

Таблица 1

$D/d$ , мм/мм	$R$ , мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы					
			обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{нов}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10/0	0,3	110	ПДО	155	-263	0,171	-126	0,357
			ОР, $P = 0,5$ кН	230	-732	0,164	-337	0,356
			ОР, $P = 1,0$ кН	267,5	-861	0,183	-454	0,347
	0,5	120	ПДО	137,5	-90	0,194	-48	0,365
			ОР, $P = 0,5$ кН	187,5	-311	0,217	-178	0,379
			ОР, $P = 1,0$ кН	250	-517	0,251	-333	0,390
25/0	0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	-87	0,345
			ОР, $P = 0,5$ кН	165	-787	0,073	-171	0,336
			ОР, $P = 1,0$ кН	175	-908	0,074	-202	0,334
	0,5	112,5	ПДО	130	-142	0,123	-52	0,337
			ОР, $P = 0,5$ кН	150	-349	0,107	-111	0,338
			ОР, $P = 1,0$ кН	172,5	-515	0,117	-169	0,355
50/40	0,5	60	ОР, $P = 0,5$ кН	87,5	-311	0,088	-82	0,335
			ОР, $P = 1,0$ кН	105	-517	0,087	-133	0,338

жениям — приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ . Коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,390, составляя в среднем 0,351, что практически совпадает с значением  $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ , установленным в [2] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, проведённое исследование показало, что для оценки предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений наиболее оправдано применение критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

*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.

УДК 621.787: 539.319

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПОЛЫХЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

© 2012 В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, О.Ю. Семёнова, Ю.С. Ларионова, А.В. Кузнецов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара

## REGULARITIES OF SURFACE TREATMENT INFLUENCE ON RESIDUAL STRESSES AND LIMIT OF ENDURANCE OF HOLLOW CYLINDRICAL DETAILS

© 2012 V.A. Kirpichev, A.S. Bukatyi, O.Yu. Semyonova, Yu.S. Larionova, A.V. Kuznetsov

On base of carried out experiments it is shown that during the same treatment in hollow various diameters specimens with the same wall thickness compressing residual stresses practically indifferent. That is notably important for forecasting of surface treatment of limit of endurance specimens and various diameters details.

Приращение предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла  $\Delta\sigma_{-1}$  упрочнённой детали с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [1] определяется по формуле:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (1)$$

где  $\bar{\psi}_{\sigma}$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости.

Гладкие сплошные образцы диаметром 10 мм, а также образцы с отверстием диаметром 25 мм/15 мм и диаметром 50 мм/40 мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), а также обкатке роликом (ОР) при усилии  $P = 0,5$  кН и  $P = 1,0$  кН. Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса  $R = 0,5$  мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  гладких образцов представлено на рис. 1. Необходимо отметить, что остаточные напряжения в гладких сплошных образцах диаметром 10 мм, а также в образцах с отверстием диаметром 25 мм/15 мм и 50 мм/40 мм практически не различались при одной и той же упрочняющей обработке, причём наблюдавшееся различие при пневмодробеструйной обработке.

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётными методами (рис. 2).

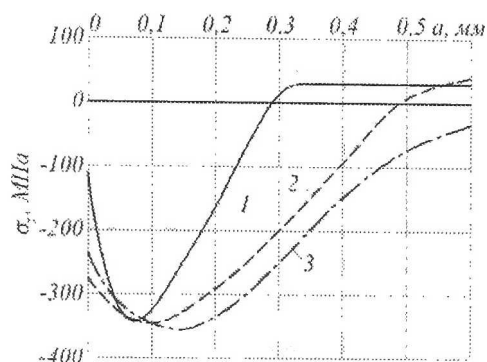


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в упрочнённых гладких образцах из стали 20 после: 1 – ПДО; 2 – ОР,  $P = 0,5$  кН; 3 – ОР,  $P = 1,0$  кН

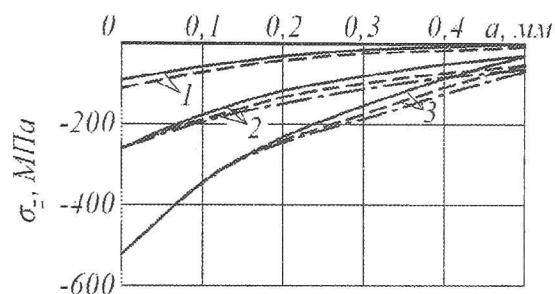


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в упрочнённых образцах с надрезом  $R = 0,5$  мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР,  $P = 0,5$  кН; 3 – ОР,  $P = 1,0$  кН ( — — диаметр 10 мм; - - - диаметр 25 мм/15 мм, - · - · диаметр 50 мм/40 мм)

Следует обратить внимание на то, что при упрочняющей обработке на одних и тех же режимах образцов диаметром 10 мм, 25 мм/15 мм, 50 мм/40 мм с надрезом  $R = 0,5$  мм остаточные напряжения несколько различаются, причём на поверхности надрезов в образцах после обкатки роликом напряжения одинаковы.

Наблюдаемое различие в распределении остаточных напряжений в образцах с надрезами объясняется тем, что с увеличением диаметра полого цилиндра при неизменной толщине стенки уменьшается величина растягивающих остаточных напряжений под упрочнённым поверхностным слоем. В результате при одинаковых дополнительных напряжениях суммарные остаточные напряжения с

увеличением диаметра полого образца будут увеличиваться, что и наблюдалось в настоящем исследовании.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром 10 мм проводились на машине МУИ-6000, диаметром 25 мм/15 мм – на машине УММ-01, диаметром 50 мм/40 мм – на машине УМП-02, база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в табл. 1.

$$t_{кр} = 0,0216D \left[ 1 - 0,04(d/D)^2 - 0,54(d/D)^3 \right]$$

упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжениях, равных пределу выносливости, были доведены до разрушения при большей нагрузке. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина  $t_{кр}$  которых в среднем при диаметре 10 мм составляла 0,197 мм, при диаметре 25 мм/15 мм – 0,442 мм, при диаметре 50 мм/40 мм – 0,715 мм, что

соответствует зависимости  $t_{кр}$  от размеров поперечного сечения детали, установленной экспериментально в работе [2]

где  $D$  – диаметр опасного сечения упрочнённой детали,  $d$  – диаметр отверстия.

Используя распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  в образцах с надрезом  $R = 0,5$  мм (рис. 2), вычислялись среднеинтегральные остаточные напряжения  $\bar{\sigma}_{ост}$  по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине  $t_{кр}$

нераспространяющейся трещины усталости. Значения  $\bar{\sigma}_{ост}$  представлены в табл. 1.

Затем по формуле (1) рассчитывался коэффициент влияния остаточных напряжений на предел

Таблица 1

Диаметр образцов, мм/мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы			
		обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10/0	120	ПДО	137,5	-48	0,365
		ОР, $P = 0,5$ кН	187,5	-178	0,379
		ОР, $P = 1,0$ кН	250	-333	0,390
25/15	110	ПДО	127,5	-47	0,372
		ОР, $P = 0,5$ кН	152,5	-128	0,332
		ОР, $P = 1,0$ кН	182,5	-218	0,333
50/40	60	ОР, $P = 0,5$ кН	87,5	-82	0,335
		ОР, $P = 1,0$ кН	105	-133	0,338

выносливости  $\bar{\psi}_\sigma$ , значения которого также приведены в табл. 1.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что значение коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  составляет в среднем 0,356, что практически совпадает с значением  $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$  для образцов и деталей из сталей других марок, алюминиевых сплавов и сплавов на основе никеля с такой же концентрацией напряжений [2].

Таким образом, для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых сплошных и полых деталей различного диаметра с концентраторами напряжений в виде надрезов следует воспользоваться зависимостью (1). При этом критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  вычисляется по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости

и определяемой в зависимости от размеров поперечного сечения формулой (2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия

вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

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

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБТЕКАНИЯ СЕКТОРА ВНА ГТД НК-12СТ ПРИ ИМИТАЦИИ ПРОМЫВКИ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА

© 2012 Клементьев В.А., Мальцев Е.Н., Щербо Д.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара

## THE VISUALIZATION OF AIRFLOW ABOUT IGV OF THE GAS-TURBIN ENGINE NK-12ST DURING SIMULATION OF ENGINE GAS FLOW FLUSHING

© 2012 V.A. Klementiev, E.N. Malzev, D.V. Shcherbo.

The visualization of aerosol flows in front of inlet guide vanes (IGV) of turbojet engine was made. An interaction between streams of spraying fluid and their winding into one vortex bundle were observed. The airflow about inlet guide vanes was also visualized. It was found out that vanes did not obstruct the vortex bundle spreading.

Визуализация аэрозольных потоков моющего раствора перед сектором входного направляющего аппарата (ВНА) ГТД НК-12СТ проводилась на малоразмерной стендовой установке имеющей канал трапецевидного сечения с оптическими окнами в боковых стенках. В канал подводился сжатый воздух непосредственно из ресивера компрессорной станции СГАУ. В две форсунки установленные в канале перед лопатками ВНА, под давлением подавался моющий раствор, который взаимодействуя с воздушным потоком образовывал двухфазную среду. Визуализация осуществлялась методом лазерного ножа. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер мощностью 300 милливатт длиной волны 532 нм (зелёного цвета). Изучалось распространение факелов моющего раствора и их взаимодействие с лопатками ВНА. Наблюдалось взаимодействие факелов распыляемой

жидкости и сворачивание их в один вихревой жгут (в случае расположения форсунок против воздушного потока).

Так же визуализировался поток прошедший через лопатки ВНА. Обнаружилось, что лопатки не являются преградой распространения вихревых жгутов. Эволюция поперечной формы струи по проточному тракту установки до и после ВНА фиксировалась на видео и фотокамеру см. Рис 1.

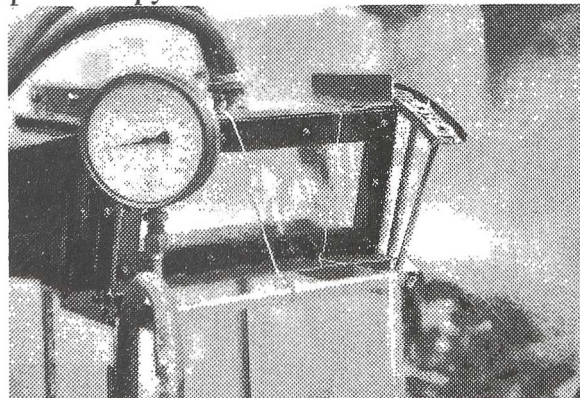


Рис. 1