

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2009 В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк, А. В. Чирков

Самарский государственный аэрокосмический университет

Показана возможность прогнозирования остаточного напряжённого состояния поверхностного слоя деталей сложной формы после упрочнения и оптимизации эффекта упрочнения.

Остаточные напряжения, концентрация остаточных напряжений, диаграмма предельных амплитуд цикла детали.

Одним из основных параметров качества поверхностного слоя являются остаточные напряжения, сопутствующие любой обработке поверхности детали. Методы поверхностного упрочнения, широко применяемые в современном авиастроении и приводящие к созданию в поверхностном слое деталей благоприятных сжимающих остаточных напряжений, существенно повышают характеристики их работоспособности, особенно в условиях концентрации напряжений. Назначение оптимальных способов, вариантов, схем и режимов поверхностного упрочнения деталей на стадии их проектирования является актуальной задачей, т.к. при сравнительно небольших затратах позволяет улучшить качество выпускаемых деталей.

В механике остаточных напряжений можно выделить несколько проблем, не полностью решенных. Это образование и определение остаточных напряжений, коробление деталей в результате образования и релаксации остаточных напряжений, влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости.

Образование остаточных напряжений. Теория формирования остаточных напряжений после поверхностного упрочнения в принципе сводится к сложной задаче теории пластичности. Часто полученное решение оказывается далёким от действительности ввиду использования весьма приближённых исходных данных (распределение температуры и предела текучести в тонком поверхнос-

тном слое детали, распределение контактных усилий между инструментом и деталью и др.). Поэтому для выявления закономерностей образования остаточных напряжений после поверхностного упрочнения гладких деталей и деталей с концентраторами напряжений был развит метод И. А. Биргера [1], использующий первоначальные деформации, которые можно поставить в соответствие остаточным напряжениям по законам упругости. При таком подходе возникает задача теории упругости, аналогичная задаче термоупругости, которая решается для деталей сложной формы методом конечных элементов. Несмотря на то, что для определения первоначальных деформаций нужно иметь заранее известные остаточные напряжения, получены решения, позволяющие обойти это затруднение путём использования простых схем распределения первоначальных деформаций. По этим решениям и данным о распределении остаточных напряжений в гладких деталях представляется возможным прогнозировать остаточное напряжённое состояние поверхностного слоя деталей сложной формы после упрочняющих обработок и, следовательно, прогнозировать и оптимизировать эффект упрочнения.

На рис. 1 в качестве примера представлено распределение меридиональных остаточных напряжений σ_j на поверхности первой впадины ёлочного замка лопатки ГТД [2], полученное расчётом по первоначальным деформациям при упрочнении, соответству-

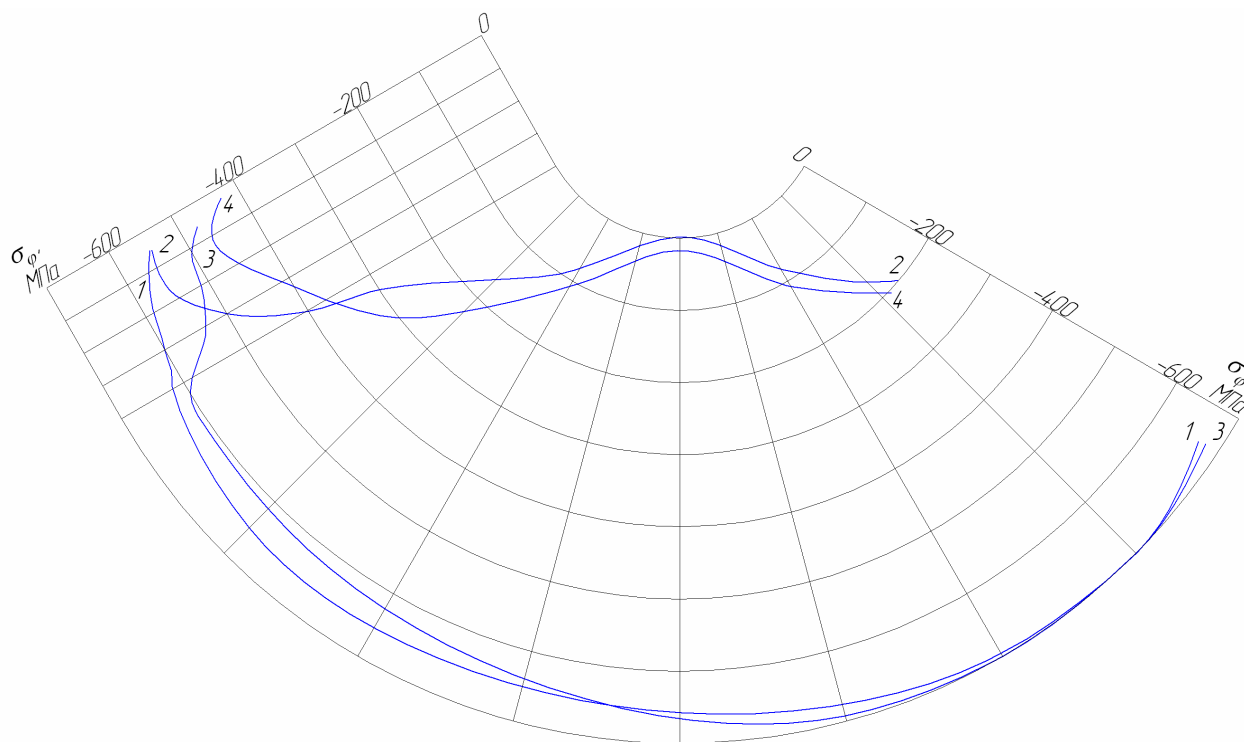


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений на поверхности первой впадины замка лопатки:
1, 2 – обработка микрошариками; 3, 4 – обработка дробью; 1, 3 – равномерное упрочнение всей детали;
2, 4 – без упрочнения криволинейной части впадины

ющем обработке микрошариками (варианты 1 и 2) и дробью (варианты 3 и 4) по двум схемам: равномерном упрочнении всей поверхности детали (варианты 1 и 3) и без упрочнения криволинейной части впадин (варианты 2 и 4). Видно, что при равномерном упрочнении всей поверхности замка остаточные напряжения по угловой координате достаточно однородны, при упрочнении замка лопатки без обработки криволинейной части впадин (варианты 2 и 4) в опасных зонах наклепа нет, а остаточные напряжения оказываются достаточно высокими, достигая половины наибольших напряжений при равномерном упрочнении.

Установлены закономерности формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей под воздействием циклических нагрузок в зависимости от свойств материала, степени концентрации напряжений, вида деформации. На основании этих закономерностей предложена методика расчёта предела выносливости деталей, первоначально свободных от остаточных напряжений, разработаны рекомендации по выбору

оптимальных параметров упрочнения методом тренировки при напряжениях, равных или несколько превышающих предел выносливости, обосновано отличие эффективного и теоретического коэффициентов концентрации напряжений с позиций механики остаточных напряжений.

Определение (измерение) остаточных напряжений. Разработаны методы определения остаточных напряжений в резьбовых [3] и шлицевых [4] деталях, зубчатых колёсах [5], деталях с надрезами полукруглого, полуэллиптического и V-образного профиля [6-10]. Необходимая для расчётов связь между остаточными напряжениями и перемещениями, возникающими при послойном удалении поверхностных слоёв концентратора, устанавливалась методом конечных элементов. Эта зависимость для меридиональных остаточных напряжений имеет вид

$$s_j = \frac{E}{(1+m)(1-2m)n \cdot k} \cdot \frac{d}{da} \left[\frac{f(a)}{c(a)} \right], \quad (1)$$

где E - модуль продольной упругости материала, m - коэффициент Пуассона, n - число исследуемых концентраторов, k - коэффициент, учитывающий схему закрепления детали при удалении слоёв, $f(a)$ - перемещение детали при удалении слоя толщиной a , $c(a)$ - коэффициент, зависящий от вида детали, её геометрических параметров и толщины удалённого слоя.

Полученные решения позволили провести исследования остаточных напряжений в ряде ответственных авиационных деталей, выявить резервы повышения надёжности и долговечности и пути их реализации, разработать методы контроля стабильности технологии.

На рис. 2 представлено распределение меридиональных (осевых в наименьшем сечении) остаточных напряжений σ_j по толщине поверхностного слоя a впадин резьбы шпилек М10 из стали 30ХГСА после формирования профиля резьбы различными способами: шлифованием, нарезанием резцом и плашкой, накатыванием, фрезерованием. Можно видеть, что шлифование наводит в тонком поверхностном слое растягивающие напряжения, нарезание резцом и плашкой, фрезерование – сжимающие напряжения, которые на расстоянии 50-120 мкм от поверхности меняют знак. Накатывание создаёт в поверхностных слоях впадин значительные

по величине сжимающие остаточные напряжения с подповерхностным максимумом и большой глубиной залегания.

Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости. Разработана теория влияния остаточных напряжений на сопротивление многоциклового усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений, основанная на феномене нераспространяющихся трещин усталости [11-12]. Эти трещины всегда образуются в упрочнённых деталях с концентраторами напряжений под воздействием переменных напряжений, близких к пределу выносливости. Многочисленными экспериментами [13-15] установлено, что критическая глубина $t_{\text{ед}}$ нераспространяющейся трещины усталости ($t_{\text{ед}}$ – глубина трещины при пределе выносливости) определяется только размером опасного сечения детали по формуле

$$t_{\text{кр}} = 0,0216 D \quad (2)$$

и не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, последовательности изготовления и упрочнения концентратора, наклёпа, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации и асимметрии цикла напряжений.

Приращение предела выносливости упрочнённой детали с концентратором напряжений в случае симметричного цикла определяется зависимостью

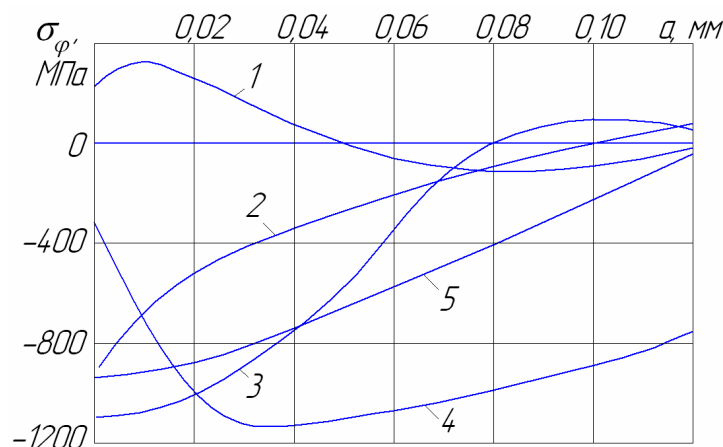


Рис. 2. Остаточные напряжения во впадинах резьбы шпилек М10 из стали 30ХГСА после: 1- шлифования, 2- нарезания резцом, 3- нарезания плашкой, 4 – накатывания, 5 – фрезерования

$$DP_{-1} = \bar{y}_p | \bar{s}_{i\bar{n}\bar{o}} |, \quad (3)$$

где $\bar{y}_p$ - коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости,

$$\bar{s}_{i\bar{n}\bar{o}} = \int_0^1 \frac{s_z(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx \quad - \quad (4)$$

критерий остаточных напряжений [11-12], $s_z(x)$ - осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали, $x = a/t_{кр}$ - расстояние от поверхности концентратора до текущего слоя a , выраженное в долях $t_{кр}$. Опытным путём установлено [3, 11-16], что для деталей с концентраторами, через которые не передаются внешние силы, при изгибе и растяжении-сжатии $\bar{y}_s = 0,36$, при кручении $\bar{y}_t = 0,18$; для случая втулки, напрессованной на вал, при изгибе $\bar{y}_s = 0,25$; для резьбы с

гайкой при растяжении-сжатии $\bar{y}_s = 0,11$. Результаты расчёта приращений предела выносливости по формуле (3) с использованием указанных коэффициентов $\bar{y}_p$ оказались достаточно близкими к экспериментальным значениям.

На основе разработанной теории влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости предложена методика построения диаграммы предельных амплитуд цикла деталей с концентраторами напряжений с учётом остаточных напряжений. На рис. 3 (s_a - амплитуда цикла, s_o - среднее напряжение цикла) сплошными линиями представлены диаграммы 1 и 2 для болтов М6 из сплава ВТ16 после накатывания и отжига (без остаточных напряжений), а также после отжига и накатывания (с остаточными напряжениями).

Результаты эксперимента, нанесённые на рис. 3 точками, указывают на достаточно

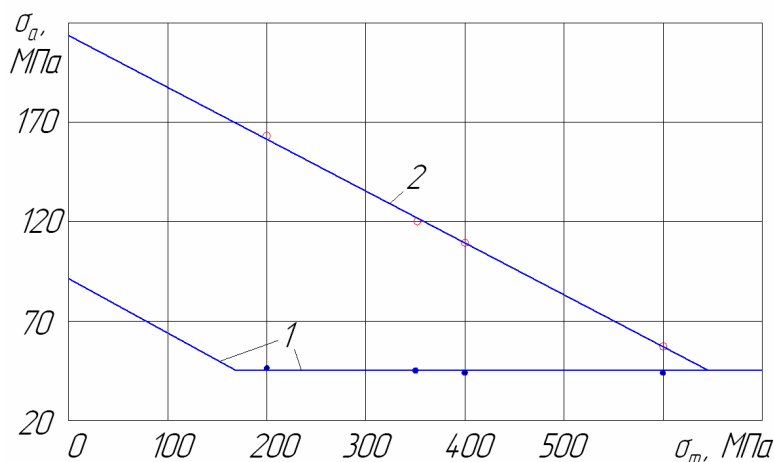


Рис. 3. Диаграммы предельных амплитуд цикла болтов М6 из сплава ВТ16, накатанных до (1) и после (2) отжига:

• - накатывание + отжиг; ○ - отжиг + накатывание

хорошее совпадение опытных данных и расчёта.

Библиографический список

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. - М.: Машгиз, 1963. - 232 с.
2. Павлов В.Ф., Столяров А. К., Ухов В. Н. Исследование распределения ос-

таточных напряжений в замковой части лопатки турбины ГТД по первоначальным деформациям // Известия вузов. Авиационная техника. - 1989. - №1. - С.109-111.

3. Иванов С. И., Павлов В. Ф., Коновалов Г. В., Минин Б. В. Роль остаточных напряжений в сопротивлении усталости высо-

копрных резьбовых деталей // КуАИ. – Куйбышев. – 1993. – 260 с. – Деп. в ВИНТИ 27.05.93, № 1423-B93.

4. Иванов С. И., Трофимов Н. Г., Вакулюк В. С., Шатунов М. П., Фрейдин Э. И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости шлицевых валов // Вестник машиностроения. – 1985. – №7. – С.12-14.

5. Иванов С. И., Трофимов Н. Г., Ермаков В. М., Ковалкин Ю. П., Фрейдин Э. И. Остаточные напряжения во впадинах шестерён // Остаточные технологические напряжения: Труды II Всесоюзного симпозиума. – М.: ИПМ АН СССР. – 1985. – С. 179-184.

6. Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Труды КуАИ. – Куйбышев. – 1973. – Вып.60. – С.160-170.

7. Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Труды КуАИ. – Куйбышев. – 1974. – Вып.1. – С.88-95.

8. Павлов В. Ф., Кольцун Ю. И., Кирпичёв В. А. Определение остаточных напряжений в цилиндрических образцах с V-образным надрезом // Известия вузов. Авиационная техника. – 1986. – № 4. – С. 92-95.

9. Павлов В. Ф., Бордаков С. А., Павлович Л. И., Мальков Г. Ф. Определение концентрации остаточных напряжений в цилиндрических

деталей с полукруглым кольцевым надрезом // КуАИ. – Куйбышев. – 1987. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ 05.11.87. – № 7759-B87.

10. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Бордаков С. А. Остаточные напряжения в образцах прямоугольного сечения с надрезами V-образного профиля // Известия вузов. Машиностроение. – 1989. – № 9. – С. 6-10.

11. Павлов В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.

12. Павлов В. Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – № 7. – С. 3-6.

13. Павлов В. Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 8. – С. 22-26.

14. Павлов В. Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37-40.

15. Павлов В. Ф., Прохоров А. А. Связь остаточных напряжений и предела выносливости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1991. – № 5. – С. 43-46.

References

1. Birger I. A. Residual stress. Moscow: Mashgis, 1963, 232 pp.

2. Pavlov V. F., Stolyarov A. K., Ukhov V. N. Analysis of residual stress distribution in the turbine blade locking piece of a gas-turbine engine over initial deformation // Izvestiya vuzov. Aircraft engineering. – 1989. – No. 1. – pp. 109-111.

3. Ivanov S. I., Pavlov V. F., Konovalov G. V., Minin B. V. The role of residual stress in fatigue strength of high-strength threaded parts / / KuAI. – Kuibyshev, 1993. – 260 pp. – Dep. at the All-Russian Institute of Scientific and

Engineering Information. 27.05.93, No. 1423 – B93.

4. Ivanov S. I., Trofimov N. G., Vakulyuk V. S., Shatunov M. P., Freidin E. I. Residual stresses and fatigue strength of spline shafts. // Vestnik mashinostroyeniya, 1985. – No. 7, pp. 12-14.

5. Ivanov S. I., Trofimov N. G., Yermolayev V. N., Kovalkin Yu. P., Freidin E. I. Residual stresses in gear tooth space. // Residual technological stresses: Transactions of the II All-Union symposium – Moscow: AMI Academy of Science of the USSR, 1985 – pp. 179-184.

6. Ivanov S. I., Shatunov M. P., Pavlov V. F. Defining additional residual stresses in cuts on cylindrical parts // Issues of aircraft structure element strength: KuAI transactions. - Kuibyshev. – 1973. – Issue 60. – pp. 160-170.

7. Ivanov S. I., Shatunov M. P., Pavlov V. F. Residual stress effect on the endurance of specimens with cuts // Issues of aircraft structure element strength: KuAI transactions. - Kuibyshev. – 1977. – Issue 1. – pp. 88-95.

8. Pavlov V. F., Koltsun Yu. I., Kirpichyov V. A. Defining residual stresses in cylindrical specimens with a V-shaped cut // Izvestiya vuzov. Aircraft engineering. – 1968. – No. 4. – pp. 92-95.

9. Pavlov V. F., Bordakov S. A., Pavlovitch L. I., Malkov G. F. Defining residual stress concentration in cylindrical part with a semicircular ring cut // KuAI. – Kuibyshev. – 1987. – 14 pp. – Dep. at the All-Union Institute of Scientific and Engineering Information 05.11.87. – No. 7759-B87.

10. Pavlov V. F., Kirpichyov V. A., Bordakov S. A. Residual stresses in rectangular-section specimens with V-shaped cuts // Izvestiya vuzov. Machinostroyeniye. – 1989. – No. 9. – pp. 6-10.

11. Pavlov V. F. The relation between residual stress and fatigue limit in case of bending in conditions of stress concentration // Izvestiya vuzov. Machinostroyeniye. – 1986. – No. 8. – pp. 29-32.

12. Pavlov V. F. The effect of the nature of residual stress distribution along the thickness of component surface layer on fatigue strength // Izvestiya vuzov. Machinostroyeniye. – 1987. – No. 7. – pp. 3-6.

13. Pavlov V. F. The effect of residual stress magnitude and distribution in the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Presentation I. Solid part // Izvestiya vuzov. Machinostroyeniye. – 1988. – No. 8. – pp. 22-26.

14. Pavlov V. F. The effect of residual stress magnitude and distribution in the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Presentation II. Hollow parts // Izvestiya vuzov. Machinostroyeniye. – 1988. – No. 12. – pp. 37-40.

15. Pavlov V. F., Prokhorov A. A. The relation between stress and endurance limit during torsion in conditions of stress concentration // Problemy protchnosti (Problems of strength) 1991. – No. 5. – pp. 43-46.

INCREASING THE RELIABILITY OF AIRCRAFT COMPONENTS BY REGULATING TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESS

© 2009 V. A. Kirpichyov, V. S. Vakulyuk, A. V. Tchirkov

Samara State Aerospace University

The paper shows the possibility of forecasting residual stressed state of component surface layer after strengthening and the optimization of strengthening effect. Methods of defining residual stress are developed and a theory of its influence on fatigue strength is proposed.

Residual stress, residual stress concentration, diagram of component cycle limiting amplitudes.

Информация об авторах

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доцент кафедры сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет, e-mail: sopromat@ssau.ru, область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Вакулюк Владимир Степанович, доцент кафедры сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический универси-

тет, e-mail: sopromat@ssau.ru, область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Чирков Алексей Викторович, ассистент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет, e-mail: sopromat@ssau.ru, область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Kirpichyov Viktor Alexeyevitch, associate professor of the department of strength of materials, candidate of technical sciences, associate professor, Samara State Aerospace University, e-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stress.

Vakulyuk Vladimir Stepanovitch, associate professor of the department of strength of materials, candidate of technical science, associate professor, Samara State Aerospace University, e-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stress.

Tchirkov Alexey Victorovitch, assistant of the department of strength of materials, Samara State Aerospace University, e-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stress.