

УДК 621.757: 621.7.08

Д-р техн. наук А. Я. Качан, С. А. Уланов

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ ФИНИШНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

В работе представлены математические модели влияния технологической наследственности финишных методов обработки на приращение предела выносливости деталей ГТД при одновременном воздействии силового и температурного факторов в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. На основе проведенного анализа сделан вывод о целесообразности применения на финишных операциях изготовления деталей ГТД низкотемпературных финишных методов обработки, где силовой фактор преобладает над температурным.

Представлены математические модели для определения приращения предела выносливости после выполнения на финишных операциях низкотемпературной упрочняющей обработки.

Ключевые слова: детали ГТД, технологическая наследственность, математическая модель, предел выносливости, силовой фактор, температурный фактор, параметры качества поверхностного слоя.

Одним из важных направлений повышения эксплуатационных характеристик деталей ГТД на этапе их производства является разработка и внедрение прогрессивных финишных технологий, которые вносят значительный вклад в обеспечение качества их несущих поверхностей, а следовательно, и в повышение ресурса и надежности авиационных двигателей [1–3].

Значительное влияние на формирование параметров качества несущих поверхностей деталей ГТД оказывает технологическая наследственность предшествующих операций технологического процесса их изготовления, которая особенно проявляется на финишных операциях [4–6].

Цель работы — разработка и выбор математических моделей для оценки влияния технологической наследственности финишных методов обработки деталей ГТД на приращение их предела выносливости.

Изменение предела выносливости деталей при постоянной базе и условиях испытаний в процессе выполнения заключительных финишных операций в общем виде можно представить следующим образом [6]:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1_0} \pm \Delta\sigma_{-1}, \quad (1)$$

где σ_{-1_0} — величина предела выносливости лопаток после выполнения предыдущей финишной операции;

$\Delta\sigma_{-1}$ — величина изменения предела выносливости лопатки, которая обеспечивается после выполнения текущей финишной операции.

В общем случае величину изменения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ можно представить в виде:

$$\Delta\sigma_{-1} = f(\Delta\sigma_{-1_p}, \Delta\sigma_{-1_0}), \quad (2)$$

где $\Delta\sigma_{-1_p}$ — величина изменения предела выносливости от воздействия силового фактора;

$\Delta\sigma_{-1_0}$ — величина изменения предела выносливости от воздействия температурного фактора.

При этом предположим, что эти два основных фактора контактного взаимодействия инструмента и детали в зоне обработки действуют на поверхностный слой одновременно и в противоположных направлениях.

Силовой фактор упрочняет поверхностный слой несущей поверхности детали, а контактная температура разупрочняет его.

В связи с этим можно предположить, что скорость изменения величины предела выносливости σ_{-1} , обусловленная силовым фактором, пропорциональна текущему значению величины предела выносливости, обусловленной температурным фактором.

Предположим также, что и скорость изменения величины предела выносливости, обуслов-

ленная температурным фактором, пропорциональна текущему значению величины предела выносливости, обусловленной силовым фактором.

Тогда в соответствии с принятыми предложениями проявление технологической наследственности финишных методов обработки на предел выносливости деталей можно представить следующей математической моделью:

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta\sigma_{-1p})}{dt} &= -k_1\Delta\sigma_{-1_0} \\ \frac{d(\Delta\sigma_{-1_0})}{dt} &= -k_2\Delta\sigma_{-1_0} \end{aligned} \quad (3)$$

где $\frac{d(\Delta\sigma_{-1p})}{dt}$ – скорость изменения величины

предела выносливости σ_{-1} , обусловленная силовым фактором;

$\frac{d(\Delta\sigma_{-1_0})}{dt}$ – скорость изменения величины

предела выносливости σ_{-1} , обусловленная температурным фактором;

k_1 и $k_2 > 0$ – коэффициенты пропорциональности, характеризующие соответственно степень влияния силового и температурного факторов на изменение величины предела выносливости детали из конкретного материала.

Знак минус в уравнениях (3) при $\Delta\sigma_{-1_0}$ и $\Delta\sigma_{-1p}$ показывает, что в зоне контакта инструмента и поверхности детали в процессе взаимодействия силового и температурного факторов значения величин $\Delta\sigma_{-1_0}$ и $\Delta\sigma_{-1p}$ соответственно уменьшаются.

Решение системы дифференциальных уравнений (3) запишем в виде:

$$k_1[\Delta\sigma_{-1p}^2 - \Delta\sigma_{-1p_0}^2] = k_2[\Delta\sigma_{-1_0}^2 - \Delta\sigma_{-1_0_0}^2], \quad (4)$$

Обозначим $k_1\Delta\sigma_{-1p_0}^2 - k_2\Delta\sigma_{-1_0_0}^2 = c$, тогда получим:

$$k_1\Delta\sigma_{-1p}^2 - k_2\Delta\sigma_{-1_0}^2 = c. \quad (5)$$

Пусть $c = 0$, а это означает, что в начальный момент при выполнении текущей финишной технологической операции численные значения приращения и убывания предела выносливости от воздействия силового и температурного факторов равны между собой.

Тогда из уравнения (5) также следует, что в текущий момент выполнения финишной операции будет также выполняться равенство:

$$k_1\Delta\sigma_{-1p}^2 = k_2\Delta\sigma_{-1_0}^2 \quad \text{или}$$

$$\Delta\sigma_{-1p} = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}\Delta\sigma_{-1_0}. \quad (6)$$

Из уравнения (1) и с учетом уравнения (6) следует, что после выполнения данной финишной операции предел выносливости лопатки σ_{-1} не возрастает, а остается неизменным.

Пусть $c > 0$, а это означает, что в начале выполнения данной финишной операции

$\Delta\sigma_{-1p_0} > \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}\Delta\sigma_{-1_0_0}$, то есть приращение предела выносливости от воздействия силового фактора является преобладающим.

Тогда из уравнения (5) также следует:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{-1p} &> \sqrt{\frac{c + k_2(\Delta\sigma_{-1_0_0})^2}{k_1}} \quad \text{или} \\ \Delta\sigma_{-1p} &> \Delta\sigma_{-1_0}. \end{aligned} \quad (7)$$

Следовательно, после выполнения данной финишной операции предел выносливости σ_{-1} возрастает за счет преобладания при обработке силового фактора.

Пусть $c < 0$, а это означает, что в начале выполнения текущей финишной операции преобладающим является температурный фактор, тог-

да $\Delta\sigma_{-1p_0} < \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}\Delta\sigma_{-1_0_0}$ и из уравнения (5) следует:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{-1p} &< \sqrt{\frac{k_2(\Delta\sigma_{-1_0_0})^2 - c}{k_1}} \quad \text{или} \\ \Delta\sigma_{-1p} &< \Delta\sigma_{-1_0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, после выполнения данной финишной операции предел выносливости σ_{-1} лопатки снижается за счет преобладания при обработке воздействия температурного фактора.

При этом численное значение величины снижения определяется величиной превышения $\Delta\sigma_{-1_0_0}$ над $\Delta\sigma_{-1p_0}$.

Характер наследования эксплуатационных свойств (σ_{-1}) в процессе выполнения финишных операций технологического процесса при изготовлении показан на рис. 1, из которого видно, что для значения $\Delta\sigma_{-1p_0} = \Delta\sigma_{-1\theta_0}$ (при $k_1 = k_2$) происходит элиминация свойств, то есть значение величины предела выносливости детали после выполнения данной финишной операции остается на прежнем уровне.

На рис. 1 представлена также область условий в относительных единицах, где происходит технологическое наследование свойств от воздействия p фактора и область наследования свойств от воздействия θ фактора.

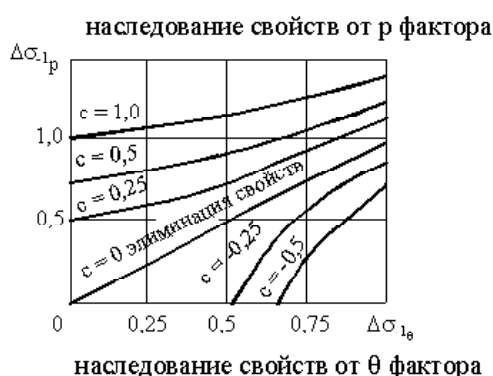


Рис. 1. Проявление технологической наследственности в зависимости от значения величины c

Из приведенного анализа предложенной математической модели влияния технологической наследственности на предел выносливости σ_{-1} детали следует, что технологическая наследственность предопределяет изменение величины предела выносливости, которая в зависимости от исходных величин режимных и других условий финишной операции может или возрастать, или уменьшаться, или оставаться неизменной.

Поэтому важным при изготовлении деталей с необходимостью обеспечения высокого уровня величины предела выносливости является разработка и обоснованный выбор финишных методов и режимов обработки, которые в процессе выполнения финишной операции формируют максимальное приращение предела выносливости. В основу при разработке финишных методов и режимов обработки должно быть положено преобладание силового фактора над температурным, а также его высокая стабильность в зоне контакта инструмента и детали.

На базе предложенной математической модели проявления технологической наследственности определены закономерности наследования эксплуатационных свойств при изготовлении деталей в особенности на заключительных финишных операциях.

Наиболее эффективно оказывают влияние на предел выносливости остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое после различных способов поверхностного упрочнения несущих поверхностей деталей, имеющих концентраторы напряжений.

Приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ упрочненной детали от влияния остаточных напряжений сжатия в их поверхностном слое определяется по формуле [7]:

$$\Delta\sigma_{-1\sigma_{ocm}} = \bar{\Psi}_{\sigma_{ocm}} |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (9)$$

где $\bar{\Psi}_{\sigma_{ocm}}$ — коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению;

$\bar{\sigma}_{ocm}$ — остаточные напряжения на дне трещины, которые взяты за критерий влияния по разрушению.

Критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ определяют по формуле [7]:

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (10)$$

где $\xi = \frac{y}{t_{кр}}$ — расстояние от поверхности до текущего слоя;

$t_{кр}$ — максимально возможная (критическая) глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали;

$\sigma_z(\xi)$ — осевые остаточные напряжения в поверхностном слое детали.

Расчет предела выносливости по разрушению упрочненной детали с концентратором напряжений целесообразно проводить в следующем порядке:

- определяются осевые $\sigma_z(\xi)$ остаточные напряжения в наименьшем сечении детали;
- по приведенной формуле (10) вычисляется $\bar{\sigma}_{ocm}$, причем $t_{кр}$ для сплошной детали определяют из выражения [7]

$$t_{кр} = 0,021D, \quad (11)$$

а для полрой детали

$$t_{кр} = 0,021D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (12)$$

где D — размер наименьшего поперечного сечения детали;

d — диаметр отверстия в детали.

По формуле (9) определяется приращение предела выносливости детали, где коэффициент $\bar{\Psi}_{\sigma_{ocm}}$, в случае симметричного цикла при изгибе

и растяжении – сжатии $\bar{\psi}_{\sigma_{ост}} = 0,36$.

В таблице 1 представлено влияние различных способов упрочнения (ОМ – обработка микрошариками; ГДО – гидродробеструйная обработка; ОР – обработка роликами) поверхностного слоя деталей с концентраторами напряжений на

предел их выносливости σ_{-1} и его приращение $\Delta\sigma_{-1}$ после упрочняющей обработки [7].

Зависимости параметров качества поверхностного слоя и предела выносливости лопаток ГТД из титанового сплава ВТ8 от времени виброупрочнения приведены на рис. 2 [8].

Таблица 1 – Влияние способов упрочнения образцов на предел их выносливости σ_{-1} и его приращение $\Delta\sigma_{-1}$

| Обработка | $\varepsilon_{ост}, \%$ | Неупрочненные образцы $\sigma_{-1}, \text{МПа}$ | Упрочненные образцы | | | | | | |
|-----------|-------------------------|---|---------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| | | | $\sigma_{-1}, \text{МПа}$ | $\sigma_z, \text{МПа}$ | $\psi_{\sigma_{ост}}$ | $t_{кр}, \text{мм}$ | $\bar{\sigma}_{ост}, \text{МПа}$ | $\bar{\psi}_{\sigma_{ост}}$ | $\Delta\sigma_{-1}, \text{МПа}$ |
| ОМ | 0 | 120 | 140 | -118 | 0,169 | 0,203 | -59 | 0,338 | 20 |
| ГДО | 0 | 120 | 165 | -275 | 0,164 | 0,203 | -135 | 0,333 | 45 |
| | 2 | 120 | 160 | -214 | 0,187 | 0,205 | -111 | 0,362 | 40 |
| | 10 | 120 | 165 | -255 | 0,176 | 0,198 | -140 | 0,320 | 45 |
| | 15 | 115 | 160 | -261 | 0,172 | 0,206 | -132 | 0,341 | 45 |
| ОР | 0 | 120 | 235 | -827 | 0,139 | 0,197 | -325 | 0,354 | 135 |

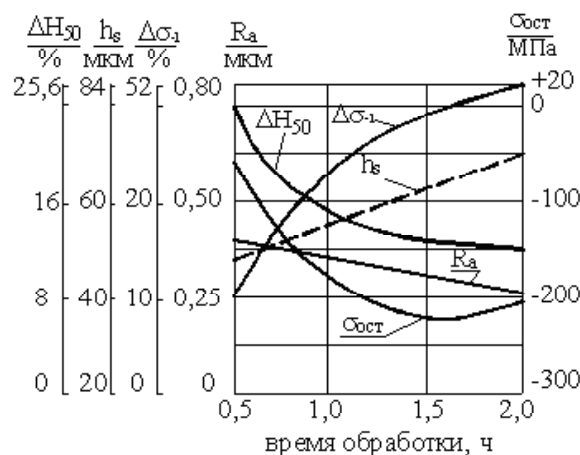


Рис. 2. Зависимости параметров качества поверхностного слоя и предела выносливости лопаток из сплава ВТ8 от времени виброупрочнения:

- t – время виброупрочнения, $t = 0,5...2,0$ ч;
- R_a – шероховатость аэродинамической поверхности, мкм;
- h_s – глубина упрочнения, мкм;
- $\sigma_{ост.сж}$ – остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое, МПа;
- $\Delta\sigma_{-1}$ – величина повышения предела выносливости лопатки, %;
- ΔH_{50} – степень упрочнения лопатки, %

Виброупрочнение производилось шариками диаметром 2 мм на серийной U – образной виброустановке с применением антикоррозионной жидкости ГЖ-1. Исходная величина предела выносливости лопатки $\sigma_{-1} = 425$ МПа.

Зависимость предела выносливости σ_{-1} лопатки от комплексного влияния параметров качества поверхностного слоя аэродинамических поверхностей на основе уравнений линейной множественной регрессии можно представить в виде следующей математической модели:

$$\left. \begin{aligned}
 A_0 + A_1 \sum R_a + A_2 \sum h_s + A_3 \sum \Delta H_{50} + A_4 \sum \sigma_{\text{ост.сж}} &= \sum \Delta \sigma_{-1} \\
 A_0 \sum R_a + A_1 \sum R_a^2 + A_2 \sum h_s R_a + A_3 \sum \Delta H_{50} R_a + A_4 \sum \sigma_{\text{ост.сж}} R_a &= \sum R_a \Delta \sigma_{-1} \\
 A_0 \sum h_s + A_1 \sum h_s R_a + A_2 \sum h_s^2 + A_3 \sum \Delta H_{50} h_s + A_4 \sum \sigma_{\text{ост.сж}} h_s &= \sum h_s \Delta \sigma_{-1} \\
 A_0 \sum \Delta H_{50} + A_1 \sum \Delta H_{50} R_a + A_2 \sum h_s \Delta H_{50} + A_3 \sum \Delta H_{50}^2 + A_4 \sum \sigma_{\text{ост.сж}} \Delta H_{50} &= \sum \Delta H_{50} \Delta \sigma_{-1} \\
 A_0 \sum \sigma_{\text{ост.сж}} + A_1 \sum \sigma_{\text{ост.сж}} R_a + A_2 \sum h_s \sigma_{\text{ост.сж}} + A_3 \sum \Delta H_{50} \sigma_{\text{ост.сж}} + & \\
 + A_4 \sum \sigma_{\text{ост.сж}}^2 &= \sum \sigma_{\text{ост.сж}} \Delta \sigma_{-1}
 \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где n – количество сопряженных значений параметров;

A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты, значения которых необходимо определить.

На основе принятой математической модели получена эмпирическая зависимость приращения предела выносливости $\Delta \sigma_{-1}$ после виброупрочнения от комплексного влияния параметров качества поверхностного слоя пера лопатки

$R_a, h_s, \Delta H_{50}, \sigma_{\text{ост.сж}}$ в указанном на рис. 2 диапазоне их изменения:

$$\begin{aligned}
 \Delta \sigma_{-1} &= 99,030 - 28,413 R_a - \\
 &- 0,075 h_s - 2,895 \Delta H_{50} - 0,100 \sigma_{\text{ост.сж}}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Из уравнения (14) следует, что наибольшее влияние на повышение предела выносливости лопатки для данного процесса оказывают параметры R_a и ΔH_{50} .

Повышение шероховатости и степени упрочнения аэродинамических поверхностей лопатки в указанном диапазоне значительно снижает величину предела выносливости.

Таким образом, полученные эмпирические зависимости устанавливают связь основных параметров качества поверхностного слоя с величиной приращения предела выносливости лопаток при их виброупрочнении.

Выводы

1. В работе представлена математическая модель влияния технологической наследственности на приращение предела выносливости при одновременном воздействии в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности детали силовой и температурного факторов в процессе ее финишной обработки.

2. Показана целесообразность применения на финишных операциях изготовления деталей низкотемпературных финишных методов обработки, где силовой фактор преобладает над температурным.

3. Показано, что на деталях с концентраторами напряжений на их несущих поверхностях наибольшее влияние на приращение предела выносливости оказывают остаточные напряжения сжа-

тия. Выбран критерий для определения величины приращения предела выносливости после выполнения упрочняющей обработки.

4. Предложена на основе уравнений линейной множественной регрессии математическая модель зависимости приращения предела выносливости от комплексного влияния параметров качества поверхностного слоя аэродинамических поверхностей лопаток из титанового сплава ВТ8 после их виброупрочнения.

Список литературы

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД : монография. Ч. 1. Лопатки компрессора и вентилятора / [Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье : изд.-во АО «Мотор Сич», 2003. – 369 с.
2. Богуслаев В. А. Финишные технологии обработки деталей ГТД [Текст] / Богуслаев В. А., Качан А. Я., Мозговой В. Ф. // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 1. – С. 71–78.
3. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / [Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье : изд.-во АО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
4. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.
5. Ящерицын П. И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин / Ящерицын П. И., Скорынин Ю. В. – Минск : Наука и техника, 1978. – 120 с.
6. Качан А. Я. Влияние технологической наследственности на предел выносливости лопаток ГТД / Качан А. Я. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета : сб. научн. тр. – Харьков, ХГПУ. – 1999. – Вып. 36. – С. 16–20.
7. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости упрочненной детали / [В. Ф. Павлов, С. Бордаков, В. С. Вакулюк и др.] // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 5 (21). – С. 16–20.
8. Качан А. Я. Влияние режимных параметров и параметров качества поверхностного слоя на

предел выносливости лопаток ГТД при их виброупрочнении / Качан А. Я., Петренко А. П. // Вестник Харьковского государственного

политехнического университета : сб. научн. тр. – Харьков, ХГПУ. – 1999. – Вып. 42. – С. 102–104.

Поступила в редакцию 26.01.2015

Качан О.Я., Уланов С.О. Математичне моделювання впливу технологічної спадковості фінішних методів обробки на границю витривалості деталей ГТД

У роботі представлено математичні моделі впливу технологічної спадковості фінішних методів обробки на збільшення границі витривалості деталей ГТД при одночасному впливі силового і температурного факторів у зоні контакту інструмента і оброблюваної поверхні. На основі проведеного аналізу зроблено висновок про доцільність застосування на фінішних операціях виготовлення деталей ГТД низькотемпературних фінішних методів обробки, де силовий фактор переважає над температурним.

Представлено математичні моделі для визначення збільшення границі витривалості після виконання на фінішних операціях низькотемпературної зміцнювальної обробки.

Ключові слова: деталі ГТД, технологічна спадковість, математична модель, границя витривалості, силовий фактор, температурний фактор, параметри якості поверхневого шару.

Kachan A., Ulanov S. Mathematical modeling of influence of technological heredity of finishing methods on the fatigue limit of gas turbine engine parts

The article features mathematical models of influence of technological heredity of finishing methods on the increase in the fatigue limit of GTE parts under a simultaneous action of force and temperature factors at the interface of a tool and the machined surface. The article contains the conclusion on the advisability of use of low-temperature finishing methods, where a temperature factor dominates over a force factor, while carrying out finishing operations in the process of manufacture of GTE parts, made on the basis of the analysis performed.

The article also contains mathematical models for determination of the increase in the fatigue limit after low-temperature strengthening treatment, while carrying out finishing operations.

Key words: GTE parts, technological heredity, mathematical model, fatigue limit, force factor, temperature factor, quality characteristics of the surface coating.