

Н.Г. Бурого*, И.С. Никитин**, П.А. Юшковский***, В.Л. Якушев**

СВЕРХМНОГОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ДИСКА КОМПРЕССОРА ГТД

Предложено обобщение известного критерия многоосного малоциклового усталостного разрушения Сайнса на случай сверхмногоциклового усталостного разрушения с учетом подбора левой и правой ветвей бимодальной усталостной кривой. На этой основе получены оценки долговечности эксплуатации и определены зоны поврежденности упругих дисков переменной толщины под действием крутильных колебаний лопаток.

Диск переменной толщины, вибрации, малоцикловая усталость, сверхмногоцикловая усталость, критерий усталостного разрушения, долговечность.

Введение

Ранее в [1, 2] были получены оценки долговечности диска переменной толщины (диска компрессора газотурбинного двигателя) в полетных циклах нагружения под действием центробежных нагрузок и с учетом дополнительных аэродинамических давлений на лопатки. Этот циклический процесс соответствует режиму малоциклового усталости (МЦУ). Однако в последние годы большое внимание уделяется исследованию процессов сверхмногоциклового усталости (СВМУ), связанных с длительными высокочастотными колебаниями элементов конструкций [3, 4]. В частности, такого рода процессы развиваются в дисках компрессора газотурбинного двигателя при наблюдаемых колебаниях лопаток. Частота этих колебаний имеет порядок частоты вращения диска или кратна ей. Развитие процесса СВМУ с числом циклов до разрушения $N > 10^8$ может привести к возникновению очагов повреждений в окрестности зоны контакта лопаток и внешнего обода диска.

Таким образом, наряду с полетными циклами режима МЦУ конструкции подвергаются также низкоамплитудным вибрационным нагрузкам режима СВМУ. Действующие в течение длительного времени, вибрации могут тоже вызывать разрушение конструкций. Важно отметить, что при длительной многолетней эксплуатации амплитуда напряжений в дисках существенно ниже предела текучести и по классическим представлениям работа дисков в пределах упругости вообще не должна представлять опасности. Тем не менее, при длительной эксплуатации усталостное разрушение происходит даже при работе конструкции в пределах упругости вплоть до появления зон разрушения. Фрактографические исследования поверхностей излома разрушенных в процессе эксплуатации дисков показали, что первоначальное зарождение усталостного микроповреждения может происходить и в режиме МЦУ, и в режиме СВМУ. Отличительной особенностью разрушения в режиме СВМУ является то, что очаг зарождения микротрещин находится под поверхностью элемента конструкции, а не примыкает к ней, как в случае режима МЦУ. Эти особенности позволяют экспериментаторам различать данные механизмы при классификации первичного очага поврежденности. Отметим, что дальнейшее развитие усталостной трещины, как правило, происходит ускоренно в режиме малоциклового усталости и наблюдается в виде усталостных бороздок на поверхности излома. Отсюда следует, что данные режимы усталостного разрушения являются альтернативными и, зачастую, взаимодополняющими и

взаимоусиливающими друг друга. Обзор экспериментальных исследований в этом направлении можно найти в [3, 4].

Первые оценки долговечности в режимах МЦУ и СВМУ были сделаны в [5] для диска постоянной толщины. Цель данной работы состоит в оценке долговечности диска переменной толщины в режиме СВМУ (вибрации) отдельно и совместно с режимом МЦУ. Подчеркнем, что при многолетней эксплуатации конструкция работает в пределах упругости и пластические эффекты не наблюдаются вплоть до начала разрушения. Поэтому для расчета долговечности по критериям усталостной прочности достаточно решить задачу теории упругости и определить диапазон изменений напряженно-деформированного состояния диска в циклическом процессе.

Следует заметить, что в режиме МЦУ нагружение диска осуществляется центробежными силами и контактными силами от лопаток, дополнительно нагруженных аэродинамическим давлением набегающего потока. На этот силовой фон в режиме СВМУ накладывается нагружение крутильными колебаниями лопаток. В принятой постановке мы не рассматриваем причины вибраций, такие, как действие пульсаций давления, возбуждение собственных форм колебаний лопаток, переходные режимы работы двигателя и тому подобные. Вибрации считаются заданными, поскольку данные по амплитудам и частотам вибраций приведены в [3].

В силу линейности задачи теории упругости НДС полетных циклов и вибраций можно рассчитывать отдельно и затем суммированием получать полное НДС. Полные (суммарные) НДС от полетных циклов и вибраций для двух крайних положений лопатки при вибрационном кручении являются границами изучаемого циклического процесса, используемыми в критериях усталостной прочности. На основе критерия многоосного усталостного разрушения определяются время и зона зарождения усталостного микрповреждения.

В настоящее время не существует экспериментально обоснованных, общепринятых критериев разрушения в режиме СВМУ. Поэтому для оценок долговечности используется предложенное в [5] обобщение известного критерия [6] многоосного малоциклового усталостного разрушения ($N < 10^5$) на исследуемый, относительно малоизученный режим сверхмногоцикловой усталости ($N > 10^8$).

1. Результаты расчетов НДС диска переменной толщины под действием периодической системы нагрузок на внешнем контуре

В [7] был описан метод и приведены результаты расчета упругой задачи о вибрациях диска переменной толщины под действием системы касательных нагрузок на внешнем контуре, соответствующих крутильным колебаниям лопаток.

Предполагалось, что кольцевой диск $a \leq r \leq b$ имеет переменную толщину $2h(r)$, $(-h(r) \leq z \leq h(r))$ и описывается системой уравнений динамической теории упругости в цилиндрической системе координат r, ϑ, z . Каждая лопатка считалась пластиной прямоугольного сечения ширины d . Воздействие лопатки на диск заменялось касательными нагрузками на внешнем контуре диска следующего вида:

$$\begin{aligned} \sigma_{r\theta_b} &= Q_0 (1 - \vartheta^2 / \delta^2) e^{i\omega t}, & Q_0 &= -0.8\mu\gamma d / h \\ \sigma_{rz_b} &= T_0 (\vartheta / \delta) e^{i\omega t}, & T_0 &= \mu\gamma d, \quad \text{при } |\vartheta| \leq \delta \end{aligned}$$

Здесь ω — частота колебаний, $\delta = d / (2b)$, γ — погонная крутка лопаток, λ и μ — модули упругости Ламе.

Приведем некоторые результаты [7] для диска, сечение которого $\vartheta = const$ показано на рис. 1. Приняты следующие значения параметров геометрии и материала диска и лопаток: $a = 0,05\text{м}$, $b = 0,4\text{м}$, $d = 0,01\text{м}$, $h = 0,035\text{м}$, $\gamma = 0,1\text{ рад/м}$, $\omega = 628\text{ 1/с}$, $\lambda = 78\text{ ГПа}$, $\mu = 44\text{ ГПа}$, $\rho = 4370\text{ кг/м}^3$ (титановый сплав). Число лопаток $N_0 = 32$. Значения амплитуд напряжений при крутильных колебаниях лопаток со знаками + и — были наложены на основное НДС, связанное с полетным циклом нагружения диска с учетом дополнительных аэродинамических нагрузок, рассчитанное в [1]. Радиальные распределения суммарных шести компонент напряжений для двух крайних положений (графики (а) и (б)) цикла крутильных колебаний лопаток в окрестности внешнего обода диска приведены на рис. 2 и рис. 3. В обозначениях напряжений индексы 1, 2, 3 соответствуют координатам r, θ, z .



Рис. 1. Форма сечения диска

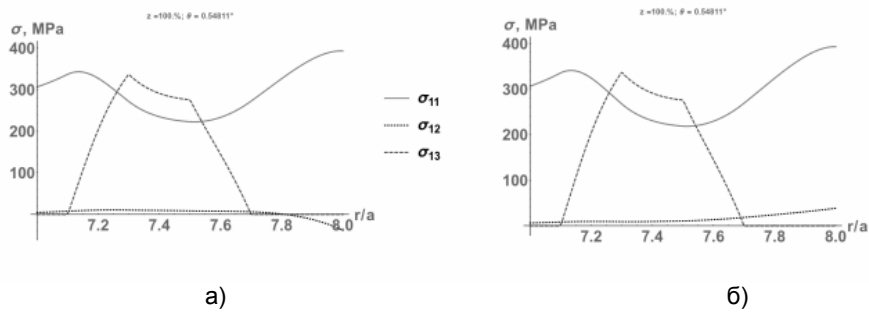


Рис. 2. Суммарные радиальные распределения напряжений $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}$

Разница между значениями напряжений на левых (а) и правых (б) графиках на этих рисунках есть размах напряжений в высокочастотном цикле, связанном с крутильными колебаниями лопаток. Далее эти данные использованы в критериях усталостной прочности для определения зон зарождения поврежденности и оценки долговечности.

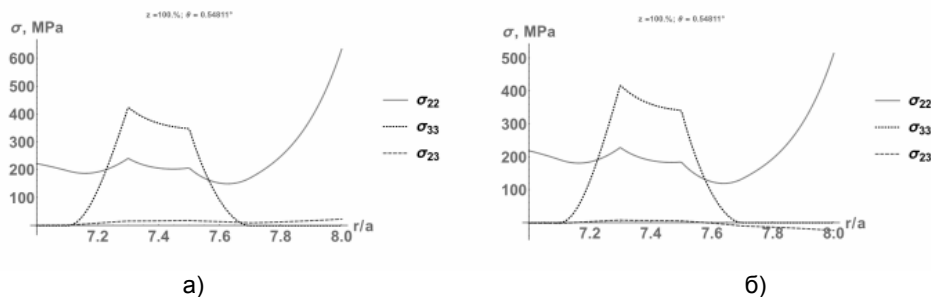


Рис. 3. Суммарные радиальные распределения напряжений σ_{22} , σ_{33} , σ_{23}

2. Зоны зарождения поврежденности и оценка долговечности в режиме СВМУ

В настоящее время имеется несколько критериев и моделей многоосного усталостного разрушения в режиме малоциклового (МЦУ) усталости, позволяющих оценить число циклов нагружения образца материала или элемента конструкции до разрушения. Основой для определения параметров моделей многоосного усталостного разрушения служат экспериментальные кривые одноосных циклических испытаний при различных значениях параметра асимметрии цикла $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$, где σ_{\max} и σ_{\min} — максимальное и минимальное значения напряжения в цикле. При описании результатов одноосных испытаний на усталостную прочность принимаются следующие обозначения: $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$ — амплитуда напряжения в цикле, $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ — размах напряжений в цикле одноосного нагружения. Экспериментальные данные одноосных испытаний описываются бимодальными кривыми Веллера (рис. 4), левые ветви которых отвечают режиму МЦУ (при $N < 10^7$) и аналитически могут быть представлены соотношением Баскина [1] $\sigma = \sigma_u + \sigma_c N^\beta$, где σ_u — предел усталости, σ_c — коэффициент усталостной прочности, β — показатель усталостной прочности, N — число циклов до разрушения.

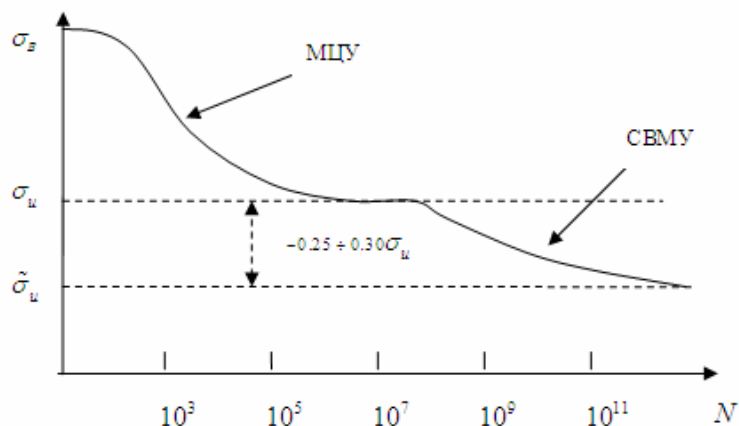


Рис. 4. Бимодальная усталостная кривая для режимов МЦУ и СВМУ

Задача исследования усталостного разрушения состоит в определении пространственного распределения функции числа циклов до разрушения N из уравнений, получаемых обобщением соотношения Баскина на случай многоосного напряженного состояния и содержащих рассчитанные напряжения в рассматриваемой конструкции.

Одним из общепринятых обобщений одноосной усталостной кривой в режиме МЦУ на случай многоосного напряженного состояния является критерий Сайнса [6]:

$$\Delta\tau/2 + \alpha_s \sigma_{\text{mean}} = S_0 + AN^\beta, \quad \sigma_{\text{mean}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)_{\text{mean}},$$

$$\Delta\tau = \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2} / 3 \quad (1)$$

где σ_{mean} — сумма главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, осредненная за цикл нагружения, $\Delta\tau$ — изменение октаэдрического касательного напряжения за цикл; $\Delta\tau/2$ — его амплитуда; α_s, S_0, A, β — параметры, определяемые по данным эксперимента.

Параметры модели (1), определенные по одноосным усталостным кривым для $R = -1$ и $R = 0$, приведены в [2]:

$$S_0 = \sqrt{2}\sigma_u/3, \quad A = 10^{-3\beta}\sqrt{2}(\sigma_B - \sigma_u)/3, \quad \alpha_s = \sqrt{2}(2k_{-1} - 1)/3,$$

$$k_{-1} = \sigma_u/(2\sigma_{u0})$$

где σ_u и σ_{u0} — пределы усталости по кривым $\sigma_a(N)$ при $R = -1$ и $R = 0$ соответственно, σ_B — предел прочности.

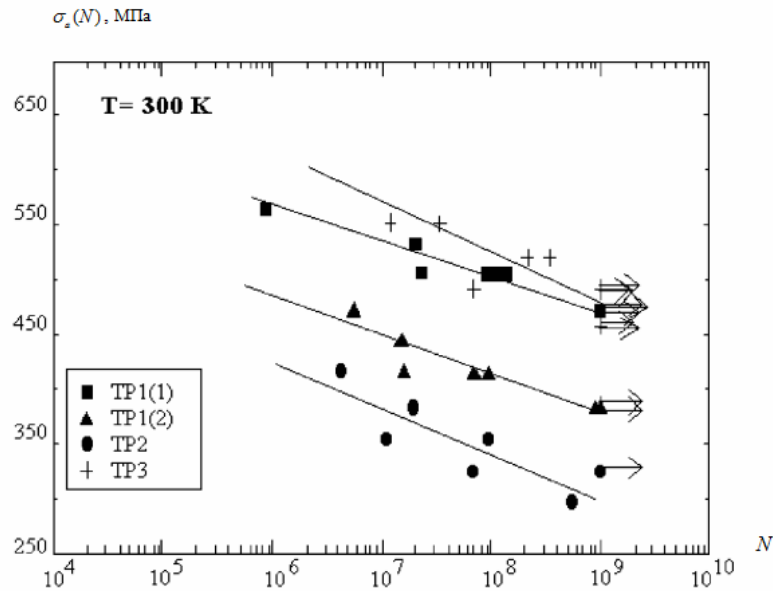


Рис. 5. Результаты эксперимента СВМУ [4] для титанового сплава Ti6246 со структурой, полученной в различных термомеханических процессах TP1, 2, 3.

Правая ветвь бимодальной усталостной кривой (рис. 4) при $N > 10^8$ соответствует пока еще малоизученному режиму сверхмногоциклового усталостного разрушения (СВМУ) [3, 4]. На Рис. 5 в качестве примера показаны результаты экспериментов [4] для высокочастотных (20 кГц) нагружений при комнатной температуре образцов титанового сплава Ti6246 с различной микроструктурой, полученной в результате различных термомеханических процессов ТП 1, 2, 3.

Эксперименты [3,4] показывают, что при числе циклов 10^9-10^{10} усталостное разрушение происходит при напряжениях, значительно меньших классического предела малоциклового усталости.

Поскольку экспериментально обоснованные критерии многоосного усталостного разрушения в режиме СВМУ пока отсутствуют, в [5] предложено обобщение критерия Сайнса (1) на режим СВМУ, основанное на подобии левых и правых ветвей бимодальных усталостных кривых. Указанное подобие учтено с помощью замен $\sigma_B \rightarrow \sigma_u$, $\sigma_u \rightarrow \tilde{\sigma}_u$, $\sigma_{u0} \rightarrow \tilde{\sigma}_{u0}$, где $\tilde{\sigma}_u$ и $\tilde{\sigma}_{u0}$ это «новые» пределы усталости на правой ветви усталостной кривой для коэффициентов асимметрии $R = -1$ и $R = 0$. В результате значения параметров для обобщенной модели Сайнса (1) в режиме СВМУ имеют вид [5]:

$$S_0 = \sqrt{2\tilde{\sigma}_u} / 3, \quad A = 10^{-8\beta} \sqrt{2(\sigma_u - \tilde{\sigma}_u)} / 3,$$

$$\alpha_s = \sqrt{2(2k_{-1} - 1)} / 3, \quad k_{-1} = \tilde{\sigma}_u / \tilde{\sigma}_{u0} / 2.$$

В расчетах задавались следующие значения усталостных параметров титанового сплава в режиме СВМУ $\sigma_u = 350$ МПа, $\tilde{\sigma}_u = 250$ МПа, $\tilde{\sigma}_{u0} = 200$ МПа, $\beta = -0.3$.

На рис. 6 показаны вычисленные для сверхмногоциклового усталости радиальные распределения логарифма долговечности (логарифма числа циклов N до разрушения) около внешнего обода диска под лопаткой для суммарного действия полетных циклов и вибраций без учета аэродинамических нагрузок на лопатки (а) и с учетом этих нагрузок (б).

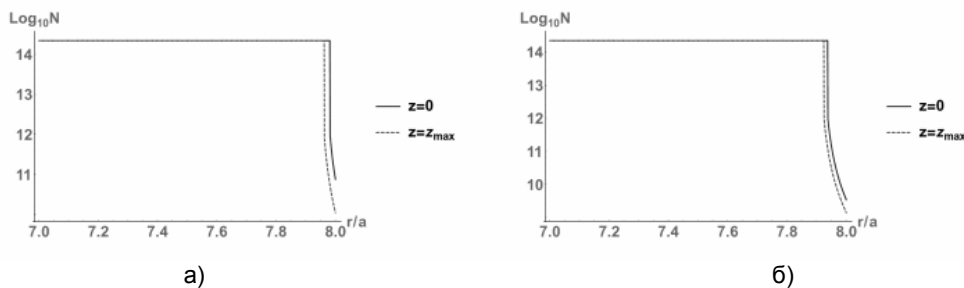


Рис. 6. Распределения логарифма долговечности по радиальной координате в окрестности внешнего обода диска

На этих графиках видно значительное (до $10^{9.5}-10^{10}$ циклов) падение долговечности в зоне контакта диска и лопаток. Вибрации имеют период примерно равный 0.01 сек. Поэтому реальное время до усталостного разрушения в результате вибраций лопаток может составить величину 10 000–30 000 часов, вполне достижимую в процессе эксплуатации.

Ранее, в [1] было установлено, что усталостная долговечность титанового диска в полетных циклах нагружения (малоцикловая усталость) для характерных частот вращения может снижаться до критических значений $N \sim 10^4$ полетных циклов (~30000 часов реального времени) в окрестности контактной зоны лопаток и диска. Близость значений долговечности для режимов МЦУ (полетный цикл нагружения) и СВМУ (высокочастотные циклические нагрузки от крутильных колебаний лопаток) указывает на то, что эти альтернативные механизмы усталостного разрушения должны учитываться одновременно при исследовании условий безопасной эксплуатации.

На рис. 7 показано распределение логарифма долговечности в прямоугольном сечении $r = b$ контактной зоны диска и лопатки для суммарного НДС в режимах МЦУ и СВМУ без учета аэродинамических нагрузок на лопатки (а) и с учетом этих нагрузок (б).

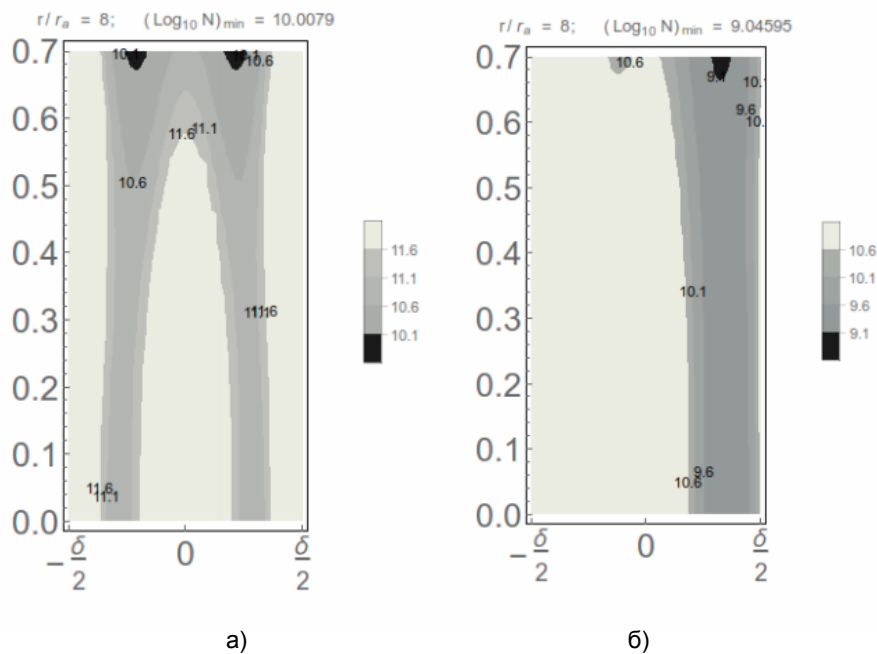


Рис. 7. Изолинии логарифма долговечности в прямоугольном сечении на внешнем ободе диска (под лопаткой)

Темным цветом выделены области минимальной долговечности, в которых зарождается и развивается усталостная поврежденность. Более реалистично выглядит правый график, на нем расположение зоны повреждений согласуется с данными фрактографических исследований поверхностей излома дисков, разрушенных в эксплуатации [1].

Выводы

Расчитанное НДС от вибраций упругих дисков переменной толщины под действием циклических нагрузок от крутильных вибраций лопаток (режим СВМУ) было наложено на НДС в полетных циклах нагружения (режим МЦУ). Предложено обобщение известного критерия многоосного малоциклового усталостного разрушения Сайнса на случай СВМУ с учетом подобия левой и

правой ветвей бимодальной усталостной кривой. На этой основе получены оценки долговечности эксплуатации и определены зоны поврежденности рассматриваемых дисков под действием крутильных колебаний лопаток.

Выявлено значительное падение долговечности на внешнем ободе в зоне контакта диска и лопаток. Показано, что реальные времена усталостного разрушения в режиме МЦУ и СВМУ имеют один порядок. Следовательно, эти альтернативные механизмы усталостного разрушения могут взаимно усиливаться, поэтому их следует одновременно принимать во внимание при оценке сроков безопасной эксплуатации.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 15-08-02392.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С., Юшковский П.А.* Влияние анизотропии усталостных свойств титанового сплава на долговечность элементов конструкций. Препринт ИПМех РАН № 1064. Москва. 2014. 35 с.
2. *Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С.* Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций. // Изв. РАН. МТТ. 2011. № 6. С. 22–33.
3. *Шанявский А.А.* Моделирование усталостных разрушений металлов. Уфа. Изд-во научно-технической литературы «Монография». 2007. 498 с.
4. *Bathias C., Paris P.C.* Gigacycle fatigue in mechanical practice. Marcel Dekker. New York. 2005. 304 p.
5. *Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С.* Сверхмногоцикловое усталостное разрушение титановых дисков компрессора. // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. №1. С. 52–67.
6. *Sines G.* Behavior of metals under complex static and alternating stresses. Metal Fatigue. McGraw-Hill. 1959. Pp. 145–169.
7. *Бураго Н.Г., Никитин И.С., Юшковский П.А., Якушев В.Л.* Расчет напряженно-деформированного состояния упругого диска переменной толщины под действием вибрации лопаток. // Вестник кибернетики. №1 (17). 2015. С. 3–10.

* ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН
burago@ipmnet.ru
**ИАП РАН
i_nikitin@list.ru
yakushev@icad.org.ru

*** МАТИ — Российский государственный
технологический университет имени К.Э. Циолковского»
abrahas.23@gmail.com

Burago N.G., Nikitin I.S., Yushkovskiy P.A., Yakushev V.L.

VERY-HIGH-CYCLE FATIGUE AT HIGH-FREQUENCY OSCILLATIONS OF GTE COMPRESSOR DISK

A generalization of the well-known criterion of multiaxial low-cycle fatigue fracture is suggested for the case of very-high-cycle fatigue taking into account the similarity of the left and right branches of the bimodal fatigue curve. On this basis estimations of the durability are obtained and the damaged areas are determined for the elastic disks of variable thickness under the torsional vibrations of the blades.

Disc of variable thickness, vibrations, low-cycle fatigue, very-high-cycle fatigue, criterion of fatigue fracture, durability.