

УДК 629.735.33.02.018.4

doi: 10.32620/aktt.2022.1.06

Б. П. КАЛІНІН

Державне підприємство «Харківське агрегатно-конструкторське бюро», Україна

ОЦІНКА ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ПРИ АСИМЕТРИЧНОМУ ЦИКЛІ НАВАНТАЖЕННЯ

Об'єктом вивчення у статті є окремі деталі авіаційних агрегатів, навантаження на які змінюються за часом. Як предмет вивчення виступають моделі, що описують втомну стійкість при асиметричних навантаженнях. **Метою** є розроблення досить простої інженерної методики виявлення деталей авіаційних агрегатів, що працюють при асиметричному циклі навантаження. **Завдання:** загальний аналіз можливих підходів до розрахункових циклів руйнування деталей авіаційних агрегатів; забезпечення працездатності при асиметричному циклі навантаження; сформувані розрахункові методи для практичного використання, визначити межу витривалості при симетричному циклі навантаження для сталей та алюмінієвих сплавів, що застосовуються в авіаційних агрегатах; розрахунок максимальної інтенсивності асиметричного циклу. **Методи,** що використовуються: інженерний аналіз методів побудови кривої втоми при асиметричному циклі навантаження; розрахунок межі витривалості при симетричному циклі зміни з урахуванням залежності від властивостей матеріалів за результатами експериментального відбору та розрахунок межі витривалості матеріалів; метод скінченних елементів для розрахунків із використанням програмного пакету Simulation Solidworks. **Отримано** наступні результати: обрано рівняння для формування кривої витривалості при асиметричному циклі зміни напружень, заданих механічних властивостей сталей та алюмінієвих сплавів, що застосовуються в авіаційних агрегатах; обрані розрахунки граничної величини асиметричного коливання циклу; запропоновано метод визначення констант рівняння Вейбулла для кривої втоми при асиметричному циклі навантаження. **Висновок:** розроблено інженерну методику визначення витривалості деталей авіаційних агрегатів, що працюють при навантаженнях, що асиметричним змінюються за часом.

Ключові слова: втомна міцність; межа витривалості; асиметричний цикл; крива втоми; довговічність; рівняння Вейбулла.

Вступ

Основним видом навантаження більшості деталей авіаційних агрегатів є нестационарне навантаження, що характеризується зміною напруження за часом.

Метою даної роботи є розробка досить простої інженерної методики розрахунку довговічності деталей авіаційних агрегатів, що працюють при асиметричному циклі навантаження. Довговічність деталей при напруженнях, змінних за часом, визначається як рівнем та характером зміни напружень, так і кривою втоми.

Типова крива втоми [1] наведена на рис. 1. Вона має три характерні області: I – область квазістатичної руйнації, II – область малоциклової втоми, III – область багатоциклової втоми.

Орієнтовні діапазони ділянок кривої втоми [1, 2]: квазістатична руйнація – до $N = 5 \cdot 10^2$, малоциклова втома – $N = (5 \cdot 10^2 \div 10^4)$, багатоциклова втома $N > 10^4$.

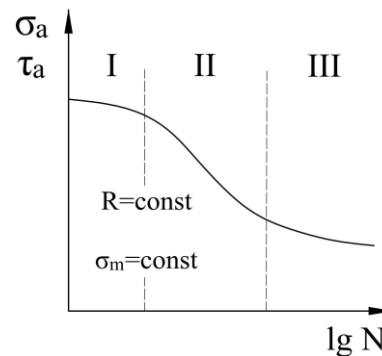


Рис. 1. Типова крива втоми

У силу складності випробувань експериментальні криві втоми більшості матеріалів отримані для симетричного циклу зміни напружень, причому ці криві є далеко не для всіх матеріалів.

Відомий ряд залежностей, що описують криві втоми для симетричного циклу зміни напружень, наведених, зокрема, у роботах [3, 4].

Насправді у переважній більшості випадків деталі авіаційних агрегатів навантажені за асиметричним циклом зміни напружень. Оцінити їх

довговічність за експериментальними кривими неможливо внаслідок відсутності таких для кожного конкретного виду і рівня навантаження.

Тому актуальним є завдання розрахункової оцінки довговічності при асиметричному циклі навантаження.

1. Моделі накопичення втомних ушкоджень

Відомі рівняння, що описують криву втоми в багатоцикловій області для конкретних умов навантаження, наприклад, [5], використовувати які для інших умов неможливо.

Для опису кривих втоми для будь-яких умов навантаження використовуються рівняння, що ґрунтуються на різних моделях накопичення втомних ушкоджень. Найбільш поширені з них деформаційні та структурні моделі.

Деформаційні моделі розглянуто в роботах С. С. Менсона, Л. Ф. Коффіна [6], В. В. Матвєєва [7] та ін.

Для практичних інженерних розрахунків використання даних моделей утруднено, оскільки для обчислень потрібен ряд констант та коефіцієнтів, величини яких мають бути визначені експериментально.

Структурні моделі поділяються на два типи: імовірісно-статистичні та структурно-фізичні. Найбільш широко відоме рівняння кривої втоми Вейбула [8, 9], розроблене на основі імовірісно-статистичної моделі:

$$\lg[(\sigma - \sigma_R) / (\sigma_v - \sigma_R)] = a - b \cdot \lg(N + B), \quad (1)$$

де σ_v – межа міцності матеріалу; N – кількість циклів до руйнування при максимальному напруженні циклу σ ; σ_R – межа витривалості при асиметричному циклі навантаження (максимальне за абсолютним значенням циклу, при якому не відбувається втомне руйнування до $N = N_\infty$); a , b , B – константи. Для розрахунків багатоциклової втоми величина B практично без шкоди для точності може бути прийнята рівною нулю.

Межа витривалості при асиметричному циклі навантаження:

$$\sigma_R = \sigma_a + \sigma_m, \quad (2)$$

де σ_a – гранична амплітуда циклу; σ_m – середнє напруження циклу.

Гранична амплітуда циклу може бути визначена за діаграмою граничних амплітуд циклу (рис. 2) – графіку, що характеризує залежність між

значеннями граничних амплітуд і значеннями середнього напруження циклу для заданої довговічності.

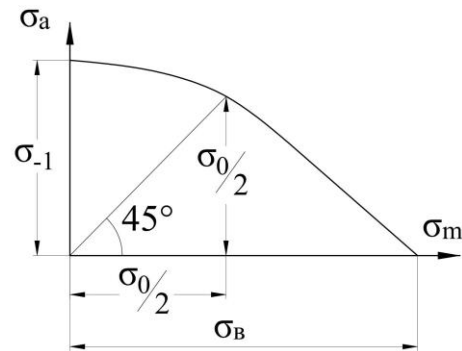


Рис. 2. Діаграма граничних амплітуд циклу

Існує кілька способів побудови схематизованої діаграми граничних амплітуд [2, 8 – 10]: модифіковане рівняння Гудмана, рівняння Гербера, залежності Зодерберга, Кінасошвілі та ін.

Для сталей та алюмінієвих сплавів прийнятні результати дає розрахунок за рівняннями Гудмана та Гербера.

Модифіковане рівняння Гудмана є прямою лінією, що описується залежністю:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \cdot [1 - \sigma_m / \sigma_v], \quad (3)$$

де σ_{-1} – межа витривалості при симетричному циклі навантаження.

Рівняння Гербера записується у вигляді

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \cdot [1 - (\sigma_m / \sigma_v)^2]. \quad (4)$$

2. Емпіричні залежності для розрахунку межі витривалості

Унаслідок складності випробувань для багатьох матеріалів немає експериментальних даних за витривалістю при симетричному циклі навантаження. Ситуація ускладнюється також тим, що механічні властивості матеріалів значною мірою залежать від виду та параметрів термообробки. У таких умовах найчастіше величину межі витривалості визначають розрахунковим шляхом.

Запропоновано велику кількість емпіричних залежностей, що дозволяють розрахувати межу витривалості за відомими механічними властивостями матеріалу [11 – 15].

З метою оцінки можливості практичного застосування цих залежностей було виконано розрахунки для матеріалів, межу витривалості яких встановлено експериментально. У результаті було визначено залежності, що дають прийнятні

результати. Для меж витривалості при розтягуванні-стисканні та симетричному циклі навантаження це наступні співвідношення:

- вуглецеві сталі:

$$\sigma_{-1} = 1,13 \cdot \sigma_v^{0,85} . \quad (5)$$

- леговані сталі:

$$\sigma_{-1} = 2,02 \cdot \sigma_v^{0,777} ; \quad (6)$$

- алюмінієві сплави, що деформуються:

$$\sigma_{-1} = 3,33 \cdot \sigma_v^{0,63} . \quad (7)$$

Результати розрахунків за формулами (5) – (7) для деяких матеріалів та порівняння з даними спеціальних довідників наведені у таблиці 1.

Для меж витривалості при змінному крученні та симетричному циклі навантаження прийнятні результати дає розрахунок за такими формулами:

- вуглецеві сталі:

$$\tau_{-1} = 0,738 \cdot \sigma_v^{0,85} ; \quad (8)$$

- леговані сталі:

$$\tau_{-1} = 1,333 \cdot \sigma_v^{0,777} ; \quad (9)$$

- алюмінієві сплави, що деформуються:

$$\tau_{-1} = 2,09 \cdot \sigma_v^{0,63} . \quad (10)$$

3. Інженерна методика розрахунку довговічності деталей авіаційних агрегатів

Для побудови кривої втоми за рівнянням Вейбула (1) потрібні значення констант а та b, щоб визначити необхідні дві точки на кривій втоми.

У принципі ці дві точки відомі:

точка 1 – статичне руйнування: $\sigma = \sigma_v$, $N = 0$;

точка 2 – межа витривалості: $\sigma = \sigma_R$, $N = N_{\text{баз}}$ – відповідає базовій кількості циклів. Проте внаслідок невизначеності значень логарифмічної функції у цих точках використовувати їх для визначення констант рівняння Вейбула неможливо.

Без особливої шкоди для точності розрахунків як визначальні точки для розрахунку констант а і b рівняння (1) може бути прийнято:

Точку 1: $\sigma_1 = \sigma_v - \delta_{\sigma 1}$, $N = N_1$,

де $N_1 = 5 \cdot 10^2$ – граничне значення кількості циклів для квазістатичної області кривої втоми;

$\delta_{\sigma 1}$ – значення зниження напруги в квазістатичній області, що приймається;

Точку 2: $\sigma_2 = \sigma_R + \delta_{\sigma 2}$, $N = N_{\text{баз}}$,

де $\delta_{\sigma 2}$ – значення перевищення розрахункової межі витривалості від фактичного; щоб не внести значну похибку до розрахунків слід приймати величину $\delta_{\sigma 2}$ не більше ніж 0,1 % від величини межі втоми.

Записавши співвідношення (1) для точок 1, 2, отримаємо систему рівнянь, після розв'язання якої визначаються константи а і b рівняння Вейбула.

Оцінка довговічності деталі при асиметричному циклі навантаження проводиться в наступній послідовності:

- визначається за довідковими даними або розраховується за формулами (5) – (10) межа витривалості при симетричному циклі навантаження;

- за рівнянням (3) або (4) розраховується величина граничної амплітуди;

- визначається межа витривалості при асиметричному циклі (співвідношення (2));

- визначаються константи а та b рівняння Вейбула;

- будується крива втоми та за заданим значенням максимальної напруги циклу визначається кількість циклів до руйнування.

Таблиця 1

Порівняння розрахунків меж витривалості з довідковими даними

Матеріал	σ_v , МПа	σ_{-1} , МПа		Похибка розрахунку, %
		Розрахунок	Довідкові дані	
Сталь 20	430	195,7	225	-13
Сталь 12ХН2	740	342,5	323	6
Сталь 20ХН	550	272	320	-15
Сталь 38ХНЗМФА	1030	442,9	412	7,5
Сталь 45Г2	1570	614,6	686	-10,4
Алюміній АК8	420	149,6	135	10,8

На рис. 3 наведена розрахована за описаним алгоритмом крива втоми для деталі зі сталі 45Г2, що працює в умовах асиметричного циклу навантаження з параметрами:

$$\sigma_1 = 100 \text{ МПа}, \sigma_2 = 1250 \text{ МПа}.$$

Кількість циклів до руйнування становила

$$N_{rz} = 44000.$$

Висновки

1. Виконано аналіз формул для розрахунку межі витривалості при симетричному циклі навантаження.
2. Запропоновано спосіб визначення констант рівняння Вейбула.
3. Запропоновано інженерну методику для наближеного розрахунку довговічності деталей авіаційних агрегатів, що працюють в умовах асиметричного циклу навантаження.
4. Надалі необхідно виконати випробування, за результатами експериментів побудувати криві втоми при асиметричному навантаженні та оцінити точність розрахунків за запропонованою методикою.

Література

1. Сосновский, Л. А. О полной кривой усталости [Текст] / П. А. Сосновский, Е. С. Таранова, С. А. Тюрин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 2. – С. 41-49.
2. Троценко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов [Текст] : справочник /

В. Т. Троценко, П. А. Сосновский. – Киев : Наукова Думка, 1987. – 1256 с.

3. Bai, Y. Chapter 26 – Fatigue Loading and Stresses [Text] / Y. Bai, W.-L. Jin // Marine Structural Design (Second Edition). – 2016. – P. 509-525. DOI: 10.1016/B978-0-08-099997-5.00026-5.

4. Fatigue Life Analysis of Aluminum Wheels by Simulation of Rotary Fatigue Test [Text] / L. Wang, Y. Chen, C. Wang, Q. Wang // Journal of Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 57. – P. 31-39. DOI: 10.5545/sv-jme.2009.046.

5. Gajdoš, L. Fracture Mechanics Based Analysis of the Fatigue Life of Defective Welded Joints [Text] / L. Gajdoš, M. Šperl // Materials Transactions. – 2020. – Vol. 61, Iss. 5. – P. 926-934. DOI: 10.2320/matertrans.MT-M2019258.

6. Усталость и выносливость металлов [Текст] : Сб. статей / Под ред. Г. В. Ужика. – М. : Изд. Иностран. лит., 1963. – 497 с.

7. Матвеев, В. В. К обоснованию использования деформационных критериев многоциклового усталостного разрушения металлов [Текст] / В. В. Матвеев // Проблемы прочности. – 1995. – № 5. – С. 3-12.

8. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.

9. Вейбул, В. Усталостные испытания и анализ их результатов [Текст] / В. Вейбул. – М. : Машигиз. 1964. – 310 с.

10. Application of the S-N Curve Mean Stress Correction Model in Terms of Fatigue Life Estimation for Random Torsional Loading for Selected Aluminum Alloys [Text] / M. Böhm, K. Kluger, S. Pochwała, M. Kupina // Materials. – 2020. – Vol. 13, Iss. 13. – Article No. 2985. – 16 p. DOI: 10.3390/ma13132985.

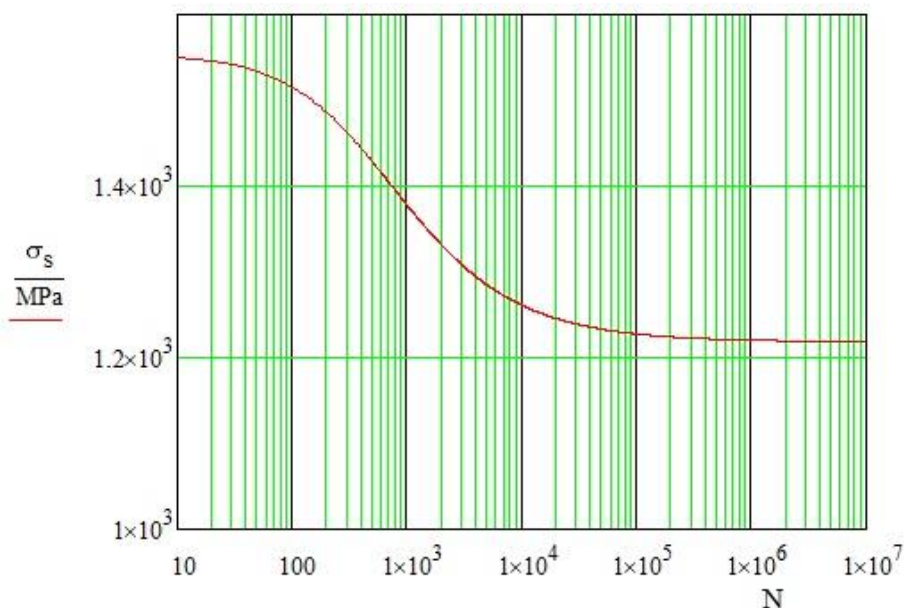


Рис. 3. Крива втоми сталі 45Г2 для асиметричного циклу навантаження

11. Гребеник, В. М. Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования [Текст] : монография / В. М. Гребеник. – М. : Машиностроение. 1969. – 256 с.

12. Сосновский, Д. А. Опыт статистического анализа результатов механических испытаний на машиностроительном заводе и разработка методов экспрессной оценки механических свойств конструкционной стали [Текст] : Автореф. дис. канд. техн. наук / Сосновский Дмитрий Алексеевич – Александровск, 1970. – 15 с.

13. Степнов, М. Н. Косвенная оценка пределов выносливости сталей и алюминиевых сплавов [Текст] / М. Н. Степнов, С. П. Евстратова, В. В. Борисова // Заводская лаборатория. – 1981. – № 3. – С. 67-69.

14. Авиационный справочник. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов [Текст] : справочное пособие. – М. : ОАК, ЦАГИ. 2013. – 302 с.

15. Исследование корреляционных зависимостей между механическими свойствами авиационных материалов [Текст] / В. В. Коновалов, С. В. Дубинский, А. Д. Макаров, А. М. Доценко // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 2. – С. 40-45.

References (BSI)

1. Sosnovskyy, L. A., Taranova, E. S., Tyurnyn, S. A. O polnoi krivoi ustalosti [About the full fatigue curve]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2012, no. 2, pp. 41-49.

2. Troshchenko, V. T., Sosnovskyy, P. A. Soprotivlenie ustalosti metallov i spлавov [Fatigue resistance of metals and alloys], Kyev, Naukova Dumka Publ., 1987. 1256 p.

3. Bai, Y., Jin, W.-L. Chapter 26 – Fatigue Loading and Stresses. *Marine Structural Design (Second Edition)*, 2016, pp. 509-525. DOI: 10.1016/B978-0-08-099997-5.00026-5.

4. Wang, L., Chen, Y., Wang, C., Wang, Q. Fatigue Life Analysis of Aluminum Wheels by Simulation of Rotary Fatigue Test. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, vol. 57, pp. 31-39. DOI: 10.5545/sv-jme.2009.046.

5. Gajdoš, L., Šperl, M. Fracture Mechanics Based Analysis of the Fatigue Life of Defective Welded Joints. *Materials Transactions*, 2020, vol. 61, iss. 5, pp. 926-934. DOI: 10.2320/matertrans.MT-M2019258.

6. Uzhik, V. (Ed.) *Ustalost' i vynoslivost' metallov. Sb. statei*. [Fatigue and endurance of metals. Collection of articles]. Moscow, Foreign lit. Publ., 1963. 497 p.

7. Matveev, V. V. K obosnovaniyu ispol'zovaniya deformatsionnykh kriteriev mnogotsiklovogo ustalostnogo razrusheniya metallov [To justify the use of deformation criteria for high-cycle fatigue failure of metals]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 1995, no. 5, pp. 3-12.

8. Bolotin, V. V. *Prognozirovaniye resursa mashin i konstruksii* [Forecasting the resource of machines and structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 312 p.

9. Veibul, V. *Ustalostnye ispytaniya i analiz ikh rezul'tatov* [Fatigue testing and analysis of their results]. Moscow, Mashgiz Publ., 1964. 310 p.

10. Böhm, M., Kluger, K., Pochwała, S., Kupina, M. Application of the S-N Curve Mean Stress Correction Model in Terms of Fatigue Life Estimation for Random Torsional Loading for Selected Aluminum Alloys. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 13, article no. 2985. 16 p. DOI: 10.3390/ma13132985.

11. Grebenik, V. M. *Ustalostnaya prochnost' i dolgovechnost' metallurgicheskogo oborudovaniya* [Fatigue strength and durability of metallurgical equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 256 p.

12. Sosnovsky, D. A. *Opyt statisticheskogo analiza rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy na mashinostroitel'nom zavode i razrabotka metodov ekspressnoi otsenki mekhanicheskikh svoistv konstruksionnoi stali*. Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk [Experience of statistical analysis of the results of mechanical tests at a machine-building plant and the development of methods for express evaluation of the mechanical properties of structural steel. Avtoref. diss. ... cand. tech. sci.]. Aleksandrovsk, 1970. 15 p.

13. Stepnov, M. N., Evstratova, S. P., Borisova, V. V. Kosvennaya otsenka predelov vynoslivosti staley i alyuminiyevykh spлавov [Indirect estimation of endurance limits of steels and aluminum alloys]. *Zavodskaya laboratoriya – Factory laboratory*, 1981, no. 3, pp. 67-69.

14. *Aviatsionnyi spravochnik. Raschetnye znacheniya kharakteristik aviatsionnykh metallicheskikh konstruksionnykh materialov* [Aviation directory. Estimated values of the characteristics of aviation metal structural materials]. Moscow. OAK, TsAGY Publ., 2013. 302 p.

15. Konovalov, V. V., Dubinskii, S. V., Makarov, A. D., Dotsenko, A. M. Issledovanie korrelyatsionnykh zavisimostei mezhdu mekhanicheskimi svoistvami aviatsionnykh materialov [Investigation of correlation dependences between the mechanical properties of aviation materials]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii – Aviation materials and technologies*, 2018, no. 2, pp. 40-45.

ESTIMATION OF FATIGUE STRENGTH AT AN ASYMMETRIC LOADING CYCLE

B. Kalinin

The **object** of study in the article is the individual parts of aircraft units, applied to loads that change over time. The subject of study is models that describe fatigue resistance under asymmetric loads. The **goal** is to develop a fairly simple engineering technique for detecting parts of aircraft units operating under an asymmetric loading cycle. **Tasks:** general analysis of many approaches to design cycles before the destruction of parts of aircraft units, production with an asymmetric loading cycle; select calculations acceptable for practical calculations, determine the endurance limit under a symmetrical loading cycle for steels and aluminum alloys used in aircraft units; select a calculation to calculate the maximum amount of asymmetric cycle. **Methods** used engineering analysis of methods for constructing a fatigue curve for an asymmetric speed change cycle; calculation of the endurance limit for a symmetrical cycle of change depending on the properties of materials based on the results of experimental selection and calculation of the endurance limit of materials to calculate the endurance limits of materials; the finite element method for counting and increasing dimensions in parts in the Simulation software package in Solidworks packages. The obtained **results** are obtained: an equation is chosen for the structure of the curve with an asymmetric cycle of stress change, given mechanical properties of the material; selections are selected for calculation with acceptable accuracy according to the specified properties of the endurance limits of materials with a symmetrical loading cycle of steels and aluminum alloys used in aircraft units; calculations were selected to calculate the limiting value of the asymmetric oscillation of the cycle; a method for determining the constants of the Weibull **distribution** for the fatigue curve under an asymmetric load cycle is proposed. **Conclusion:** an engineering technique has been developed for determining the resistance of parts of aircraft units operating under loads that change over time according to an asymmetric cycle.

Keywords: fatigue strength; fatigue resistance; asymmetric cycle; fatigue curve; endurance; Weibull distribution.

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ НАГРУЖЕНИЯ

Б. П. Калинин

Объектом изучения в статье является долговечность деталей авиационных агрегатов, определяемая нагрузками, переменными во времени. В качестве предмета изучения выступают модели, описывающие усталостную прочность при асимметричных нагрузках. **Целью** является разработка достаточно простой инженерной методики расчета долговечности деталей авиационных агрегатов, работающих при асимметричном цикле нагружения. **Задачи:** выполнить анализ существующих подходов к расчету количества циклов до разрушения деталей авиационных агрегатов, работающих при асимметричном цикле нагружения; выбрать соотношения, позволяющие с приемлемой для практических расчетов точностью определить предел выносливости при симметричном цикле нагружения для сталей и алюминиевых сплавов, применяемых в авиационных агрегатах; выбрать соотношения для расчета предельных амплитуд асимметричного цикла. Используемыми **методами** являются: инженерный анализ методов построения кривой усталости при асимметричном цикле изменения напряжений; расчет предела выносливости при симметричном цикле изменения напряжений в зависимости от свойств материалов по различным экспериментальным соотношениям и оценка точности расчетов для материалов с известными значениями пределов выносливости; метод конечных элементов для расчета минимального и максимального значений напряжений в деталях в программном средстве Simulation пакета программ Solidworks. Получены следующие **результаты:** выбрано уравнение для построения кривой усталости при асимметричном цикле изменения напряжений, заданных механических свойствах материала; выбраны соотношения для расчета с приемлемой точностью по заданным свойствам материалов пределов выносливости при симметричном цикле нагружения для сталей и алюминиевых сплавов, применяемых в авиационных агрегатах; выбраны соотношения для расчета предельных амплитуд асимметричного цикла изменения напряжений; предложен способ определения констант уравнения Вейбулла для кривой усталости при асимметричном цикле нагружения. **Вывод:** разработана инженерная методика оценки долговечности деталей авиационных агрегатов, работающих при нагрузках, изменяющихся во времени по асимметричному циклу.

Ключевые слова: усталостная прочность; предел выносливости; асимметричный цикл; кривая усталости; долговечность; уравнение Вейбулла.

Калінін Борис Петрович – канд. техн. наук, головний технічний керівник, ДП Харківське агрегатно-конструкторське бюро, Харків, Україна.

Boris Kalinin – Candidate of Sciences (Engineering), Chief Technical Manager, DP Kharkiv Aggregate Design Bureau, Kharkov, Ukraine,
e-mail: kbp010448@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5605-832X.