. Lemaitre, R. Desmorat. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 372 с.
2. *Комплексная оценка повреждаемости материала при пластическом деформировании* / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич, С. А. Недосека // Проблемы прочности. – 1996. – № 5. – С. 23–30.
3. *Лебедев А. О. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости* / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Проблемы прочности. – 2002. – № 4. – С. 5–12.
4. *Bonora N. On the effect of triaxial state of stress on ductility using nonlinear CDM model* / N. Bonora // International journal of Fatigue. – 1997. – № 88. – P. 359–371.
5. *К вопросу построения предельной поверхности прочности торфяных структурных систем* / Б. Ф. Зюзин, В. А. Мироно, А. Б. Зюзин, С. А. Юдин // Вестник ТвГТУ. – 2014. – Вып. 26, № 2. – С. 41–50.
6. *Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии* / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К. : Наукова думка, 1976. – 416 с.
7. *Грабовський А. П. Кінетика розсіяного руйнування конструкційних матеріалів при крученні* / А. П. Грабовський, О. В. Тимошенко, О. П. Халімон // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов международной научно-технической конференции. – 2007. – Вып. 33. – С. 213–217.
8. *Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics* / Jean Lemaitre. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1996. – 228 с.
9. *Оцінка кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах в умовах пружно-пластичного стискання* / А. П. Грабовський, О. П. Халімон, О. В. Тимошенко, Ф. Лаугвітц // Вестник НТУУ КПИ. Машиностроение. – 2005. – № 46. – С. 28–30.
10. *Грабовський А. П. О кинетике деформационного накопления повреждений в конструкционных материалах при переменном деформировании* / А. П. Грабовский, А. В. Тимошенко, О. П. Халимон // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сборник научных трудов. – 2005. – Вып. 30. – С. 75–80.

References

1. Lemaitre, J. A. (2005). *Engineering Damage Mechan Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
2. Lebedev, A. A., Chausov, N. H. , Bohynych, Y. O. and Nedoseka, S. A. (1996). Kompleksnaia otsenka povrezhdaemosti materiala pri plasticheskom deformirovanii [Complex assessment of material damage during plastic deformation]. *Problemy prochnosti – Strength problems*, 5, 23–30 [in Russian].
3. Lebedev, A. O., Muzyka, M. R. and Volchek, N. L. (2002). Opredelenie povrezhdennosti konstruktsionnykh materialov po parametram rasseianiia kharakteristik tverdosti [Determination of damage for structural materials from the parameters of scattering of hardness characteristics]. *Problemy prochnosti – Strength problems*, 4, 5–12 [in Russian].
4. Bonora, N. (1997). On the effect of triaxial state of stress on ductility using nonlinear CDM model. *Internation journal of Fatigue*, 88, 359–371 [in English].
5. Ziuzin, B. F., Mironov, V. A., Ziuzin, A. B. and Iudin S. A. (2014). K voprosu postroeniia predelnoi poverkhnosti prochnosti torfianykh strukturnykh system [To the question of constructing the ultimate surface strength of peat structural systems]. *Vestnik TvGTU – Bulletin of the TSTU*, 2 (26), 41–50 [in Russian].
6. Pisarenko, G. S. and Lebedev, A. A. (1976). *Deformirovanie i prochnost materialov pri slozhnom napriazhenom sostoianii [Deformation and Strength of Materials in Complex Stress State]*. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
7. Hrabovskyi, A. P., Tymoshenko, O. V. and Khalimon, O. P. (2007). Kinetyka rozsiianoho ruinuvannia konstruktsiinykh materialiv pry kruchenni [Kinetics of scattered destruction of structural materials in torsion]. *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka – Mechanical engineering and technosphere of the XXI century. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*, 33, 213–217 [in Ukrainian].
8. Lemaitre, J. A. (1996). *Course on Damage Mechanics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
9. Hrabovskyi, A. P., Khalimon, O. P., Tymoshenko, O. V. and Lauhvits, F. (2005). Otsinka kinetyky nakopychennia poskodzhen v konstruktsiinykh materialakh v umovakh pruzhno-plastychnoho styskannia [Estimation of kinetics of accumulation of damages in structural materials under conditions of elastic-plastic compression]. *Vestnik NTUU KPY. Mashynostroenie – Bulletin of the NTUU «KPI», series «Mechanical engineering*, 46, 28–30 [in Russian].
10. Hrabovskyi, A. P., Tymoshenko, O. V. and Khalimon, O. P. (2005). O kinetike deformatcionnogo nakopleniia povrezhdenii v konstruktsionnykh materialakh pri peremennom deformirovanii [On the kinetics of deformation accumulation of damages in structural materials with variable deformation]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia – Progressive technologies and systems of mechanical engineering. International collection of scientific works*, 30, 75–80 [in Russian].

UDC 539

Pham Duc Quan, Oleksandr Tymoshenko, Anton Babak, Viktor Koval

DAMAGEABILITY OF METALLIC MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT THE STRESS STATE

Urgency of the research. Rapid development in the field of mechanical engineering, requires new techniques for predicting the residual resource of responsible structural elements, both at the design stages and during exploitation. Accounting for the influence of the type of stress state in techniques that use only data of simple load will increase the reliability of calculations. Therefore, it is urgent to develop a criterion for the limiting state with allowance the stressed state.

Target setting. When predicting the resources of the responsible structural elements, taking into account the influence of the stress state, it is necessary to know the corresponding kinetics of damage accumulation and the criterion of the limiting state. These data can be easily obtained experimentally for simple loads, such as tension and torsion test, but it is difficult for other types of stress state.

Actual scientific researches and issues analysis. Numerous works a solving this problem based on different approaches were considered.

Uninvestigated parts of general matters defining. Analysis of the change in the critical value of damage with regard to the healing parameter and the influence of the type of stress state.

The research objective. Development of the limit state criterion for metal structural materials taking into account the type of stress state.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

The statement of basic materials. The dependence of the limiting value of the damage on the stressed state from tension to torsion occurs with the aid of the Nadai-Lode parameter. The law of change was taken by ellipse equation is adopted, where the angle is the form of the stressed state, and the main radius of the ellipse are the limiting values of damage and deformations in the case of tension and torsion. The compression mechanism is accounted for by the parameter of healing.

Conclusions. Criterion for the limiting state of metallic structural materials with allowance for the stress state are proposed, based on the analysis of the experimental data of the critical value of the damage under two different mechanisms of failure, separation and shearing.

Keywords: criterion of the limiting state; complex stress state; metallic structural materials; kinetics of damage accumulation.
Fig.: 8. Table: 2. References: 10.

УДК 539

Фам Дик Куан, Олександр Тимошенко, Антон Бабак, Віктор Коваль
**ПОШКОДЖУВАНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З УРАХУВАННЯМ
ВИДУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ**

Актуальність теми дослідження. Стрімкий розвиток у галузі машинобудування вимагає нових методів прогнозування залишкового ресурсу відповідальних елементів конструкцій як на стадії проектування, так і під час експлуатації. Врахування впливу виду напруженого стану в методах, які використовують тільки дані простих навантажень, дозволить підвищити достовірність розрахунків. Тому актуальним є розробка критерію граничного стану з урахуванням виду напруженого стану.

Постановка проблеми. У процесі прогнозування ресурсу відповідальних елементів конструкцій з урахуванням впливу виду напруженого стану необхідно знати відповідні кінетику накопичення пошкодження і критерій граничного стану. Ці дані можна легко отримати експериментально для простих навантажень, таких як розтяг і крутіння, але для інших видів напруженого стану є важким.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Було розглянуто велику кількість робіт авторів щодо вирішення цієї проблеми, які ґрунтуються на різних підходах.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз зміни критичної величини пошкоджуваності з урахуванням параметра заліковування і вплив виду напруженого стану.

Постановка завдання. Розробка критерію граничного стану для металевих конструкційних матеріалів з урахуванням виду напруженого стану.

Виклад основного матеріалу. Залежність граничного значення пошкодження від виду напруженого стану при переході від розтягу в кручення відбувається за допомогою параметра Надаї-Лодє. Законом переходу прийнято рівняння еліпса, де в ролі кута виступає вид напруженого стану, а головні радіуси еліпса вважаються граничними величинами пошкодження і деформацій під час розтягу і кручення. Врахування механізму стиснення відбувається за рахунок параметра заліковування.

Висновки відповідно до статті. Запропоновано критерії граничного стану металевих конструкційних матеріалів з урахуванням виду напруженого стану, який оснований на аналізі експериментальних даних критичної величини пошкодження при двох різних механізмах руйнування, відриві й зрізі.

Ключові слова: критерій граничного стану; складний напружений стан; металеві конструкційні матеріали; кінетика накопичення пошкодження.

Рис.: 8. Табл.: 2. Бібл.: 10.

Фам Дык Куан – аспірант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Фам Дик Куан – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Pham Duc Quan – PhD student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Victory Av., 03056 Kiev, Ukraine).

E-mail: famquan1992@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5000-1138>

Тимошенко Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Тимошенко Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Tymoshenko Oleksandr – PhD in Technical Sciences, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Victory Av., 03056 Kiev, Ukraine).

E-mail: timosaha@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5000-1138>

ScopusAuthorID: 12791413500

Бабак Антон Николаевич – аспірант, ассистент кафедры ДПМ и СМ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Бабак Антон Миколайович – аспірант, асистент кафедри ДММ та ОМ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Babak Anton – PhD student, assistant of Department of CMD and SM, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Victory Av., 03056 Kiev, Ukraine).

E-mail: sopromat_dpm@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5088-5578>

ResearcherID: L-4659-2018

Коваль Віктор Вікторович – аспірант, асистент кафедри ДПМ і СМ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, г. Київ, 03056, Україна).

Коваль Віктор Вікторович – аспірант, асистент кафедри ДММ та ОМ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Koval Viktor – PhD student, assistant of Department of CMD and SM, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Victory Av., 03056 Kiev, Ukraine).

E-mail: department_5@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5605-7805>

ResearcherID: L-4647-2018

Scopus Author ID: 57196002672