

4. Пахомов А.В. Снижение вибраций на пневмоинструментах // Сб. Научных трудов МАДИ. Охрана труда на автомобильном транспорте и дорожном строительстве М.: Изд. МАДИ.1980. С. 35-40.
5. Чегодаев Д.Е., Пономарев Ю.К. Демпфирование – Самара:СГАУ, 1997. 334с.
6. Луканенко В.Г., Кирилин А.Н., Семененко Е.П., Родин Н.П. Опоры высокоскоростных и прецизионных роторов. Расчет и проектирование – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2000 – 132 с.:ил.

АНАЛИЗ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Богданович В.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г.Самара

Обычно эффективность мероприятий по повышению качества изделий обработкой оценивается сравнением средних значений данного показателя качества изделия с покрытием и без него. Однако такой подход нельзя признать полным, так как во многих случаях изменяется не только среднее значение показателя, но и дисперсия его рассеивания. В связи с этим представляет интерес полный анализ повышения качества изделий вакуумной ионно-плазменной обработкой на основе критериев и методов теории надежности. Тем более, что методология теории надежности предсказывает существенное влияние дисперсии параметра на показатели качества [1].

Действительно, любой показатель качества изделия, сформированный при выполнении технологического процесса, является случайной величиной, подчиненной определенному закону распределения. Это распределение обычно характеризуется двумя численными характеристиками – математическим ожиданием (средним значением) и дисперсией (среднеквадратичным отклонением). Естественно, сравнивать между собой количественно два распределения значений показателя качества до и после обработки невозможно, но ограничиваться сравнением только средних значений допустимо лишь при близких значениях их дисперсий [1].

Вместе с тем в теории надежности для объективной оценки вводятся показатели "вероятность безотказной работы" и "гамма-процентный ресурс", которые позволяют провести сравнение показателей

с различными дисперсиями рассеивания, но которые пока не очень активно используются в соответствующей технической литературе.

Рассмотрим методику использования этих показателей теории надежности для оценки эффективности мероприятий по вакуумной ионно-плазменной обработке изделий. Эта методика связана с задачей определения вероятности выполнения задания [1], которая может быть сформулирована следующим образом. Пусть некоторый параметр качества Y является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с параметрами m_y (математическое ожидание) и σ_y (дисперсия). При эксплуатации изделия на него воздействуют внешние факторы, оценка которых дает предельное допустимое значение для рассматриваемого параметра качества. В общем случае это предельное значение X также является случайной величиной, которая в силу центральной предельной теоремы теории вероятности будет распределена по нормальному закону с параметрами m_x и σ_x . Тогда безотказная эксплуатация изделия по параметру качества Y с вероятностью γ будет определяться неравенством

$$P(Z = Y - X \geq 0) \geq \gamma. \quad (1)$$

В частных случаях величина X может быть детерминированной постоянной (предельное значение внешнего нагружения, технологический допуск, допустимое изменение параметра y и т.д.), знаки неравенств могут быть обратными, величины Y и X могут быть наработками до отказа или значениями параметров, которые изменяются во времени и т.д.

Так как Y и X подчинены нормальному распределению, то и их композиция $Z=Y-X$ будет также подчинена нормальному распределению с параметрами $m_z=m_y-m_x$ и $\sigma_z^2=\sigma_y^2+\sigma_x^2$; а вероятность выполнения условия (1) для самого неблагоприятного случая $P(z)=\gamma$ и $z=0$ будет определяться интегралом

$$\gamma = P(z = 0) = 0,5 - \Phi(U_\gamma(z = 0)), \quad (2)$$

где $\Phi(U_\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{U_\gamma} e^{-\xi^2/2} d\xi$ - интеграл ошибок, $U_\gamma(z) = -\frac{m_z}{\sigma_z}$ - квантиль

нормального распределения для некоторой вероятности γ .

Преобразуем выражение для квантиля $(U_\gamma(z = 0))$ к виду

$$U_\gamma(z) = -\frac{n-1}{\sqrt{n^2 v_y^2 + v_x^2}}, \quad (3)$$

где $n = m_y/m_x$ - коэффициент безопасности (запаса надежности); $v_x = \sigma_x/m_x$, $v_y = \sigma_y/m_y$ - коэффициенты вариаций.

В случае, когда величина X является детерминированной постоянной

ной со значением $X=X_0$, выражение для квантиля (3) принимает вид

$$U_{\gamma} = -\frac{n-1}{m_{\gamma}}, \quad (4)$$

где $n = m_{\gamma}/X_0$.

Прежде чем проводить общий анализ соотношений (1)-(4), рассмотрим пример из практики вакуумного ионно-плазменного напыления.

При внедрении вакуумной ионно-плазменной технологии напыления покрытий на основе нитрида титана для защиты компрессорных лопаток ГТД из титанового сплава от эрозионного износа и износа при фрегтинг-коррозии была поставлена задача определить влияние этих покрытий на предел выносливости. В связи с этим были проведены сравнительные испытания стандартных образцов из титанового сплава с покрытием и без покрытия, а затем и партии рабочих лопаток компрессора.

Испытания проводились на гладких образцах круглого поперечного сечения на испытательной машине МУИ-6000 по схеме чистого изгиба при вращении до полного разрушения или базы 10^7 циклов. Были получены следующие результаты: для образцов без покрытия $\bar{\sigma}_{-1} = m_{\gamma} = 530$ МПа, $\sigma_{\gamma} = 58$ МПа; для образцов с покрытием $\bar{\sigma}_{-1} = m_{\gamma} = 557$ МПа, $\sigma_{\gamma} = 45$ МПа.

Так как значения m'_{γ} и m_{γ} отличаются незначительно (5%), то стандартное заключение констатировало, что ионно-плазменные покрытия, полученные на данном режиме, не снижают предела выносливости, что послужило основанием для их дальнейшего внедрения (естественно, при существенном повышении износостойкости системы). Однако для образцов с покрытием и без покрытия величины дисперсий средних значений отличаются в 1,29 раза. Поэтому рассчитаем вероятности безотказной работы в двух случаях. Считая, что для образца без покрытия коэффициент безопасности был выбран $n^* = 1,50$, получим, что для образцов с покрытием $n = 1,58$. Коэффициенты вариации имеют значения $v_{\gamma} = 0,11$ и $v_{\gamma} = 0,08$, а поэтому квантили (4) будут равны $U'_{\gamma} = -3,03$ и $U_{\gamma} = -4,59$ для образцов без покрытия и образцов с покрытиями соответственно. По таблицам интеграла ошибок в соответствии с (2) получим значения вероятности безотказной работы для образца без покрытия $\gamma' = 0,9987$ и с покрытием $\gamma = 0,99999$, т.е. вероятность отказа $(1-\gamma)$ была уменьшена в $(1-\gamma')/(1-\gamma) = 130$ раз.

Таким образом, эффективность вакуумного ионно-плазменного покрытия можно оценивать как снижение вероятности отказа в 130 раз по причине усталости, хотя увеличение среднего значения предела выносливости произошло всего на 5%.

Однако понятно, что в большинстве случаев нет необходимости обеспечивать расчетную вероятность безотказной работы на уровне "пяти девяток", поэтому результаты испытаний образцов с покрытием и без должны быть приведены к одному разумному значению вероятности безотказной работы.

Одним из возможных вариантов введения коэффициента эффективности проведенных технологических мероприятий является подход аналогично введению и сравнению между собой гамма-процентных ресурсов. Рассмотрим наводящий пример. При испытаниях твердосплавных пластин с многослойным ионно-плазменным покрытием и без покрытия в состоянии поставки были получены следующие результаты: для средних наработок до отказа и их дисперсий $m_t=33,7$ мин, $m_{t'}=22,5$ мин, $\sigma_t=6,7$ мин, $\sigma_{t'}=7,9$ мин. Тогда для выполнения технологического задания с вероятностью $\gamma=0,99$ необходимо назначить гамма-процентные ресурсы (периоды стойкости) использования инструмента в соответствии с (4):

$$T_\gamma = m_t(1 + U_\gamma v_t) \text{ и } T'_\gamma = m_{t'}(1 + U_\gamma v_{t'}), \quad (5)$$

где в (4) переобозначено $X_0=T_\gamma$, $X'_0=T'_\gamma$, $m_y=m_t$, $m_y=m_{t'}$, $v_y=v_t$, $v_y=v_{t'}$, $\sigma_y=\sigma_t$ и $\sigma_y=\sigma_{t'}$.

Для выбранной вероятности выполнения задания $\gamma=0,99$ получим $T_\gamma=18,0$ мин и $T'_\gamma=4,2$ мин. Таким образом, хотя увеличение средней наработки до отказа инструмента с покрытием возросло в $\alpha_{cp}=m_t/m_{t'}=1,5$ раза, в действительности увеличение периода стойкости инструмента произошло в $\alpha_{\phi\gamma}=T_\gamma/T'_\gamma=4,3$ раза. Следовательно, действительную эффективность параметра качества (периода стойкости) оценивает коэффициент равный

$$\alpha_{\phi\gamma} = \frac{T_\gamma}{T'_\gamma} = \frac{m_t(1 + U_\gamma v_t)}{m_{t'}(1 + U_\gamma v_{t'})}. \quad (6)$$

Возвращаясь к примеру с пределом выносливости можно предложить оценивать технологическое мероприятие по допустимому гамма-процентному изменению показателя качества. В этом случае, по аналогии с (5) и (6) коэффициент эффективности технологического мероприятия по параметру качества U можно записать в виде:

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{m_y (1 + U_y v_y)}{m_{y'} (1 + U_y v_{y'})}. \quad (7)$$

Расчет по (7) проводится по следующей методике. Определяется математическое ожидание m_y и стандартное отклонение σ_y параметра качества U . После проведения технологического мероприятия эти величины приняли значения $m_{y'}$ и $\sigma_{y'}$. Используя эти значения и заданное значение вероятности безотказной работы γ по этому параметру проводим вычисления по (7) (значение квантиля U_y определяем по стандартным таблицам интеграла ошибок). Например, в рассмотренном выше примере по повышению предела выносливости $\alpha_{\text{эф}}=1,20$ при $\gamma=0,9987$ и $\alpha_{\text{эф}}=1,37$ при $\gamma=0,9999$, т.е. эффективность мероприятия дает увеличение показателя на 19% и 37%, а не на 5%. Видно, что значение коэффициента эффективности (7) и в этом случае объективно отражает повышение качества изделия по выносливости в результате нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. Причем при повышении требований к изделию по величине вероятности безотказной работы эффективность ионно-плазменной технологии возрастает.

Особый интерес при этом составляет стратегия повышения вероятности безотказной работы по данному параметру качества. Из (1) и (2) видно, что повышение вероятности безотказной работы $P \rightarrow 1$ связано с необходимостью обеспечения роста $|U_y|$. Рост $|U_y|$ может быть обеспечен увеличением n и уменьшением v_y и v_x .

Величина v_x — коэффициент вариации предельного допустимого значения для рассматриваемого параметра качества зависит от: стабильности уровня и диапазона воздействий на изделие в целом; передачи этих внешних воздействий на деталь и данный параметр качества; стабильности работы этой детали; качества сборки изделия и т.д. Т.е. в рамках мероприятия по ионно-плазменной обработке величины v_x и m_x не могут быть изменены.

В связи с этим в зависимости от соотношения между v_y и v_x (σ_x и σ_y) можно выделить следующие диапазоны. Первый диапазон определяется соотношением $\sigma_y \leq 0,1 \sigma_x$, второй диапазон определяется соотношением $0,1 \sigma_x \leq \sigma_y$, а третий $\sigma_y > 10 \sigma_x$.

Из соотношения (3) видно, что во втором и третьем диапазонах с ростом коэффициента безопасности от $n=1$ до $n \approx 1,5$ скорость увеличения $|U_y|$ велика (эффективное регулирование), а затем существенно замедляется, в то же время влияние v_y на $|U_y|$ подчиняется гиперболическому

закону и существенно влияет на величину $|U_y|$, особенно в области $a \approx 1$.

Таким образом, в зависимости от соотношения между σ_y и σ_x необходимо принимать различную стратегию повышения вероятности безотказной работы по данному параметру качества – добиваться повышения среднего значения показателя, добиваться уменьшения дисперсии этого показателя или одновременно добиваться и того, и другого.

При этом необходимо иметь в виду, что повышение n требует в технологическом плане поиска новых материалов и создания новой технологии, а в конструкторском плане повышение n приводит к увеличению массы конструкции, увеличению площадей опасных сечений, усложнению самой конструкции и т.д. В то же время уменьшение v_y или σ_y связано с совершенствованием технологического процесса, снижением коэффициентов вариаций свойств как исходных заготовок, так и свойств параметра на каждой технологической операции, в том числе исключением ручного труда и введением автоматизации. Причем в плане снижения дисперсии очень важны особенно финишные технологии, обладающие положительной технологической наследственностью и малой дисперсией выходных параметров, к которым, как показано в [2], относится и вакуумная ионно-плазменная технология.

Таким образом, использование предложенного коэффициента эффективности технологических мероприятий по повышению ресурса и надежности изделий машиностроения объективно учитывает изменение среднего значения показателя, изменение его дисперсии, учитывает уровень вероятности безотказной работы, при котором должен использоваться данный показатель, отражает современные тенденции расчета конструкций и изделий на надежность и показывает, что существенным резервом повышения надежности изделий машиностроения является возможность уменьшения дисперсии показателей качества.

Список литературы

1. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов: Учебник для ВТУЗов /В.А.Барвинок, В.И.Богданович, П.А.Бордаков и др. Под ред.проф.Барвинка В.А. - М.: Машиностроение, 1996. - 576 с.
2. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. - М.: Машиностроение, 1999. - 309 с.