

УДК 621.787.539

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

© 2017 Ю.П. Ковалкин, В.С. Вакулук, В.К. Шадрин, Е.Г. Кочерова, К.Ф. Матвеева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 22.03.2017

Проведено исследование влияния технологии изготовления зубчатых колёс на величину остаточных напряжений в поверхностном слое впадин зубьев шестерён. Оценка влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений. Результаты исследования подтверждены испытаниями на усталость.

Ключевые слова: *зубчатое колесо, технология изготовления, упрочнение, остаточные напряжения, предел выносливости*

Технологические остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое деталей с концентраторами в процессе их изготовления, оказывают существенное влияние на сопротивление усталости. К таким деталям, в частности, относятся зубчатые колёса авиационных газо-турбинных двигателей (ГТД), входящие в состав редукторов (коробки моторных и самолётных агрегатов, редукторы ТВД). В ходе исследований рассматривалось влияние сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое впадин зубчатых колёс на приращение предела выносливости при изгибном нагружении.

Зубчатые колёса изготавливались из материала 12Х2Н4А по стандартной технологии, типичной для авиационного двигателестроения. Зубья имели эвольвентный профиль, у их основания – поднутрение в форме удлинённой гипоциклоиды (рис. 1), сделанное для выхода инструмента в процессе шлифования боковой поверхности с целью повышения кинематической точности зубчатой передачи. В табл. 1 приведены варианты технологического цикла и номера партий.

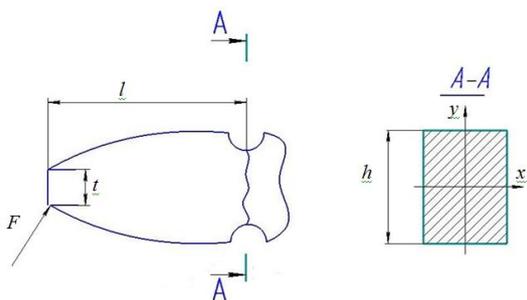


Рис. 1. Схема нагружения зуба

Ковалкин Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов. E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru)

Вакулук Владимир Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов

Шадрин Валентин Карпович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов

Кочерова Евгения Евгеньевна, аспирантка

Матвеева Карина Фёдоровна, студентка

Основная масса образцов подвергалась химико-термической обработке, включающей в себя цементацию на глубину 1,0-1,3 мм при температуре 925°C в течение 7 часов; нормализацию при температуре 870°C в течение 50-60 минут; высокий отпуск при температуре 650°C в течение 4-5 часов; закалку в масле при температуре 790°C в течение 30-35 минут и низкий отпуск при температуре 150°C в течение 2 часов. Подобная технология создаёт в поверхностном слое мартенситную структуру с высокой твёрдостью 60-63 HRC, повышающей износостойкость боковых поверхностей зубьев зубчатых колёс.

Меридиональные  $\sigma_{\varphi}$  остаточные напряжения во впадинах зубчатых колёс определялись по методике, изложенной в работах [1, 2]. Распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  впадин исследуемых зубчатых колёс представлено на рис. 2. Наблюдалось существенное рассеяние остаточных напряжений в пределах каждой партии шестерён, поэтому в каждой партии исследовалось по 10-25 деталей, а результаты подвергались статистической обработке [3]. Сравнение двух способов формообразования зубьев (долбление, партия 1 и фрезерование, партия 8) показывает, что фрезерование приводит к более высоким по величине остаточным напряжениям, чем долбление (рис. 2). Однако в обоих случаях остаточные напряжения малы и имеют наибольший в сравнении с другими партиями шестерён коэффициент вариации.

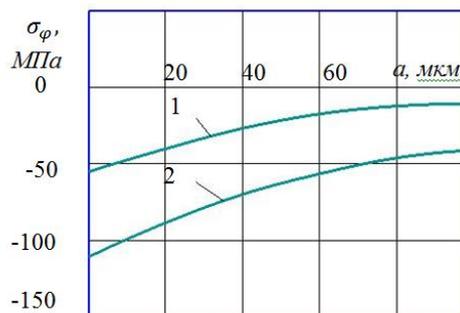


Рис. 2. Остаточные напряжения в поверхностном слое впадин зубчатых колёс:

1 – партия 1, 2 – партия 8

Таблица 1. Варианты технологии изготовления партий зубчатых колёс

№ партии	Кол-во образцов	Модуль, число зубьев, угол зацепления, $\alpha^\circ$	Технология изготовления
1	9	3, 25, 25	долбление
2	28	то же	фрезерование, термообработка, пескоструйная обработка, шлифование, покрытие, обдувка дробью
3	24	то же	фрезерование, термообработка, пескоструйная обработка, шлифование, покрытие
4	11	то же	долбление, термообработка, пескоструйная обработка
5	10	то же	фрезерование, термообработка, пескоструйная обработка, шлифование
6	18	то же	фрезерование, термообработка, пескоструйная обработка, шлифование, покрытие, упрочнение микрошариками
7	33	2, 37, 20	фрезерование, термообработка, пескоструйная обработка, шлифование, покрытие, обдувка дробью
8	12	3, 25, 25	фрезерование
9	12	то же	фрезерование, термообработка
10	10	то же	фрезерование, термообработка, пескоструйная обработка

После химико-термической обработки остаточные напряжения значительно увеличиваются (партия 9), что существенно снижает их рассеяние (рис. 3). Последующая за химико-термической обработкой обдувка металлическим песком, применяемая в качестве зачистной операции для удаления окалины, приводит к резкому увеличению сжимающих остаточных напряжений во впадинах шестерён (партии 10, 4), однако наряду с ростом остаточных напряжений, происходит существенное увеличение их рассеяния (рис.4). Это связано, по-видимому, с тем, что пескоструйная обработка является ручной нерегламентированной операцией. Следует отметить, что большое рассеяние остаточных напряжений не устраняется последующими операциями, и это указывает на необходимость регламентации операции обдувки металлическим песком.

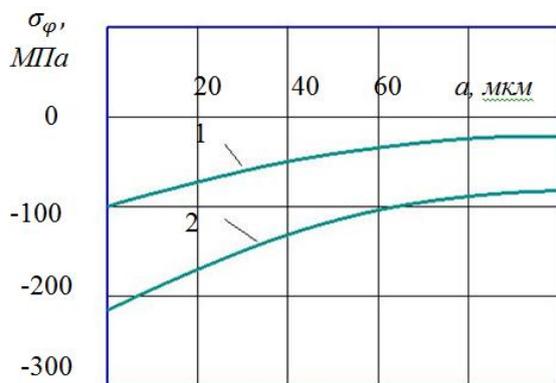


Рис. 3. Остаточные напряжения в поверхностном слое впадин зубчатых колёс: 1 – партия 8, 2 – партия 9

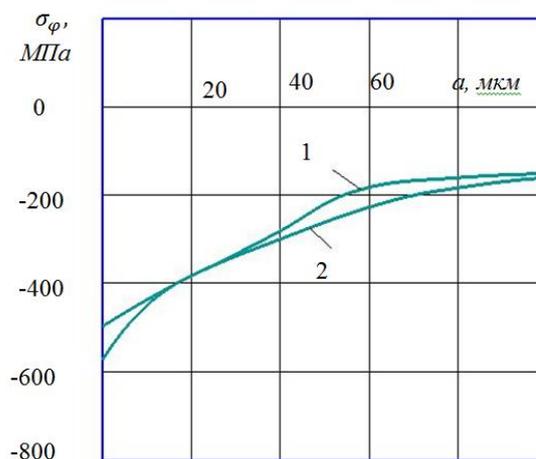


Рис. 4. Остаточные напряжения в поверхностном слое впадин зубчатых колёс: 1 – партия 4, 2 – партия 10

Упрочнение дробью рабочей поверхности профиля зуба позволяет повысить сжимающие остаточные напряжения во впадинах шестерён (партия 1 в сравнении с партией 3), коэффициент вариации также увеличивается. Обращает на себя внимание относительно небольшой прирост сжимающих остаточных напряжений (около 20%), средний уровень которых ниже уровня напряжений, характерных для исследуемого материала после аналогичного режима обдувки дробью [4]. Высокое рассеяние и небольшой относительный прирост сжимающих остаточных напряжений можно объяснить тем, что дробь попадает на дно впадины, в основном, не по нормали, а по касательной после отскока от рабочей поверхности профиля зуба. Подобное трактование находит своё подтверждение и в работе [5]. Для создания больших сжимающих остаточных напряжений на дне впадины, определяющих сопротивление усталости зуба при изгибе, следует

усовершенствовать существующую обработку дробью, либо ввести в технологический процесс специальную упрочняющую обработку дна впадин шестерён.

Упрочнение шестерён микрошариками на ротационной установке УСМ-1 (диаметр шарика 0,1-0,315 мм, число оборотов ротора 2600 об/мин, время обработки –4 мин) даёт приблизительно такой же эффект, что и упрочнение дробью (партии 1и 7 в сравнении с 1и 6). Применение покрытия шестерён – оксидирования (партия 3 по сравнению с партией 5) практически не изменяет остаточных напряжений в поверхностном слое впадин (рис. 5).

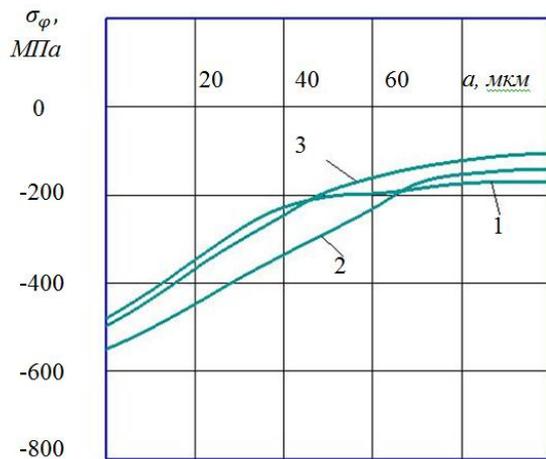


Рис. 5. Остаточные напряжения в поверхностном слое впадин зубчатых колёс: 1 – партия 3, 2 – партия 6, 3 – партия 5

Влияние остаточных напряжений во впадинах зубчатых колёс на приращение предела выносливости  $\Delta\sigma_R$  проводилось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [6, 8, 9] по следующей формуле:

$$\Delta\sigma_R = \bar{\psi}_\sigma \left| \bar{\sigma}_{ост} \right|,$$

где  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ . Критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$  определялся по формуле:

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_\varphi(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi,$$

где  $\sigma_\varphi(\xi)$  – окружные остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором;

$\xi = \frac{a}{t_{кр}}$  – расстояние от дна впадины зубчатого колеса до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ . Через  $t_{кр}$  обозначена максимально возможная глубина нераспространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе детали на пределе выносливости [6].

$$t_{кр} = 0,0216xh = 0,0216 \times 6,2 = 0,134 \text{ мм},$$

где  $h$  – опасное сечение зуба шестерни в месте образования и развития усталостной трещины (рис. 1).

С целью оценки влияния технологии изготовления зубчатых колёс на предел выносливости были проведены испытания на усталость при отнулевом положительном цикле; база испытаний –  $3 \times 10^6$  циклов. Испытания осуществлялись по методу «лестницы» [7], позволяющему при сравнительно небольшом количестве образцов определить среднее значение предела выносливости и его среднеквадратичное отклонение. Результаты испытаний на усталость и значения среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  приведены в табл. 2, где  $\sigma_\alpha$  – амплитудное значение предела выносливости, которое при отнулевом цикле нагружения определяется как  $\sigma_{max}/2$ .

Таблица 2. Значения среднеинтегральных остаточных напряжений в поверхностном слое впадин зубчатых колёс и результаты испытаний на усталость

№ партии	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\sigma_R$ , МПа	$\sigma_\alpha$ , МПа	$\Delta\sigma_R$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	-22,9	572	286		
2	-285	866	433	147	0,516
3	-195	778	389	103	0,528
4	-214	844	422	136	0,636
5	-185	775	388	102	0,551
6	-221	858	429	143	0,647
				среднее	0,516

Коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\psi}_\sigma$  определялся в виде отношения  $\Delta\sigma_R/\bar{\sigma}_{ост}$ .

**Выводы:**

1. Зубчатые колёса, изготовленные по стандартной технологии, принятой в авиационном двигателестроении, имеют у поверхности дна впадин

сжимающие остаточные напряжения, оказывающие положительное влияние на увеличение предела выносливости.

2. Уровень остаточных напряжений характеризуется большим рассеянием, что связано с присутствием в технологическом цикле ручных нерегулируемых операций (обдувка металлическим песком для удаления окалины после химикотермической обработки). Регламентировать эту

операцию можно посредством механизации, что является резервом повышения надёжности и долговечности зубчатых зацеплений авиационных ГТД.

3. Из представленных в табл. 2 данных видно, что с увеличением критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  предел выносливости зубчатых колёс увеличивается. Среднее значение коэффициента влияния поверхностного упрочнения  $\bar{\psi}_{\sigma}$  на предел выносливости исследованных партий шестерён составляет 0,516, что согласуется с данными работы [6] для образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Иванов, С.И. Способ измерения остаточных напряжений в шестернях. / С.И. Иванов, Н.Г. Трофимов, М.П. Шатунов и др. – Авторское свидетельство №1439380, 1984.
2. Шатунов, М.П. Применение метода конечных элементов для определения остаточных напряжений во впадинах шестерён / М.П. Шатунов, Ю.П. Ковалкин. – Рукопись деп. ВНИИТЭМР, № 301, 1986. 27 с.
3. Пустыльник, Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. 341 с.
4. Кузнецов, Н.Д. Технологические способы повышения надёжности и ресурса деталей газотурбинных двигателей / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков // Новые технологические процессы и надёжность ГТД. Сборник ЦИАМ. 1975. №3. С. 12.
5. Туровский, М.Л., Концентрация напряжений в поверхностном слое цементованной стали / М.Л. Туровский, И.М. Шифрин // Вестник машиностроения. 1970. №11. С. 37-40.
6. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
7. Степнов, М.П. Статистическая обработка результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1972. С. 211-214.
8. Вакулюк, В.С. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов с концентраторами напряжений / В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв, В.Ф. Павлов, В.П. Сазанов // Вестник УГАТУ. 2013. Т.17. №1(54). С. 45-49.
9. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.

### THE INFLUENCE OF PROCESSING TECHNOLOGY ON THE RESIDUAL STRESSES AND FATIGUE RESISTANCE OF GEARS

© 2017 Yu.P. Kovalkin, V.S. Vakulyuk, V.K. Shadrin, E.E. Kocherova, K.F. Matveeva

Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov

The influence of gears processing technology on the value of residual stresses in the surface layer of gear teeth cavities has been studied. The evaluation of residuals tresses influence on the endurance limit increase was carried out using the average integral residual stresses criterion. The results of the study were proven by fatigue tests.

Key words: *gear, processing technology, hardening, residual stress, endurance limit*

---

Yuriy Kovalkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Strength of Materials Department. E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru)

Vladimir Vakulyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Strength of Materials Department

Valentin Shadrin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Strength of Materials Department

Evgeniya Kocherova, Post-graduate Student

Karina Matveeva, Student