

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДРОБЬЮ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРОМ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

© 2009 В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк

Самарский государственный аэрокосмический университет

Для гладкой цилиндрической детали с отверстием в случае опережающего поверхностного пластического деформирования (ОПД) вычислены дополнительные напряжения после нанесения кругового надреза полукруглого профиля. Установлено, что при одних и тех же остаточных напряжениях гладкой детали дополнительные напряжения в наименьшем сечении равны напряжениям сплошной детали с поперечным размером, равным удвоенной толщине стенки.

Выявлена возможность определения остаточных напряжений в упрочнённых деталях с концентраторами по остаточным напряжениям образцов-свидетелей, обработанных одновременно с деталями.

*Опережающее поверхностное пластическое деформирование, степень концентрации напряжений, прогнозирование предела выносливости.*

В современном машиностроении широкое применение находят различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД) и опережающего поверхностного пластического деформирования (ОПД), приводящие к повышению сопротивления усталости деталей, особенно в условиях концентрации напряжений. Наиболее широко в промышленности применяются такие методы упрочнения, как пневмо- и гидродробеструйная обработка, обработка микрошариками, так как эти методы позволяют упрочнять детали сложной формы. Повышение сопротивления усталости деталей связано с возникновением в их тонком поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Предложенный в [1,2] критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{S}_{ост}$  позволяет прогнозировать приращение предела выносливости в случае симметричного цикла  $\Delta P_{-1}$  упрочнённой детали по известному распределению остаточных напряжений в области концентратора по следующей зависимости:

$$DP_{-1} = \bar{y}_p |\bar{S}_{i\dot{n}\delta}|, \quad (1)$$

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

рый для концентраторов типа надреза, галтели, свободной резьбы (без гайки) равен в случае растяжения-сжатия и изгиба 0,36, в случае кручения – 0,18 [2].

Критерий  $\bar{S}_{i\dot{n}\delta}$  вычисляется по формуле

$$\bar{S}_{i\dot{n}\delta} = \frac{2}{p} \int_0^1 \frac{S_z(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx, \quad (2)$$

где  $S_z(x)$  - осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали по толщине поверхностного слоя  $a$ ;  $x = a/t_{\delta\delta}$  - расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{\delta\delta}$ ;  $t_{\delta\delta}$  - критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Измерение (определение) остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений является достаточно сложной и трудоёмкой задачей, поэтому возникает необходимость в выявлении возможности определения остаточных напряжений в упрочнённых деталях с концентраторами по остаточным напряжениям образцов-свидетелей, обработанных одновременно с деталями.

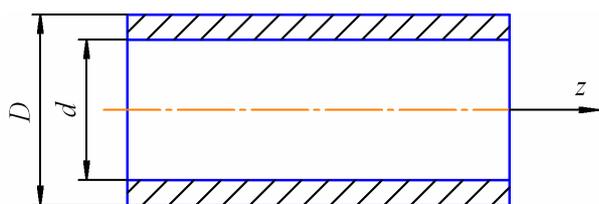


Рис. 1. Образец для определения остаточных напряжений

В исследовании [3] для различных вариантов распределения остаточных напряжений гладкой цилиндрической детали с отверстием в случае опережающего поверхностного пластического деформирования (ОПД) аналитическим методом и методом конечных элементов были вычислены дополнительные напряжения после нанесения кругового надреза полукруглого профиля. Было установлено, что при одних и тех же остаточных напряжениях гладкой детали дополнительные напряжения в наименьшем сечении практически не отличаются для детали одинаковой толщины, не зависят от диаметра и равны напряжениям сплошной детали с поперечным размером, равным удвоенной толщине стенки. На основании этой закономерности представляется возможным прогнозировать приращение предела выносливости детали большого диаметра в условиях концентрации напряжений по остаточным напряжениям образца-свидетеля. Однако это утверждение требует экспериментального подтверждения.

Для расчёта дополнительных напряжений следует иметь распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного

слоя гладкой детали, которое определяется экспериментально. В связи с этим возникает необходимость исследования остаточных напряжений в цилиндрических деталях различного диаметра.

В настоящем исследовании были изучены остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах с отверстием (рис. 1) из стали 45 ( $s_a = 757$  МПа,  $s_{0,2} = 411$  МПа,  $d = 17,4\%$ ,  $y = 39,6\%$ ,  $S_k = 1097$  МПа) и сплава Д16Т ( $s_a = 547$  МПа,  $s_{0,2} = 426$  МПа,  $d = 14,8\%$ ,  $y = 16,5\%$ ,  $S_k = 647$  МПа) после гидродробеструйной обработки на режимах: давление масла – 0,28 МПа (сталь 45); 0,19 МПа (Д16Т); диаметр шариков – 2 мм; время обработки – 8 мин.

Размеры образцов приведены в таблице, где  $D$  – наружный диаметр,  $d$  – диаметр отверстия.

Осевые  $s_z$  и окружные  $s_q$  остаточные напряжения в образцах диаметром 10 мм определялись методом снятия части поверхности [4], в образцах диаметром 15-50 мм - методом колец и полосок [5]. Эпюры остаточных напряжений приведены на рис. 2.

Из приведенных на рис. 2 данных видно, что остаточные напряжения в цилиндрических образцах различного диаметра, но одинаковой толщины стенки после гидродробеструйной обработки практически не различаются как для стали 45, так и для сплава Д16Т. Следует отметить также, что распределение напряжений для образцов с отверстием совпадает с распределением остаточ-

Таблица. Размеры исследуемых образцов

Материал	Тип	Размеры образцов	
		$D$ , мм	$d$ , мм
сталь 45	1	10	0
	2	15	5
	3	25	15
	4	50	40
Д16Т	1	10	0
	2	15	5
	3	25	15
	4	40	30

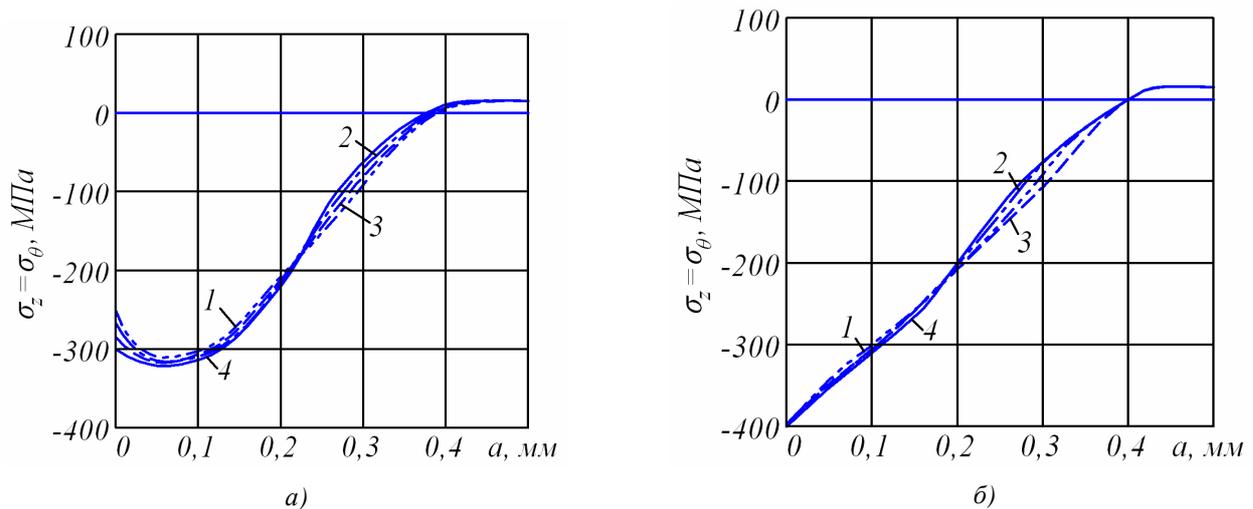


Рис. 2. Остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах из стали 45 (а) и сплава Д16Т(б) (номера эюр соответствуют номерам типов образцов таблицы)

ных напряжений для сплошных образцов диаметром 10 мм, т.е. для образцов, диаметр которых соответствует удвоенной толщине стенки образцов с отверстием. Выявленная закономерность обосновывает возможность использования результатов измерения остаточных напряжений на образцах-свидетелях для деталей других поперечных размеров.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что результаты измерения остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки можно переносить с образцов-свидетелей на цилиндрические детали с отверстием при условии, если диаметр образца-свидетеля равен удвоенной толщине стенки. Выявленная закономерность позволяет значительно сократить число экспериментов по измерению остаточных напряжений и прогнозировать приращение предела выносливости деталей с концентраторами после ОППД по зависимости (1), в которой критерий  $\bar{S}_{i \text{ нб}}$  вычисляется по формуле (2).

### Библиографический список

1. Павлов В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при из-

гибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. - № 8. – С. 29-32.

2. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

3. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б. и др. Закономерности распределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических деталях с отверстием различного диаметра // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием, часть 1. - Самара.- 2007. – С. 171-174.

4. Иванов С. И., Григорьева И. В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Труды КуАИ. Вып.48. - Куйбышев: КуАИ,1971. - С. 179-183.

5. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения: Труды КуАИ. Вып. 53. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – С. 32-42.

### References

1. Pavlov V. F. The relation between residual stress and endurance limit in case of bending in conditions of stress concentration // Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye. – 1986. – No. 8. – pp. 29-32.
2. Pavlov V. F., Kirpichyov V. A., Ivanov V. B. Residual stress and fatigue strength of strengthened part with stress concentrators / Samara: Publishing house of Samara Science Centre Russian Academy of Science, 2008. – 64 p.
3. Pavlov V. F., Kirpichyov V. A., Ivanov V. B. et al. Regularities of residual stress distribution in strengthened cylindrical parts with holes of various Diameter // Mathematical modeling and boundary problems. Transactions of the 4<sup>th</sup> All-Russian scientific conference with international participation, part 1. – Samara. – 2007. – pp. 171-174.
4. Ivanov S. I., Grigoryeva I. V. Determining residual stresses in a cylinder by removing part of the surface // Issues of aircraft structural element strength: KuAI transactions. Issue 48. – Kuibyshev: KuAI, 1971. – pp. 179-183.
5. Ivanov S. I. Determining residual stress in a cylinder by the method of rings and stripes. // Residual stresses: KuAI transactions. Issue 53. – Kuibyshev: KuAI, 1971. – pp. 32-42.

## FORECASTING THE ENDURANCE LIMIT OF SHOT-STRENGTHENED PARTS WITH A CONCENTRATOR BY RESIDUAL STRESSES OF A CONTROL SPECIMEN

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

Samara State Aerospace University

Additional stresses after making a semicircular cut are calculated for a smooth cylindrical part with a hole in it for the case of advance surface plastic strain. It is found that, residual stresses of a smooth part being the same, additional stresses in the least section are equal to those of a solid part whose cross-section is equal to the double wall thickness.

It is established that residual stresses in strengthened parts with concentrators can be determined by the residual stresses of control specimens processed simultaneously with the parts.

*Advance surface plastic strain, stress concentration degree, endurance limit forecasting.*

### Информация об авторах

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

**Вакулюк Владимир Степанович**, доцент кафедры сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет, e-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto: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](mailto: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](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of research: mechanics of residual stress.