

- 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.
- Чегодаев Д.Е., Пономарев Ю.К. Демпфирование – Самара: СГАУ, 1997. 334с.
- 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 поциальному 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 u 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 постоян-

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

$$U_y = -\frac{n-1}{nv_y}, \quad (4)$$

где $n = m_y/X_0$.

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 фреттинг-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 $\bar{\sigma}'_{-1} = m_y' = 530$ МПа, $\sigma_y' = 58$ МПа; для образцов с покрытием $\bar{\sigma}_{-1} = m_y = 557$ МПа, $\sigma_y = 45$ МПа.

Так как значения m_y' и m_y 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 $v_y = 0,11$ и $v_y' = 0,08$, а поэтому квантили (4) будут равны $U' = -3,03$ и $U_y = -4,59$ 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 $\alpha_{\phi}=T_\gamma/T'_{\gamma'}=4,3$ раза. Следовательно, действительную эффективность параметра качества (периода стойкости) оценивает коэффициент равный

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

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:

$$\alpha_{\varphi} = \frac{m_y (1 + U_y v_y)}{m_y (1 + U_y v_y)} \cdot \quad (7)$$

Расчет по (7) проводится по следующей методике. Определяется математическое ожидание m_y и стандартное отклонение σ_y параметра качества Y . После проведения технологического мероприятия эти величины приняли значения m_y и σ_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 $\alpha_{\varphi}=1,20$ при $\gamma=0,9987$ и $\alpha_{\varphi}=1,37$ 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 m_y 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 $n \geq 1,5$ 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.Барвина 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.