

УДК 539.3

Н.Г. Бураго¹, И.С. Никитин²¹Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия²Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТИТАНОВОГО ДИСКА КОМПРЕССОРА С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ СПЛАВА В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ

В статье исследуется усталостная долговечность структурно-неоднородного диска постоянной толщины при малоцикловых (МЦУ) и сверхмногоцикловых (СВМУ) нагрузках. Для этого решены две модельные задачи теории упругости о нагружении кольцевого диска. В первой задаче к диску приложена центробежная нагрузка, а на внешнем контуре переменное и периодическое по углу радиальное напряжение, моделирующее центробежную нагрузку от лопаток (МЦУ). Во второй задаче решается уравнение для изгиба диска под действием периодических по углу крутящих моментов на внешнем контуре. Циклически приложенные крутящие моменты моделируют влияние высокочастотных колебаний лопаток и соответствуют режиму сверхмногоциклового усталости (СВМУ). Определена структура и глубина приповерхностного слоя с повышенными усталостными характеристиками, при которой достигается максимальная долговечность для каждого из режимов циклического нагружения. Определены суммарные радиальные и тангенциальные напряжения в ободной части диска при действии центробежных сил. Найдено распределение долговечности по радиусу в окрестности ободной части титанового диска (режим МЦУ) для однородной структуры и для неоднородной структуры. Построена зависимость логарифма долговечности от предела усталости в приповерхностном слое (режим МЦУ). Вычислены суммарные радиальные, тангенциальные и касательные напряжения в ободной части диска, соответствующие максимальному кручению лопаток по и против часовой стрелки (СВМУ). Определены распределение долговечности по радиусу в окрестности ободной части титанового диска и зависимость логарифма долговечности от предела усталости в приповерхностном слое (режим СВМУ).

Ключевые слова: сверхмногоцикловая усталость, малоцикловая усталость, структурная неоднородность, приповерхностный слой, долговечность, концентрация напряжений, колебания лопаток, полетный цикл нагружения.

N.G. Burago¹, I.S. Nikitin²

¹Institute for problems in mechanics of RAS, Moscow, Russian Federation

²Institute for computer aided design of RAS, Moscow, Russian Federation

THE DURABILITY INCREASE OF THE TITANIUM COMPRESSOR DISK WITH THE HELP OF ALLOY STRUCTURE MANAGEMENT IN THE NEAR-SURFACE LAYER

The present paper is devoted to the fatigue durability of structurally inhomogeneous disk of constant thickness under low-cycle (LCF) and very high-cycle (VHCF) loading. For this purpose, two modeling problems of elasticity theory for circular disk loading were solved. In the first problem the centrifugal loading is applied to the disk, also the variable and periodical in the angle radial stresses are applied on the external contour, modelling the centrifugal loading from the blades (LCF). In the second problem the disc bending equation is solved under periodical in the angle torques on the external contour. The cyclic torques model the high-frequency blades vibrations and correspond to the very high-cycle fatigue (VHCF). The structure and depth of near-surface layer with the increasing fatigue characteristics are determined for which the maximum durability is achieved for each regime of cyclical loading. Total radial and tangential stresses at the rim of the disc under the action of centrifugal forces are determined. The distribution of durability in the vicinity of the radial rim of the titanium disk (LCF mode) for a homogeneous structure and inhomogeneous structure is found. The dependence of the logarithm of the durability on the fatigue limit in the surface layer is calculated (LCF mode). We calculated also the total radial and tangential shear stresses in the rim of the disc, corresponding to a maximum torsion of the blades in clockwise and counter-clockwise directions (VHCF). The distribution of durability along the radius of the rim titanium disc and the dependence of logarithm of the durability on the fatigue limit in the surface layer (VHCF mode) are also defined.

Keywords: very-high-cycle fatigue, low-cycle fatigue, structural inhomogeneity, near-surface layer, durability, stress concentration, vibrations of blades, flight loading cycle

Введение

Существует ряд способов получения различных типов структур и свойств в одной детали. Наиболее известным является локальная термическая обработка, позволяющая за счет варьирования температурой и скоростями охлаждения в различных участках детали управлять этими параметрами. Наиболее широкие возможности открывает порошковая металлургия. Порошок или гранулы различной крупности и структуры засыпаются в специально сконструированные капсулы и подвергаются горячему изостатическому прессованию. Пример диска, полученного по этой схеме в ВИЛСе, представлен на рис. 1 [1].

Однако наибольшую эффективность при создании деталей с программированной структурой и свойствами имеют методы послойного наплавления порошков [2].

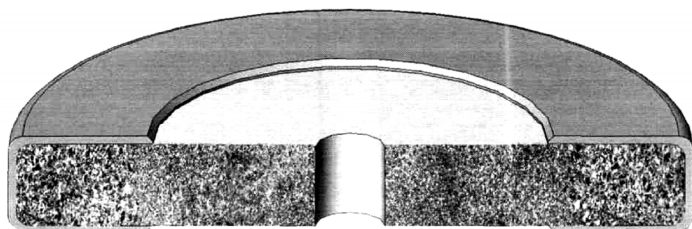


Рис. 1. Макроструктура осевых темплетов модельных заготовок диска, полученных из гранул с разной структурой

Технология послойного наплавления предполагает, что любой трехмерный объект может быть построен эффективно и быстро без какой-либо оснастки и сложной подготовки управляющих программ. Необходимо только наличие трехмерного файла CAD. Во время построения трехмерная модель разбивается на слои. Затем технология послойного наплавления воспроизводит требуемую геометрию деталей по слоям. С помощью энергии электронного луча происходит спекание твердотельных объектов из порошковых материалов. Гранулы поступают в установку электронно-лучевой плавки. В рабочую зону насыпают слой гранул толщиной несколько диаметров одной гранулы. Электронный луч, сканирующий по программе, ранее созданной по модели детали, сплавляет первый слой гранул, соответствующий контуру будущей детали. Затем в рабочую зону поступает новая порция порошка, который равномерно распределяется над расплавленным слоем толщиной несколько диаметров гранул, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет получена окончательная форма детали. Все полученные таким способом детали обязательно подвергаются горячей газостатической обработке. Существующие установки имеют технические возможности для получения деталей сложной формы за 30–40 часов непрерывной работы. Задачей металлургов в процессе послойного наплавления является правильное, т.е. запрограммированное расположение в объеме детали гранул нужного состава с нужной структурой.

В данной работе решены две модельные задачи теории упругости о нагружении кольцевого диска. В первой задаче к диску приложена центробежная нагрузка, а на внешнем контуре переменное по углу радиальное напряжение, моделирующее центробежную нагрузку от лопаток. Циклические нагружения такого типа моделируют полетные циклы нагружения диска компрессора и соответствуют режиму мало-

цикловой усталости (МЦУ). Во второй задаче решается уравнение для изгиба диска под действием переменных и периодических по углу крутящих моментов на внешнем контуре. Циклически приложенные крутящие моменты моделируют влияние высокочастотных колебаний лопаток и соответствуют режиму сверхмногоцикловой усталости (СВМУ). Предполагается, что с помощью технологических процедур управления структурой сплава при наплавлении и спекании можно получать приповерхностный слой диска с повышенными усталостными свойствами [3]. Используя полученные расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) на основе критериев многоосного усталостного разрушения, удалось оценить долговечность диска для различных усталостных режимов, в том числе и для диска с неоднородными усталостными свойствами. Из этих оценок видно, как повысить надежность и работоспособность детали, используя метод программированного расположения требуемой структуры в объеме детали.

В качестве объекта был взят кольцевой диск внешним диаметром 800 мм, со скоростью вращения до 7500 об/мин, в котором были определены напряжения, возникающие по радиусу от центра к периферии. При расчете на внешнем контуре диска задавались дополнительные, переменные и периодические по углу радиальные напряжения, которые моделировали центробежное воздействие от лопаток и были согласованы с ним по амплитуде.

1. Определение и учет влияния центробежных усилий от лопаток на напряженно-деформированное состояние в приповерхностном слое диска в режиме МЦУ

С целью оценки малоцикловой усталостной долговечности элемента конструкции решена модельная задача теории упругости о нагружении кольцевого диска. Предполагается, что к диску приложена центробежная нагрузка, а на внешнем контуре – переменное по углу радиальное напряжение, моделирующее центробежную нагрузку от лопаток и согласованное с ней по амплитуде (режим МЦУ). Также предполагается, что циклом многоосного нагружения диска является аналог полетного цикла нагружения (ПЦН), состоящий в достижении максимальных нагрузок на максимальных угловых скоростях вращения диска компрессора ГТД при нулевых напряжениях в начале цикла.

Показано, что максимальные главные напряжения резко возрастают в окрестности внешнего контура и приводят к появлению зон усталостного разрушения. Оценки долговечности также указывают, что усталостное разрушение может происходить за период $\sim 10\,000\text{--}20\,000$ циклов.

Модельная задача для МЦУ. В этой задаче, моделирующей режим МЦУ, для формулировки уравнения и граничных условий используется функция Эри F [4]. Бигармоническое уравнение для F

$$\Delta^2 F = 0,$$

$$F = (A_n r^n + B_n r^{-n} + C_n r^{n+2} + D_n r^{-n+2}) \cos n \theta,$$

$$\sigma_{rr} = F_r / r + F_{\theta\theta} / r^2, \quad \sigma_{r\theta} = F_\theta / r^2 - F_{r\theta} / r, \quad \sigma_{\theta\theta} = F_{rr}.$$

Граничные условия на внешнем и внутреннем контуре диска

$$\begin{array}{lll} \sigma_{rr} = 0 & \sigma_{r\theta} = 0 & r = a, \\ \sigma_{rr} = \sigma_0 S_\delta(\theta) & \sigma_{r\theta} = 0 & r = b, \end{array}$$

где $\sigma_0 = \rho \omega^2 (b_1^2 - b^2) / 2$.

Периодическая функция распределения радиального напряжения на внешнем контуре (один период $-\pi / N_0 < \theta < \pi / N_0$) моделирует центробежное воздействие лопаток, N_0 – число лопаток.

$$S_\delta(\theta) = 1 \text{ при } \theta \in [-\delta / 2, \delta / 2], \quad S_\delta(\theta) = 0 \text{ при } \theta \notin [-\delta / 2, \delta / 2].$$

Ряд Фурье для этой функции имеет вид

$$S_\delta(\theta) = N_0 \delta / \pi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(N_0 n \delta / 2) \cos(N_0 n \theta) / (\pi n)$$

где $\varepsilon = a / b$, $\delta = d / b$; a – внутренний радиус диска; b – внешний радиус диска; d – толщина лопатки.

Напряжения от лопаток (переменные по θ), соответствующие членам разложения при $n > 1$,

$$\begin{aligned} \sigma_{rr1} = \sum_{n=1} \sigma_1 \left[-n A_n (r / b)^{n-2} - n B_n (a / r)^{n+2} - (n-2) C_n (r / b)^n - \right. \\ \left. -(n+2) D_n (a / r)^n \right] \cos N_0 n \theta, \end{aligned}$$

$$\sigma_{\theta\theta 1} = \sum_{n=1} \sigma_1 \left[nA_n (r/b)^{n-2} + nB_n (a/r)^{n+2} + (n+2)C_n (r/b)^n + \right. \\ \left. + (n-2)D_n (a/r)^n \right] \cos N_0 n \theta, \\ \sigma_{r\theta 1} = \sum_{n=1} \sigma_1 \left[-nA_n (r/b)^{n-2} + nB_n (a/r)^{n+2} - nC_n (r/b)^n + nD_n (a/r)^n \right] \sin N_0 n \theta, \\ \sigma_1 = -\sin(N_0 n \delta / 2) \sigma_0 / (\pi n).$$

Напряжения от лопаток (не зависящие от θ), соответствующие члену $n = 0$,

$$\sigma_{rr 2} = \sigma_2 \left[1 - (a/r)^2 \right] / (1 - \varepsilon^2), \quad \sigma_{\theta\theta 2} = \sigma_2 \left[1 + (a/r)^2 \right] / (1 - \varepsilon^2), \\ \sigma_2 = N_0 \delta \sigma_0 / \pi.$$

Напряжения от центробежной силы в диске

$$\sigma_{rr 3} = \sigma_3 \left[1 + \varepsilon^2 - (a/r)^2 - (r/b)^2 \right], \\ \sigma_{\theta\theta 3} = \sigma_3 \left[1 + \varepsilon^2 + (a/r)^2 - (r/b)^2 (1 + 3\nu) / (3 + \nu) \right], \\ \sigma_3 = (3 + \nu) \rho \omega^2 b^2 / 8.$$

Суммарное напряжение от всех действующих силовых факторов

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rr 1} + \sigma_{rr 2} + \sigma_{rr 3}, \quad \sigma_{r\theta} = \sigma_{r\theta 1}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta 1} + \sigma_{\theta\theta 2} + \sigma_{\theta\theta 3}.$$

На рис. 2 представлены суммарные (с учетом центробежных сил в самом диске) радиальные и тангенциальные напряжения в ободной части диска для значений параметров $\omega = 785$ рад/с, $a = 0,05$ м, $b = 0,4$ м.

Проявляется эффект резкого увеличения уровня напряжений непосредственно под лопаткой, причем напряжения достигают уровня, способного привести к усталостному разрушению в режиме МЦУ. Из рис. 2 следует, что напряжения при вращении диска повышаются от 250–300 МПа до 800 МПа только на периферии диска на расстоянии 20–30 мм от края, в достаточно узком приповерхностном слое.

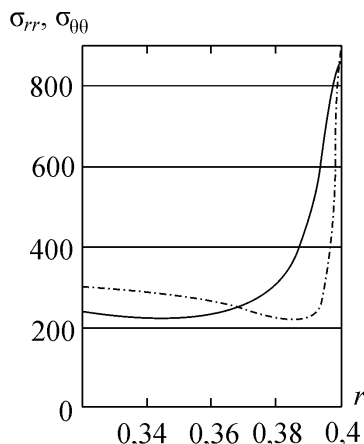


Рис. 2. Суммарные радиальные (сплошная линия) и тангенциальные напряжения (пунктир) (МПа) в ободной части диска от центробежных сил

2. Оценка долговечности эксплуатации диска в режиме малоциклового усталости в зависимости от размера приповерхностного упрочненного слоя

На основе полученных полей напряжений даны оценки долговечности диска по критерию многоосного усталостного разрушения Сайнса [5]:

$$\Delta\tau_{oct} / 2 + \alpha_s \sigma_{mean} = S_0 + AN^\beta,$$

где $\sigma_{mean} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)_{mean}$ – сумма главных напряжений, осредненная за цикл нагружения; $\Delta\tau_{oct} = \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2} / 3$ – изменение октаэдрического касательного напряжения за цикл; $\Delta\tau_{oct} / 2$ – его амплитуда; α_s, S_0, A, β – параметры, определяемые по данным эксперимента; N – число циклов до разрушения.

С точки зрения общей теории эта оценка соответствует левой ветви бимодальной усталостной кривой, обобщенной на многоосный случай. Параметры этого критерия определены по одноосным усталостным кривым для титанового сплава [5]:

$$S_0 = \sqrt{2}\sigma_u / 3, \quad A = 10^{-3\beta} \sqrt{2}(\sigma_B - \sigma_u) / 3, \quad \alpha_s = \sqrt{2}(2k_{-1} - 1) / 3, \\ k_{-1} = \sigma_u / (2\sigma_{u0}).$$

Имея в виду конкретные расчетные примеры, приведем приближенные значения параметров для титанового сплава Ti-6Al-4V [5]: предел прочности $\sigma_B = 1100$ МПа, пределы усталости по кривым $\sigma_a(N)$ при $R = -1$ и $R = 0$, соответственно: $\sigma_u = 450$ МПа и $\sigma_{u0} = 350$ МПа, показатель степенной зависимости от числа циклов $\beta = -0,45$, модуль Юнга $E = 116$ ГПа, модуль сдвига $G = 44$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,32$.

Расчет распределения логарифма долговечности $\lg N(r)$ по радиусу в окрестности ободной части титанового диска привел к результатам, показанным на рис. 3. Минимальное значение величины N , определяющее долговечность детали в целом имеет величину $\sim 10\ 000$ циклов и по порядку величины совпадает с результатами лабораторных и натурных испытаний в полетных циклах нагружения.

В пересчете на реальное время процесса с периодом цикла 3 ч (среднее полетное время) реальное время до разрушения также составляет $\sim 30\ 000$ ч, вполне достижимое в процессе эксплуатации.

3. Анализ полученных результатов и определение оптимальной глубины приповерхностного упрочненного слоя в режиме малоциклового усталости

Для полученного уровня напряжений в окрестности обода диска расчетом было показано, что долговечность при испытании образцов на усталость в ободной части снижается до $N = 10^4$ циклов, что является недопустимым для безопасной работы такой детали. Из рис. 2 следует, что напряжения при вращении диска повышаются от 250 – 300 МПа до 800 МПа, только на периферии диска на расстоянии 20 – 30 мм от края. Было рассчитано необходимое значение уровня предела усталости на

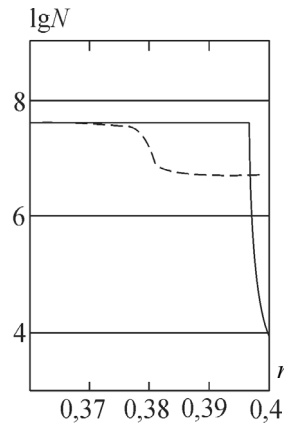


Рис. 3. Распределение долговечности по радиусу в окрестности ободной части титанового диска (режим МЦУ) для однородной структуры (сплошная линия) и для неоднородной структуры (пунктир)

периферии диска с целью сохранения долговечности на уровне $N \sim 10^7$ циклов. Достичь этого эффекта можно технологическим способом, описанным выше: управляя структурой сплава в приповерхностном слое при изготовлении диска и придавая ему повышенные усталостные свойства. Была проведена оценка долговечности для диска с неоднородными усталостными свойствами, а именно, с повышенным пределом усталости в приповерхностном слое глубиной до 30 мм. Показано, что повышение усталостных свойств на глубину более 30 мм при полученном распределении напряжений уже не оказывает существенного влияния на долговечность элемента конструкции.

Из рис. 3 следует, что для сохранения приемлемой долговечности $\sim 10^7$ циклов на периферии диска должен быть обеспечен предел усталости ~ 700 МПа. Этот же вывод следует из рис. 4, где показана зависимость логарифма долговечности от предела усталости в приповерхностном слое. Таким образом, для обеспечения долговечности 10^7 циклов в центре диска достаточно предела усталости ~ 400 – 450 МПа, а чтобы сохранить приемлемую долговечность на периферии, металл должен обладать структурой, обеспечивающей предел усталости ~ 700 МПа.

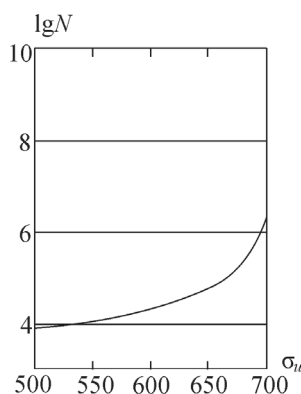


Рис. 4. Зависимость логарифма долговечности от предела усталости в приповерхностном слое (режим МЦУ)

Учитывая, что поставленная ранее задача решается для диска из титанового сплава ВТ6, металлургам надлежит создать на периферии такую структуру, которая бы позволяла получить предел усталости на ободке диска ~ 700 МПа. С учетом существующих зависимостей усталостных и прочностных свойств от микроструктуры сплава [3] была выбрана структура, обеспечивающая необходимый уровень выносливости при испытании образцов. Указанный предел усталости для сплава ВТ6 может быть получен на образцах с достаточно

дисперсной структурой. Исходя из вышеизложенного микроструктура диска для обеспечения приемлемой долговечности $N \sim 10^7$ по всему сечению должна иметь следующий вид [3] – глобулярно пластинчатая в центре и мелкодисперсная на ободке диска.

4. Определение и учет влияния низкоамплитудных крутильных колебаний лопаток на напряженно-деформированное состояние в приповерхностном слое диска в режиме СВМУ

Модельная задача для СВМУ. В этой задаче, моделирующей режим сверхмногоциклового усталости (СВМУ), возникающий при крутильных колебаниях лопатки, для формулировки уравнения и граничных условий используется бигармоническое уравнение для изгиба кольцевой пластинки:

$$\Delta^2 w = 0,$$

$$w = \left(A_n r^n + B_n r^{-n} + C_n r^{n+2} + D_n r^{-n+2} \right) \cos n\theta.$$

Граничные условия для перерезывающих сил и моментов на внутреннем и внешнем контуре имеют вид

$$\begin{aligned} V_r &= 0 & M_r &= 0 & r &= a, \\ V_r &= 2M_{r\theta,0}^*/r & M_r &= 0 & r &= b, \\ M_{r\theta}^* &= M_0 \Omega_\delta(\theta), & V_r &= (M_\theta + 2M_{r\theta,0} - (rM_r)_{,r})/r, \\ M_r &= -D_0 (w_{rr} + \nu w_{\theta\theta} / r^2 + \nu w_r / r), \\ M_\theta &= -D_0 (\nu w_{rr} + w_{\theta\theta} / r^2 + w_r / r), & M_{r\theta} &= D_0 (1 - \nu) (w_{r\theta} / r - w_\theta / r^2). \end{aligned}$$

Периодическая функция распределения крутящего момента на внешнем контуре (один период $-2\pi / N_0 < \theta < 2\pi / N_0$), моделирующего воздействия от крутильных колебаний лопаток, отлична от нуля на интервалах $\Theta_1 = [\pi / N_0 - \delta / 2, \pi / N_0 + \delta / 2]$ и $\Theta_2 = [-\pi / N_0 - \delta / 2, -\pi / N_0 + \delta / 2]$.

$\Omega_\delta(\theta) = 1$ при $\theta \in \Theta_1$, $\Omega_\delta(\theta) = -1$ при $\theta \in \Theta_2$, $\Omega_\delta(\theta) = 0$ при $\theta \notin \Theta_1, \theta \notin \Theta_2$.

Ряд Фурье для этой функции имеет вид

$$\Omega_\delta(\theta) = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(N_0 n \delta / 4) \sin(\pi n / 2) \sin(N_0 n \theta / 2) / (\pi n).$$

Величина амплитуды крутящего момента $M_0 = G\gamma d^2 h / 3$ и определяется из решения задачи о кручении пластины эллипсоидального поперечного сечения с полуосями d и h и погонным углом кручения γ в предположении $d \ll h$ [4].

Компоненты напряжений связаны с моментами формулами [6]

$$\sigma_{rr} = 12M_r z / h^3, \quad \sigma_{\theta\theta} = 12M_\theta z / h^3, \quad \sigma_{r\theta} = 12M_{r\theta} z / h^3.$$

Жесткость пластины $D_0 = Eh^3 / 12 / (1 - \nu^2)$, модуль Юнга E , модуль сдвига G .

Напряжения от кручения лопаток (переменные по θ)

$$\sigma_{rr1} = \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_n \left[n(n-1)(1-\nu)A_n (r/b)^{n-2} + n(n+1)(1-\nu)B_n (a/r)^{n+2} + \right. \\ \left. + ((n+2)(n+1+\nu)-\nu n^2)C_n (r/b)^n + ((n-2)(n-1-\nu)-\nu n^2)D_n (a/r)^n \right] \times \\ \times \cos(nN_0\theta/2),$$

$$\sigma_{\theta\theta 1} = \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_n \left[-n(n-1)(1-\nu)A_n (r/b)^{n-2} - n(n+1)(1-\nu)B_n (a/r)^{n+2} + \right. \\ \left. + ((n+2)(\nu n+1+\nu)-n^2)C_n (r/b)^n + ((n-2)(\nu n-1-\nu)-n^2)D_n (a/r)^n \right] \times \\ \times \cos(nN_0\theta/2),$$

$$\sigma_{r\theta 1} = \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_n \left[n(n-1)(1-\nu)A_n (r/b)^{n-2} - n(n+1)(1-\nu)B_n (a/r)^{n+2} + \right. \\ \left. + n(n+1)(1-\nu)C_n (r/b)^n - n(n-1)(1-\nu)D_n (a/r)^n \right] \sin(nN_0\theta/2),$$

$$\sigma_n = -24nM_0 \frac{z}{h^3} 4 \sin(N_0 n \delta / 4) \sin(\pi n / 2) / (\pi n).$$

Напряжения от центробежной силы в лопатках σ_{rr2} , $\sigma_{\theta\theta 2}$ и диске σ_{rr3} , $\sigma_{\theta\theta 3}$ определены ранее и суммируются с полученными напряжениями от крутящих моментов, соответствующих максимальным углам поворота лопаток по и против часовой стрелки.

Напряжения в крайних точках цикла

$$\sigma_{rr} = \pm \sigma_{rr1} + \sigma_{rr2} + \sigma_{rr3}, \quad \sigma_{r\theta} = \pm \sigma_{r\theta 1} + \sigma_{r\theta 2} + \sigma_{r\theta 3}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \pm \sigma_{\theta\theta 1} + \sigma_{\theta\theta 2} + \sigma_{\theta\theta 3}$$

Результаты вычислений распределения напряжений по радиусу в окрестности ободной части приведены на рис. 5, (а, б) для титанового диска со значениями параметров $\omega = 785$ рад/с, $a = 0,05$ м, $b = 0,4$ м. Представлены суммарные (с учетом центробежных сил в самом диске) радиальные и тангенциальные напряжения в ободной части диска для

крайних точек цикла, соответствующих максимальному кручению лопатки по и против часовой стрелки. Эффект увеличения уровня напряжений непосредственно под лопаткой также проявляется, причем разность напряжений в крайних точках цикла достигает уровня, способного привести к усталостному разрушению в режиме СВМУ.

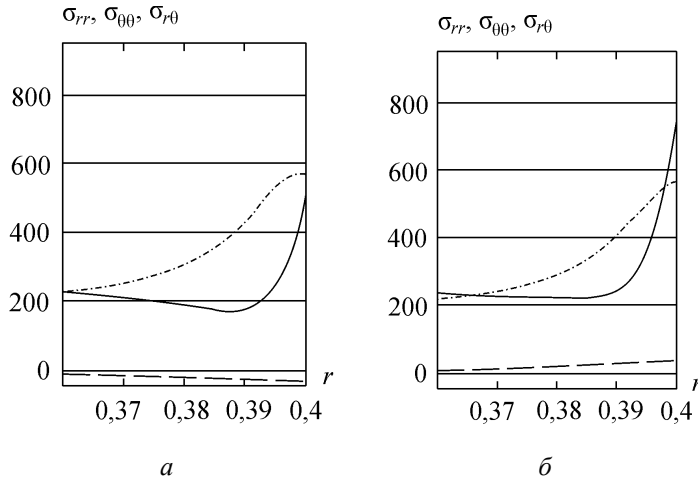


Рис. 5. Суммарные радиальные (сплошная линия), тангенциальные (пунктир с точкой) и касательные напряжения (пунктир) в ободной части диска, соответствующие максимальному кручению лопаток по (а) и против (б) часовой стрелки

5. Оценка долговечности эксплуатации диска в режиме СВМУ в зависимости от размера приповерхностного упрочненного слоя

Также были проведены оценки долговечности титанового диска по обобщенному критерию Сайнса во второй задаче, моделирующей крутильные колебания лопаток (режим СВМУ), с использованием рассчитанных полей напряжений. Для определения параметров модели в режиме СВМУ по одноосным усталостным кривым использованы соображения, которые применялись при их определении для режима МЦУ. При этом учтено подобие левой и правой ветвей бимодальной усталостной кривой с заменами $\sigma_B \rightarrow \sigma_u$, $\sigma_u \rightarrow \tilde{\sigma}_u$, $\sigma_{u0} \rightarrow \tilde{\sigma}_{u0}$, где $\tilde{\sigma}_u$ и $\tilde{\sigma}_{u0}$ – «новые» пределы усталости на правой ветви усталостной кривой для коэффициентов асимметрии $R = -1$ и $R = 0$. Значения параметров для обобщенной модели Сайнса (2) в режиме СВМУ имеют вид

$$S_0 = \sqrt{2}\tilde{\sigma}_u / 3, \quad A = 10^{-8\beta} \sqrt{2}(\sigma_u - \tilde{\sigma}_u) / 3, \quad \alpha_s = \sqrt{2}(2k_{-1} - 1) / 3, \\ k_{-1} = \tilde{\sigma}_u / \tilde{\sigma}_{u0} / 2.$$

Параметры расчета: амплитуда угла закручивания лопатки $\gamma = 0,1$, толщина лопатки $\delta = 0,012$, ширина диска $h = 0,03$, скорость вращения диска $\omega = 785$ рад/с, показатель усталостной прочности для правой ветви усталостной кривой $\beta = -0,3$, классический предел усталости $\sigma_{u1} = 470$ МПа, предел усталости на правой ветви бимодальной усталостной кривой (режим СВМУ) $\tilde{\sigma}_{u1} = 300$ МПа.

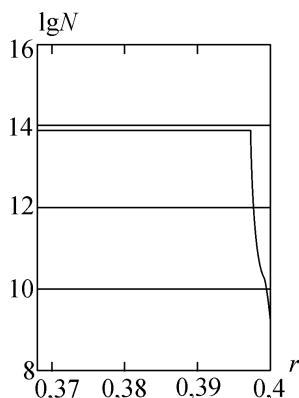


Рис. 6. Распределение долговечности по радиусу в окрестности ободной части титанового диска (режим СВМУ)

Расчет распределения долговечности по радиусу в окрестности ободной части титанового диска привел к результатам, показанным на рис. 6. Минимальное значение величины N , определяющее долговечность детали в целом, имеет величину $\sim 10^9 \div 10^{10}$ циклов. В пересчете на реальное время процесса с периодом цикла 0,01 с (при выбранной частоте колебаний) дает величину $\sim 10\ 000\text{--}30\ 000$ ч, вполне достижимую в процессе эксплуатации.

6. Анализ полученных результатов и определение оптимальной глубины приповерхностного упрочненного слоя в режиме сверхмногоциклового усталости

Как и в режиме МЦУ, повышение усталостных свойств в приповерхностном слое диска за счет технологических процессов, влияющих на структуру титанового сплава, позволяет существенно повысить долговечность эксплуатации детали. Из рис. 7, где показана зависимость логарифма долговечности от предела усталости в приповерхностном слое, следует, что для сохранения приемлемой долговечности $\sim 10^{11}\text{--}10^{12}$ циклов на периферии диска должен быть обеспечен предел усталости $\sim 600\text{--}650$ МПа. Это даже меньше, чем требуется для обеспечения приемлемой долговечности для случая малоциклового процесса.

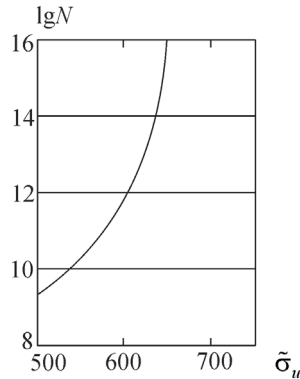


Рис. 7. Зависимость логарифма долговечности от предела усталости в приповерхностном слое (режим СВМУ)

7. Сравнительный анализ результатов, полученных для различных усталостных режимов, и оценка степени опасности каждого из них с учетом возможного упрочнения приповерхностного слоя диска

Оценки долговечности, проведенные в модельных задачах, показывают, что усталостное разрушение в любом из этих режимов может происходить за период реального времени одного масштаба, и, следовательно, принципиально возможно развитие усталостного разрушения в указанных зонах диска как по механизму МЦУ (полетный цикл нагружения), так и по механизму СВМУ (высокочастотные, низкоамплитудные вибрации элементов конструкции). Из результатов расчетов следует, что повышение предела усталости в приповерхностном слое диска до 650–700 МПа за счет изменения структуры сплава в процессе изготовления детали позволяет повысить долговечность детали до приемлемых значений как в режиме малоциклового (полетный цикл нагружения), так сверхмногоциклового (вибрационные воздействия) усталости. В обоих случаях микроструктура диска, обеспечивающая выполнение требований к неоднородным усталостным свойствам, для обеспечения приемлемой долговечности по всему сечению должна иметь следующий вид [3]: глобулярно пластинчатая в центре и мелкодисперсная на ободе диска.

Развитие техники электронно-лучевой плавки в настоящее время дает возможность иметь несколько источников энергии и контейнеров с гранулами для получения одной детали. Это позволяет использовать

для получения одной детали гранулы с разными структурами и разных химических составов. Получение деталей с регламентированной структурой по сечению обеспечит их повышенную работоспособность. В полной мере оценить этот эффект можно при натурном испытании детали. Авторы благодарят проф. И.С. Польшкина за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-08-00366-а, 12-08-01260-а).

Библиографический список

1. Польшкин И.С. Перспективы развития гранульной металлургии титановых сплавов // *Технология легких сплавов*. – 2011. – № 4. – С. 5–11.
2. Исследование возможности изготовления дисков ГТД с переменной структурой и функционально-градиентными свойствами из гранул разных фракций / Г.С. Гарибов, Н.М. Гриц [и др.] // *Технология легких сплавов*. – 2011. – № 4. – С. 41–50.
3. Взаимосвязь структуры и комплекса механических свойств в титановом сплаве ВТ6 / А.А. Ильин, С.В. Скворцова [и др.] // *Титан*. – 2011. – № 1. – С. 26–29.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 744 с.
5. Burago N.G., Zhuravlev A.B., Nikitin I.S. Models of Multiaxial Fatigue Fracture and Service Life Estimation of Structural Elements // *Mechanics of Solids*. – 2011. – Vol. 46. – No. 6. – P. 828–838.
6. Демьянушко И.В., Биргер И.А. Расчет на прочность вращающихся дисков. – М.: Машиностроение, 1978. – 247 с.

References

1. Polkin I.S. Perspektivy razvitiya granulnoy metallurgii titanovih spлавov [Development prospective of granular metallurgy of titanium alloys]. *Tekhnologiya legkikh spлавov*, 2011, no. 4, pp. 5-11.
2. Garibov G.S., Grits N.M. [et al.] [Study of possibility of gas-turbine engine production with variable structure and functional-gradient characteristics from granules of different fractions]. *Tekhnologia leghikh spлавov*, 2011, no. 4, pp. 41-50.

3. Il'in A.A., Skvortsova S.V. [et al.] Vzaimosvyaz' structure i kompleksa mekhanicheskikh svoystv v titanovom splave VT6 [Correlation between the structure and set of mechanical characteristics of the titanium alloy VT6]. *Titanium*, 2011, no. 1, pp. 26-29.

4. Rabotnov Yu.N. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela [Mechanics of Solids]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979, 744 p.

5. Burago N.G., Zhuravlev A.B., Nikitin I.S. Models of Multiaxial Fatigue Fracture and Service Life Estimation of Structural Elements. *Mechanics of Solids*, 2011, vol. 46, no. 6, pp. 828-838.

6. Dem'yanushko I.V., Birger I.A. Raschet na prochnost' vrashchayushchikhsya diskov [Strength calculation of rotating disks]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 247 p.

Об авторах

Бурого Николай Георгиевич (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования Института проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского (119526, г. Москва, пр. Вернадского, 101 к. 1, e-mail: buragong@yandex.ru).

Никитин Илья Степанович (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования Института автоматизации проектирования РАН (123056, г. Москва, 2-я Брестская ул., 19/18, e-mail: i_nikitin@list.ru).

About the authors

Burago Nikolay Georgievich (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Modelling in Institute for problems in mechanics of RAS (101, Vernadskiy av., 119526, Moscow, Russian Federation, e-mail: buragong@yandex.ru).

Nikitin Ilya Stepanovich (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Department of Math. Modelling Institute for computes aided RAS (19/18, 2-nd Brestskaya st., 123056, Moscow, Russian Federation, e-mail: i_nikitin@list.ru).

Получено 15.03.2013