

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк

**Остаточные напряжения и сопротивление усталости
упрочнённых образцов с концентраторами напряжений**

Электронное учебное пособие

Самара
2011

УДК 621.81:539.4

ББК 30.14

П 121

Авторы: **Павлов Валентин Фёдорович,**
Кирпичёв Виктор Алексеевич,
Вакулюк Владимир Степанович

Рецензенты:

В. Б. Балякин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой основ конструирования машин Самарского государственного аэрокосмического университета.

А. Н. Первышин, доктор технических наук, профессор кафедры механической обработки материалов Самарского государственного аэрокосмического университета.

Редакторская обработка В. Ф. Павлов

Компьютерная верстка П. А. Шляпников

Доверстка П. А. Шляпников

Павлов, В. Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых образцов с концентраторами напряжений [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (3.57 Мбайт). – Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное пособие посвящено вопросам влияния остаточных напряжений, возникающих в поверхностно упрочнённых образцах и деталях, на сопротивление усталости. Изучено влияние различных технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов на предел выносливости образцов и деталей с концентраторами напряжений, а также совместное и раздельное влияние остаточных напряжений и наклёпа в условиях концентрации напряжений.

Показано, что характеристики сопротивления усталости зависят как от величины, так и от характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. Обосновано использование критерия среднинегральных остаточных напряжений для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов и деталей.

Учебное пособие предназначено для аспирантов научной специальности 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры», а также для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, испытанием и эксплуатацией машин.

Разработано на кафедре сопротивления материалов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В работе рассмотрено влияние остаточных напряжений, возникающих в поверхностно упрочнённых различными методами образцах и деталях, на сопротивление усталости. Изучено влияние технологических (вид и режимы упрочняющей обработки, материал детали, короткие зоны упрочнения), конструктивных (размеры поперечного сечения детали, в том числе и диаметр отверстия, тип и размеры концентратора), эксплуатационных (тип деформации, асимметрия цикла напряжений, повышенная температура) факторов на предел выносливости образцов и деталей как гладких, так и с концентраторами напряжений. Исследовано также совместное и раздельное влияние остаточных напряжений и наклёпа в условиях концентрации напряжений.

Установлено, что на характеристики сопротивления усталости деталей оказывает существенное влияние не только величина, но и характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей. На основании проведённых исследований предложен критерий влияния остаточных напряжений на предел выносливости деталей в условиях концентрации напряжений и разработаны методики прогнозирования приращения предела выносливости и предельной амплитуды упрочнённых деталей с концентраторами напряжений как при симметричном, так и при асимметричном цикле напряжений.

1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Наибольшее применение на практике получили механические методы определения остаточных напряжений, как наиболее надёжные и доступные [2]. В настоящей работе использовались два метода, подробно изложенные в работах [2, 8, 9,

10, 11]: метод колец и полосок и метод удаления части поверхности образца (детали). Ниже излагается методика проведения эксперимента по определению остаточных напряжений этими методами и приводятся конечные зависимости для расчёта остаточных напряжений.

2. МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ

2.1. Методика определения остаточных напряжений в гладких образцах и деталях

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах и деталях определялись на образцах и деталях, используемых для испытаний на усталость. Если диаметр составлял 5–10 мм, то напряжения определялись методом удаления части поверхности [8]. При этом удалялись слои детали (образца) в пределах центрального угла α и измерялись его прогибы по схеме, изображённой на рисунке 2.1. Осевые $\sigma_z(a)$ и окружные $\sigma_\theta(a)$ остаточные напряжения вычислялись по формуле:

$$\sigma_z(a) - \mu\sigma_\theta(a) = E \frac{\pi R^2}{l^2 \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{df(a)}{da}, \quad (2.1)$$

где E – модуль продольной упругости материала детали, μ – коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), R – радиус поперечного сечения детали, l – длина детали, $f(a)$ – прогиб среднего сечения детали.

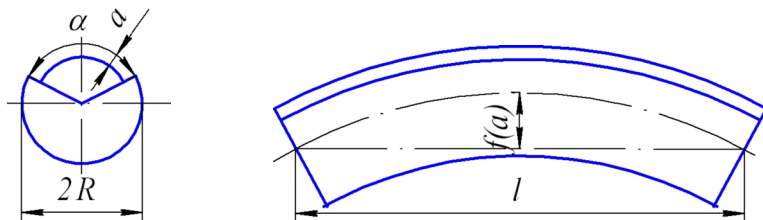


Рисунок 2.1 – Схема измерения прогибов детали после удаления части цилиндрической поверхности

Для увеличения разрешающей способности метода применялась консольная схема измерения перемещений (рисунок 2.2). Приведение измеренных прогибов $f(a)_{изм}$ к прогибам основного случая $f(a)$ осуществлялось по следующей формуле:

$$f(a) = \frac{f(a)_{изм}}{4 \left[1 + \frac{2(L-l)}{l} \right]}, \quad (2.2)$$

где L – расстояние от места крепления детали до сечения, в котором измеряются перемещения.

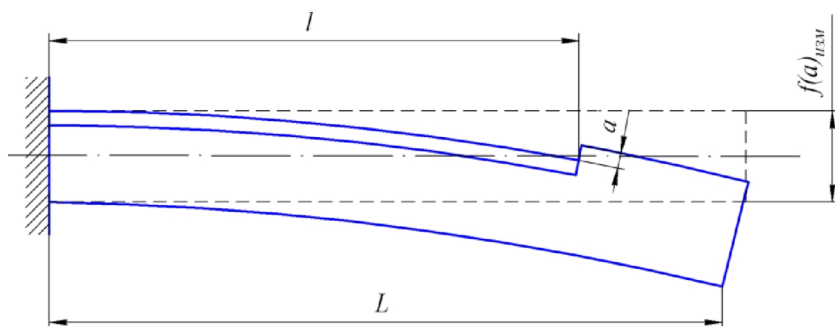


Рисунок 2.2 – Схема измерения перемещений $f(a)_{изм}$

Удаление слоёв деталей (образцов) из сталей и сплавов

производилось методом анодного растворения.

Метод удаления части цилиндрической поверхности позволяет определить лишь комбинацию остаточных напряжений $\sigma_z(a) - \mu\sigma_\theta(a)$. Каждое из напряжений этим методом можно определить только при $\sigma_z = \sigma_\theta$, что имеет место в ряде практических случаев, например, после обработки дробью, микрошариками, ультразвукового упрочнения, химико-термической обработки.

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических деталях и образцах диаметром $D_I = 10 - 50$ мм определялись методом колец и полосок [2, 9, 11], для чего детали предварительно рассверливались и растачивались до толщины стенки 1,1 - 1,2 мм ($D_I = 10$ мм), 1,4 - 1,6 мм ($D_I = 15$ мм), 2,3 - 2,5 мм ($D_I = 25$ мм), 2,5 - 2,7 мм ($D_I = 40$ мм), 2,8 - 3,0 мм ($D_I = 50$ мм), где D_I – наружный диаметр детали (образца). Дополнительные осевые $\sigma_{z\partial}$ и окружные $\sigma_{\theta\partial}$ остаточные напряжения за счёт расточки определялись по формулам работы [2]

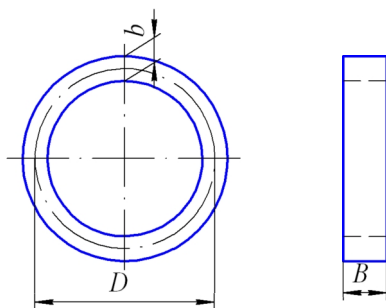
$$\sigma_{z\partial} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{z\partial} + \mu\varepsilon_{\theta\partial}), \quad (2.3)$$

$$\sigma_{\theta\partial} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{\theta\partial} + \mu\varepsilon_{z\partial}),$$

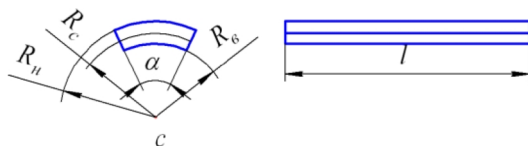
где $\varepsilon_{z\partial}$, $\varepsilon_{\theta\partial}$ – деформации цилиндра на внешней поверхности в осевом и окружном направлениях, соответственно, в результате расточки, измеренные тензорезисторами.

Из полученных втулок вырезались кольца и полоски (рисунок 2.3), производилось измерение прогиба полосок $f(0)$ (рисунок 2.4), затем измерялось расхождение концов колец после разрезки $\Delta(0)$ (рисунок 2.5, а), по которому определялось изменение диаметра

$$\delta(0) = \frac{\Delta(0)}{\pi}. \quad (2.4)$$



a)



б)

Рисунок 2.3 – Кольцо (а) и полоска (б), вырезанные из втулки

Далее производилось удаление слоёв колец и измерение диаметра $\delta(a)$ (рисунок 2.5, б). При удалении слоёв полосок измерялись их прогибы $f(a)$ по схеме рисунка 2.1, которые отсчитывались, как и $\delta(a)$, от состояния до вырезки из втулки. Удаление слоёв полосок, колец и измерение возникающих при этом перемещений производилось с помощью специального приспособления, описание которого приведено ниже.

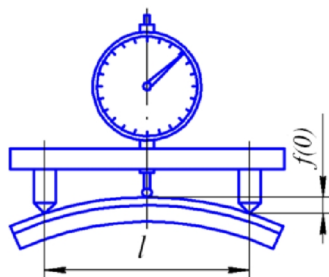


Рисунок 2.4 – Схема измерения прогиба полоски $f(0)$ после вырезки

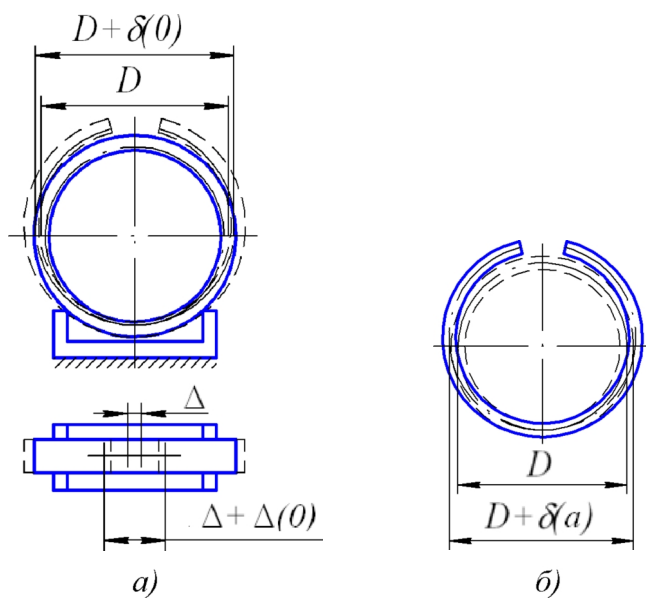


Рисунок 2.5 – Схема измерения перемещений кольца: a – после разрезки, b – после разрезки и удаления слоя толщиной a

Остаточные напряжения втулки определялись по формулам работы [9]

$$\sigma_{\theta}^{\varepsilon} - \mu \sigma_z^{\varepsilon} = 2 \frac{E \delta(0)}{D^2} \left(\frac{h}{2} - a \right) - \frac{1}{3} \frac{E(h-a)^2}{D} \frac{d\delta(a)}{da} + \\ + \frac{4E(h-a)}{3D^2} \delta(a) - \frac{2E}{3D^2} \int_0^a \delta(\xi) d\xi, \quad (2.5)$$

$$\sigma_z^{\varepsilon}(a) - \mu \sigma_{\theta}^{\varepsilon}(a) = \frac{8E}{l^2 R_h (2R_h \sin \frac{\alpha}{2} - R_c \cdot \alpha)} \times \\ \times \left[f(a) \frac{dJ(a)}{da} + J(a) \frac{df(a)}{da} \right], \quad (2.6)$$

где D – средний диаметр кольца, h – толщина стенки кольца, a – расстояние от наружной поверхности втулки до слоя, в котором вычислялись остаточные напряжения, ξ – расстояние от наружной поверхности до текущего слоя,

$$R_c = \frac{4 \sin \frac{\alpha}{2}}{3\alpha} \frac{(R_h - a)^3 - R_g^3}{(R_h - a)^2 - R_g^2} - \text{радиус центра тяжести попе-}$$

речного сечения полосы,

$$J(a) = \frac{\alpha + \sin \alpha}{8} [(R_h - a)^4 - R_g^4] - \frac{8 \sin \frac{\alpha}{2}}{9\alpha} \left[\frac{(R_h - a)^3 - R_g^3}{(R_h - a) - R_g} \right]^2$$

– момент инерции поперечного сечения полосы относительно нейтральной оси.

При малом угле α (рисунок 2.3, б) формула (2.6) принимает вид [9]:

$$\sigma_z^{\varepsilon}(a) - \mu \sigma_{\theta}^{\varepsilon}(a) = \frac{4E}{3l^2} \times \\ \times \left[h \cdot f(0) - 4(h-a) \cdot f(a) + (h-a)^2 \cdot \frac{df(a)}{da} + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right]. \quad (2.7)$$

По формуле (2.7) представляется возможным также вычислять напряжения в пластинах.

Окончательные формулы для определения осевых $\sigma_z(a)$ и окружных $\sigma_\theta(a)$ остаточных напряжений в гладких цилиндрических деталях имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_z(a) &= \frac{1}{1-\mu^2} [\sigma_{zn}^e(a) + \mu\sigma_{\theta n}^e(a)] - \sigma_{z\partial}, \\ \sigma_\theta(a) &= \frac{1}{1-\mu^2} [\sigma_{\theta n}^e(a) + \mu\sigma_{zn}^e(a)] - \sigma_{\theta\partial},\end{aligned}\tag{2.8}$$

где $\sigma_{zn}^e(a) = \sigma_z^e(a) - \mu\sigma_\theta^e(a)$, $\sigma_{\theta n}^e(a) = \sigma_\theta^e(a) - \mu\sigma_z^e(a)$ определяются по формулам (2.5) – (2.7), а $\sigma_{z\partial}$, $\sigma_{\theta\partial}$ – по формулам (2.3).

При определении остаточных напряжений в кольцах и полосках необходимо измерять перемещения, возникающие при удалении слоёв образца или детали. Для этого использовалась установка, блок-схема которой представлена на рисунке 2.6.

Ток от сети подаётся через стабилизатор напряжения (220 В, 50 Гц, 5 А) на выпрямитель (220 В / 6 В) и далее на тензостанцию ВСТ - 4, к которой подключаются тензорезисторы, наклеенные на измерительную балочку. Тензостанция работает в блоке с высокочувствительным гальванометром М195/1, по шкале которого производится отсчёт показаний в процессе удаления слоёв образца.

Удаление слоёв образца и измерение перемещений осуществлялось следующим образом (рисунок 2.7). Образец 1 с защищёнными лаком поверхностями, не подлежащими травлению, закрепляется на ползуне 4 с помощью прижимной планки 2 и винтов 3. На образце для повышения точности измерения крепится удлинитель 5.

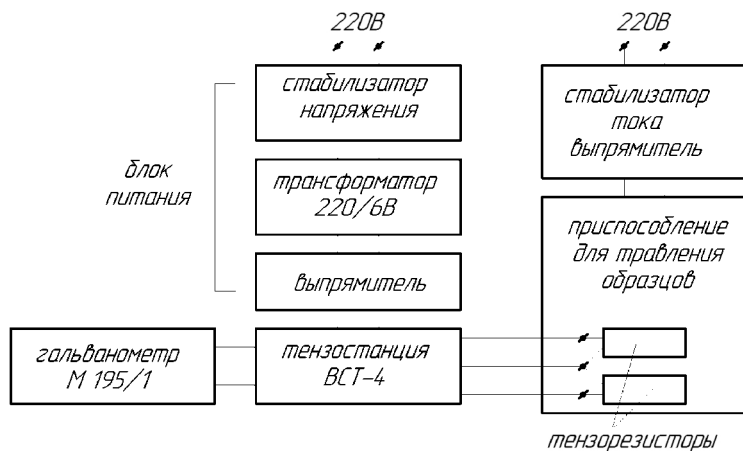


Рисунок 2.6 – Блок-схема установки для удаления слоёв материала и измерения перемещений в образцах

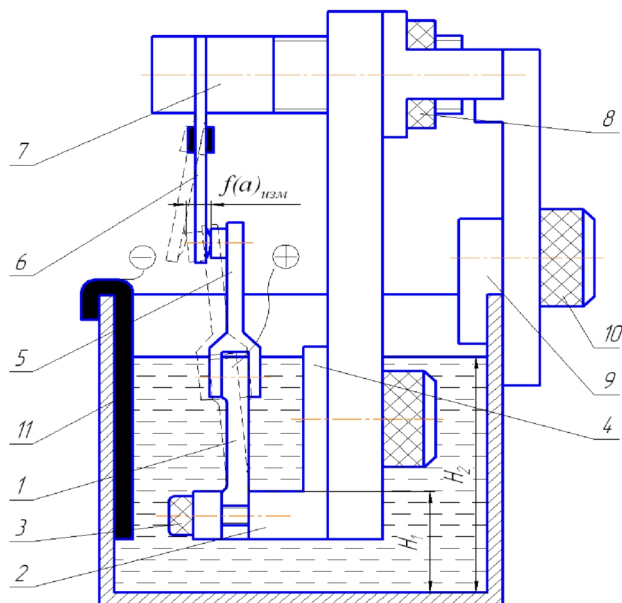


Рисунок 2.7 – Приспособление для удаления слоёв материала и измерения перемещений

Измерительная балочка 6, закреплённая на стойке 7 с помощью гайки 8, подводится к удлинителю 5 с предварительным натягом 0,3 - 0,4 мм. Затем установка подключается к электросети и прогревается в течение одного часа. Далее приспособление опускается в ванну с электролитом так, чтобы уровень электролита был несколько выше зоны травления образца. Нижняя часть удлинителя 5, которая окажется при этом погружённой в электролит, также предварительно покрывается лаком. Крепление приспособления к ванне с электролитом производится с помощью упора 9 и винта 10. При исследовании колец в приспособлении, показанном на рисунке 2.7, использовался соответствующий их форме ползун 4 и катод-экран 11.

За счёт удаления слоёв образца с остаточными напряжениями образец изгибается и свободный конец удлинителя перемещается. Это перемещение вызывает деформацию измерительной балочки с наклеенными на неё тензорезисторами. Изменение сопротивления регистрировалось по шкале гальванометра М195/1 с интервалом в три минуты.

Измерение толщины удалённого слоя образцов и деталей проводилось на инструментальном микроскопе УИМ-23, а также с помощью приспособления, изображённого на рисунке 2.8, с точностью ± 5 мкм. В последнем случае (рисунок 2.8) в качестве измерительного прибора применялся микронный индикатор типа 1МИГ. Толщина удалённого слоя определялась по разности показаний приборов до и после травления в 10 - 15 точках, а для расчётов использовалось среднее значение.

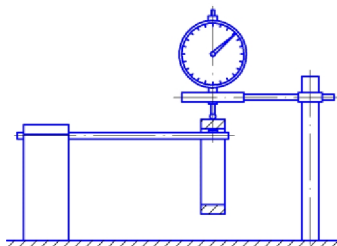


Рисунок 2.8 – Схема измерения толщины удалённого слоя

Остаточные напряжения для достоверности определялись в каждом случае как среднее на 10 - 30 образцах. Эпюры напряжений имели хорошее совпадение. Суммарное измеряемое перемещение $f(a)_{изм}$ составляло для различных деталей (образцов) и обработок от 0,15 до 2,50 мм при цене деления прибора 1,3 - 1,9 мкм/дел. Всё это гарантировало проведённые исследования от заметных ошибок.

Для сравнения результатов определения остаточных напряжений различными методами на рисунке 2.9 приведены эпюры напряжений в образцах для испытаний на усталость и втулках из отожжённой стали 45, подвергнутых после точения гидродробеструйной обработке в течение 8 минут дробью диаметром 2 мм при давлении масла 0,2 МПа.

Размеры образцов:

– образец для испытаний на усталость:

$R = 5 \text{ мм}, l = 50 \text{ мм}, L = 85 \text{ мм}, \alpha = 180^\circ$;

– кольцо:

$D = 48,25 \text{ мм}, h = 3,25 \text{ мм}, b = 10 \text{ мм}$;

– полоска:

$l = 50 \text{ мм}, L = 60 \text{ мм}, R_n = 25,75 \text{ мм}, R_g = 22,5 \text{ мм}, \alpha = 25^\circ$.

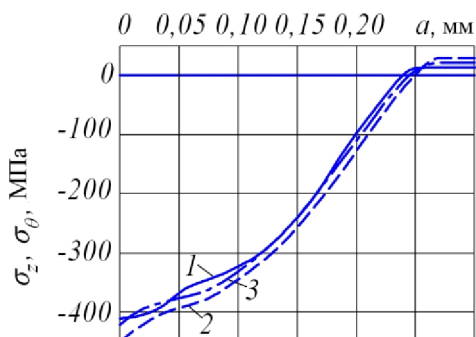


Рисунок 2.9 – Результаты определения остаточных напряжений двумя методами: 1 – методом удаления части цилиндрической поверхности; 2,3 – методом колец (3) и полосок (2)

Напряжениям, найденным методом удаления части цилиндрической поверхности в предположении $\sigma_z = \sigma_\theta$, соответствует кривая 1. Кривая 2 даёт σ_z , кривая 3 – σ_θ , найденные методом колец и полосок. Можно видеть, что предположение $\sigma_z = \sigma_\theta$ достаточно хорошо подтверждается, а напряжения, определённые двумя различными методами, практически совпадают. Теоретическое обоснование этого совпадения дано в работе [10]. Результаты измерения остаточных напряжений подвергались статистической обработке.

2.2 Методика определения остаточных напряжений в образцах и деталях с концентраторами напряжений

В случае опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) при определении дополнительных остаточных напряжений в наименьшем сечении деталей (образцов) после нанесения надрезов полукруглого и полуэллиптического профилей на упрочнённую поверхность использовалась зависимость (2.9), а при определении напряжений на поверхности надреза – формула (2.10) [16]

$$\sigma_{z\delta}(\xi) = \frac{1+c}{1-c\xi^{-2}} \cdot \left[\lambda(\xi) + \sum_{k=0,2,\dots}^{2m} A_k \mu_k(\xi) \right], \quad (2.9)$$

$$\sigma_{z\delta}(1) = \sqrt{\frac{t}{\rho_0}} \int_0^1 \left[\frac{4}{\pi \sqrt{1-\xi^2}} + 0,37 \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{(1 + \sqrt{\frac{\rho_0}{t}})^2} \right] \sigma_z(\xi) d\xi, \quad (2.10)$$

$$\sigma_{\theta\delta}(1) = \mu \sigma_{z\delta}(1),$$

где $c = \frac{a-b}{a+b}$; $a = t$, b – полуоси эллипса; $\rho_0 = \frac{b^2}{a}$ – радиус кривизны у дна надреза;

$\xi = \frac{y}{t}$ – безразмерное расстояние от поверхности гладкой детали до текущего слоя;

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения гладкой детали.

Для полукруглого и прямоугольного надрезов применялась методика, основанная на использовании метода конечных элементов (МКЭ). Аналитическому решению отдавалось предпочтение при исследовании деталей бóльшего размера ($D_I \geq 25$ мм), МКЭ – меньшего ($D_I < 25$ мм). Исходными данными для расчёта дополнительных напряжений являлись остаточные напряжения гладкой детали (образца), которые определялись изложенными выше методами. Суммируя дополнительные остаточные напряжения с напряжениями гладкой детали, получали остаточные напряжения детали с надрезом, которые использовались в дальнейшем для оценки влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости.

В случае упрочняющей обработки деталей (образцов) с концентраторами, то есть в том случае, когда обработке подвергается непосредственно концентратор, остаточные напряжения определялись экспериментально методом удаления слоёв материала с поверхности концентратора в пределах его криволинейной части.

Одним из наиболее характерных концентраторов является надрез V-образного профиля, предусмотренный ГОСТ 25.502-79 для определения чувствительности материалов к концентрации напряжений.

Вначале рассмотрим метод определения меридиональных σ_φ остаточных напряжений в цилиндрических деталях (образцах) с V-образными надрезами (рисунок 2.10), основанный на решении задачи теории упругости о связи остаточных напряжений и перемещений $f(a)$ (рисунок 2.11), возникающих в результате удаления слоёв материала в пределах половины поверхно-

сти криволинейной части впадины. С целью повышения точности образцы для определения остаточных напряжений изготавливались с несколькими идентичными надрезами, как показано на рисунках 2.10 и 2.11.

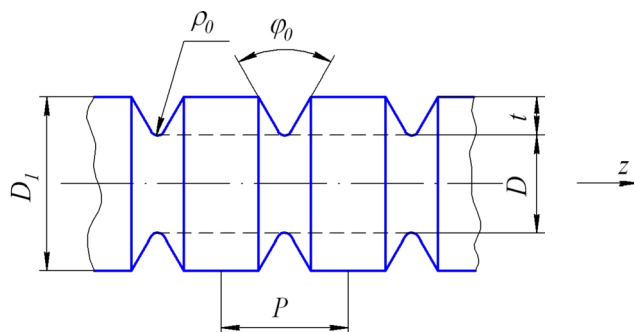


Рисунок 2.10 – Цилиндрическая деталь с V-образными надрезами

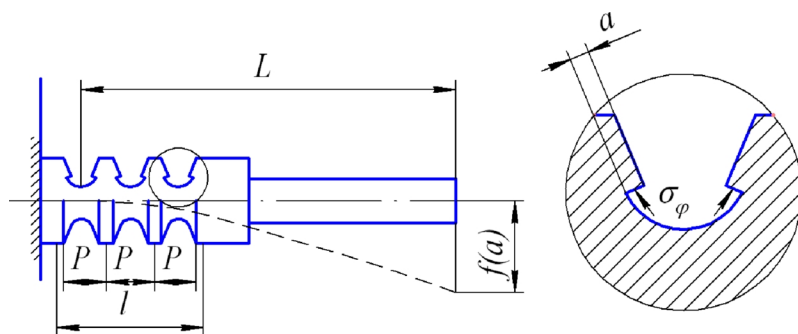


Рисунок 2.11 – Схема замера перемещений $f(a)$, возникающих в результате удаления слоя толщиной a

Окончательная зависимость для меридиональных σ_φ остаточных напряжений, которые в наименьшем сечении детали (образца) равны осевым σ_z остаточным напряжениям, имеет

вид:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu) \left(L - \frac{l}{2} \right) n} \cdot \frac{d}{da} \left[\frac{f(a)}{xp(a)} \right], \quad (2.11)$$

где n – число исследуемых надрезов, L – длина детали (образца) с удлинителем, отсчитываемая от середины первого надреза (рисунок 2.11), $l = n \cdot P$, P – расстояние между надрезами, $xp(a)$ – коэффициент жёсткости.

Для вариантов размеров образцов (таблица 2.1), использованных в настоящем исследовании, результаты расчёта коэффициента $xp(a)$ по толщине поверхностного слоя a представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.1. Геометрические параметры образцов

Вариант	D_l , мм	D , мм	t , мм	ρ_0 , мм	φ_0 , град
1	15	7,5	3,75	0,5	60
2	10	5	2,5	0,5	60
3	10	5	2,5	0,5	120
4	10	5	2,5	2,5	60
5	10	5	2,5	2,5	120

Таблица 2.2. Значения коэффициентов $xp(a)$, мм⁻¹

Вариант	a , мм					
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3
1	0,512	-	0,840	-	0,933	1,083
2	1,121	1,314	1,496	1,674	1,844	-
3	0,647	0,868	1,079	1,275	1,462	-
4	2,930	3,122	3,321	3,530	3,747	-
5	2,075	2,304	2,539	2,784	3,028	-

Далее излагается метод определения меридиональных σ_{φ} остаточных напряжений в плоских деталях (образцах) с перио-

дическими V-образными надрезами (рисунок 2.12), основанный также на решении соответствующей задачи теории упругости о связи остаточных напряжений и перемещений $f(a)$, возникающих в результате удаления слоёв материала в области криволинейной части впадины. Схема замера перемещений $f(a)$ аналогична схеме, представленной на рисунке 2.11 для цилиндрической детали.

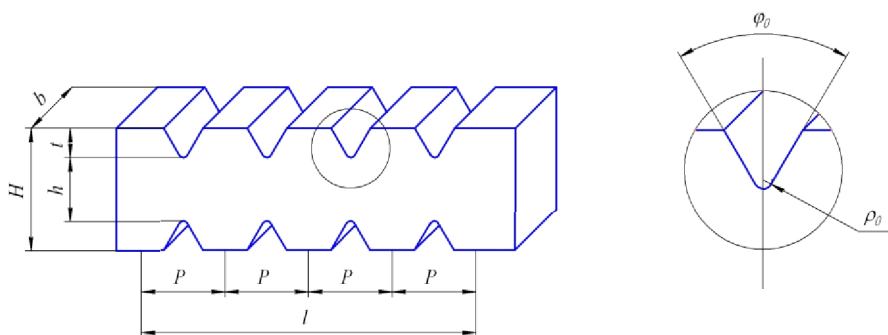


Рисунок 2.12 – Плоская деталь с V-образными надрезами

Окончательная формула для меридиональных σ_φ остаточных напряжений имеет вид:

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu) \left(L - \frac{l}{2} \right) n} \cdot \frac{d}{da} \left[\frac{f(a)}{xq(a)} \right], \quad (2.12)$$

где $xq(a)$ – коэффициент жёсткости.

Для плоских образцов двух типоразмеров (таблица 2.3), имитирующих ёлочный замок лопатки газотурбинного двигателя, значения коэффициентов жёсткости $xq(a)$ в зависимости от наименьшего размера поперечного сечения образца h при различных толщинах a удалённого поверхностного слоя впадин надрезов представлены на рисунках 2.13 и 2.14.

Таблица 2.3. Геометрические параметры плоских образцов, имитирующих ёлочный замок лопатки ГТД

	H , мм	h , мм	b , мм	t , мм	ρ_0 , мм	φ_0 , град
1	4,74 – 5,74	2,0 – 3,0	10	1,37	0,5	55,5
2	6,10 – 7,10	2,0 – 3,0	10	2,05	1,0	55,5

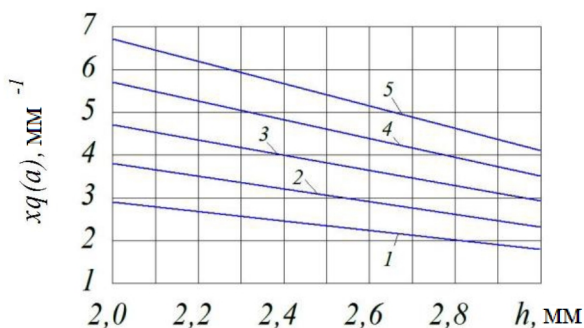


Рисунок 2.13 – Зависимость $xq(a)$ для плоских образцов с $\rho_0 = 0,5$ мм (таблица 2.3) при: 1 – $a = 0$; 2 – $a = 0,1$ мм; 3 – $a = 0,2$ мм; 4 – $a = 0,3$ мм; 5 – $a = 0,4$ мм

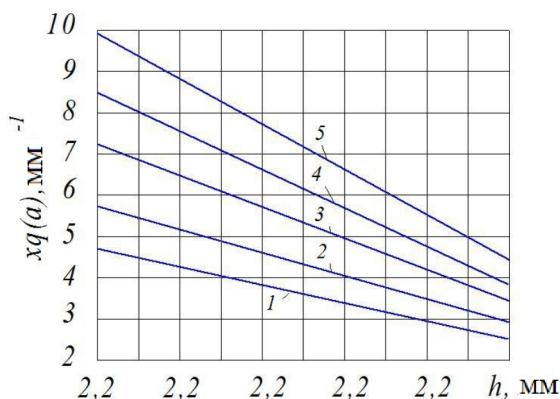


Рисунок 2.14 – Зависимость $xq(a)$ для плоских образцов с $\rho_0 = 1,0$ мм (таблица 2.3) при: 1 – $a = 0$; 2 – $a = 0,1$ мм; 3 – $a = 0,2$ мм; 4 – $a = 0,3$ мм; 5 – $a = 0,4$ мм

Для образцов прямоугольного поперечного сечения с глубокими V-образными надрезами (таблица 2.4), предусмотренных ГОСТ 25.502-79 для исследования чувствительности материалов к концентрации напряжений, значения коэффициентов жёсткости $xq(a)$ по толщине поверхностного слоя a впадин надрезов представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.4. Геометрические параметры плоских образцов

Вариант	H , мм	h , мм	t , мм	ρ_0 , мм	φ_0 , град
1	10,0	5,0	2,5	0,5	65
2	10,0	5,0	2,5	0,25	50
3	15,0	7,5	3,75	0,5	60
4	15,0	7,5	3,75	0,25	55
5	20,0	10,0	5,0	0,5	50
6	20,0	10,0	5,0	0,25	40

Таблица 2.5. Значения коэффициентов $xq(a)$, мм⁻¹ для плоских образцов по ГОСТ 25.502-79

Варианты	a , мм				
	0	0,1	0,2	0,3	0,4
1	0,681	0,861	1,022	1,168	1,316
2	0,486	0,697	0,885	1,053	1,206
3	0,375	0,475	0,559	0,632	0,694
4	0,252	0,359	0,449	0,525	0,590
5	0,243	0,300	0,343	0,381	0,414
6	0,165	0,224	0,272	0,311	0,345

Для определения меридиональных σ_φ остаточных напряжений в корсетных образцах круглого поперечного сечения (рисунок 2.15), используемых для испытаний на усталость при изгибе, удалялись слои материала в пределах половины поверхности корсетной части и измерялись возникающие при этом перемещения $f(a)$ по схеме рисунка 2.2.

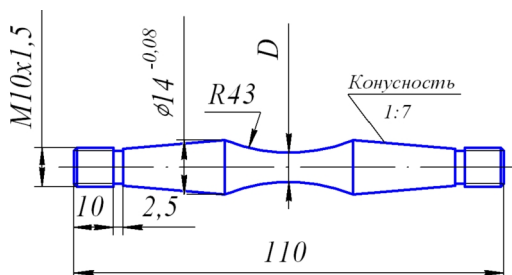


Рисунок 2.15 – Корсетный образец для испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Конечная зависимость для вычисления меридиональных σ_φ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a имеет следующий вид:

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu) \cdot \left(L - \frac{l}{2}\right)} \cdot \frac{d}{da} \left[\frac{f(a)}{xp(a)} \right], \quad (2.13)$$

где L – расстояние от начала зоны травления образца до сечения, в котором измеряются перемещения; l – длина корсетной части образца; $xp(a)$ – коэффициент жёсткости.

Значения коэффициента жёсткости $xp(a)$, вычисленного по результатам решения задачи теории упругости, приведены в таблице 2.6. Из данных таблицы 2.6 видно, что изменение наименьшего диаметра D корсетного образца оказывает существенное влияние на значение коэффициента $xp(a)$, поэтому при проведении экспериментов диаметр образца следует измерять с достаточной точностью.

Таблица 2.6. Значения коэффициентов $xp(a)$, мм^{-1} для корсетных образцов

D , мм	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5
ρ_0 , мм	43,5	43,4	43,3	43,2	43,1	43,0
$xp(a)$	4,500	4,279	4,059	3,842	3,620	3,385

2.3. Методика проведения и оборудование для испытаний на усталость

Испытания деталей и образцов на усталость при изгибе, кручении и растяжении-сжатии проводились в соответствии с ГОСТ 25.502-79. В случае изгиба и кручения реализовывался симметричный цикл нагружения, растяжения-сжатия – как симметричный, так и асимметричный. База испытаний при нормальной температуре принималась равной $3 \cdot 10^6$ для сталей и сплавов на основе никеля и $10 \cdot 10^6$ циклов нагружения для алюминиевых сплавов. При повышенных температурах база испытаний увеличивалась до $20 \cdot 10^6$ циклов. Каждая партия состояла из 15 - 20 образцов. Определение предела выносливости проводилось как по методике, предусмотренной ГОСТ 25.502-79, так и по методу ступенчатого изменения нагрузки (метод «вверх-вниз») [4, 63]. В последнем случае статистические оценки среднего значения и среднего квадратичного отклонения вычислялись по формулам [63]:

$$\bar{P}_R = P_0 + d \left(\frac{\sum_{i=0}^k in_i}{N} \pm 0,5 \right), \quad (2.14)$$

$$S_{P_R} = 1,62d \left[\frac{N \sum_{i=0}^k i^2 n_i - \left(\sum_{i=0}^k in_i \right)^2}{N^2} - 0,029 \right], \quad (2.15)$$

где $P_0(\sigma_0, \tau_0)$ – минимальный уровень напряжений, d – величина приращения напряжения при переходе от одного уровня к другому, i – порядковый номер уровня напряжений, N – полное число менее частых исходов, n_i – число менее частых исходов на i -ом уровне нагрузки. Знак «+» в формуле (2.14) ставится в том случае, когда общее число разрушений больше числа неразру-

шений, знак «-», когда меньше.

Испытания образцов диаметром до 15 мм при чистом изгибе с вращением образца проводились при нормальной температуре на машинах МУИ-6000 и при повышенных температурах – на машинах МВП-10000. Образцы диаметром 25 мм, а также образцы прямоугольного поперечного сечения испытывались при поперечном изгибе в одной плоскости на универсальной испытательной машине малой мощности УММ-01, диаметром 40 – 50 мм – на машине повышенной мощности УМП-02. Устройство и описание машин приведено в работе [68]. На машине УММ-01 проводились испытания на усталость при кручении и растяжении-сжатии, используя соответствующие наладки. Испытания плоских образцов толщиной 3 мм проводились на вибростенде, корсетных образцов диаметром 7,5 мм в наименьшем сечении – на машинах МВП-10000.

В связи с тем, что в исследовании проводились сравнительные испытания на усталость, каждая серия образцов испытывалась на одной и той же машине. При этом достоверность экспериментальных данных, в основном, определялась точностью силоизмерения и тщательностью тарировки. Проводилась как статическая, так и динамическая тарировка на машинах УММ-01 и УМП-02 с каждым типом образцов. Динамическая тарировка проводилась с помощью тензорезисторов, наклеенных на рабочую часть образцов, во всём диапазоне рабочих нагрузок. Статическая тарировка, то есть тарировка упругого силоизмерительного элемента-динамометра, проводилась согласно инструкции по эксплуатации машин. Оба вида тарировки осуществлялись систематически и в полном объёме, что позволяло также и диагностировать техническое состояние испытательных комплексов.

При деформации упругого элемента, включённого последовательно с образцом, на основании результатов тарировки определялась нагрузка, воспринимаемая образцом. Для повышения точности измерения деформаций применялись усовершенствованная оптическая система, стробоскопическое освещение регистрирующей части измерительной системы и оптиче-

ский микрометр МОВ-I-15[⊗] в составе измерительного микроскопа.

Для исключения влияния окончательной механической обработки (точение, шлифование) на предел выносливости неупрочнённых образцов [70, 71] наклёпанный слой толщиной 0,10 - 0,15 мм удалялся электрополированием до нанесения надреза. Исследования показали, что после удаления слоя такой толщины остаточные напряжения практически полностью снимаются. После образования надреза фасонным резцом также применялось электрополирование с целью удаления по контуру надреза слоя толщиной 40 - 50 мкм, наклёпанного точением.

В связи с использованием электрополирования необходимо было установить его влияние на предел выносливости. С этой целью проводились испытания на усталость гладких неупрочнённых образцов из стали 45 при изгибе и упрочнённых дробью образцов из стали 40 при кручении [15]. Результаты испытаний приведены в таблице 2.7. Чтобы не изменять напряжённое состояние поверхностного слоя, испытывались неупрочнённые и упрочнённые образцы, электрополированные на глубину 4 - 5 мкм. Можно видеть, что пределы выносливости как при изгибе, так и при кручении совпали. Это указывает на отсутствие коррозионного повреждения, что находится в соответствии с данными, приведёнными в работах [22, 25].

При изготовлении деталей и образцов использовались прутки одной плавки для каждого материала. Повышенные требования к точности определения предела выносливости предопределили применение селекции по механическим свойствам заготовок образцов для испытаний на усталость. Для каждого прутка механические свойства на растяжение определялись на 3 - 5 образцах с размерами, соответствующими типу VII ГОСТ 1497-84, максимальное отклонение от номинальной величины прочностных характеристик для отобранных прутков не превышало $\pm 2\%$.

Таблица 2.7. Результаты испытаний на усталость образцов при изгибе и кручении

Материал	Серии образцов	σ_{-1} , МПа	τ_{-1} , МПа
сталь 45	гладкие, после точения и механического полирования	215	–
	гладкие, после точения и электрополирования на глубину 4 - 5 мкм	215	–
сталь 40	гладкие, после упрочения дробью	–	187
	гладкие, после упрочения дробью и электрополирования на глубину 4 - 5 мкм	–	187

3. ТЕОРИЯ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Одним из важных вопросов механики остаточных напряжений является установление связи между остаточными напряжениями и сопротивлением деталей усталости. Особую значимость эта задача приобрела в связи с широким применением на практике различных методов поверхностного упрочнения, приводящих к существенному увеличению характеристик сопротивления усталости, особенно в условиях концентрации напряжений. Наиболее актуально выявление зависимости сопротивления усталости от остаточных напряжений для деталей с концентраторами, так как разрушение этих деталей происходит, как правило, в местах нарушения призматической формы.

В исследовании рассматривалось два критерия учёта влияния остаточных напряжений на предел выносливости. Первым критерием, использованным в работах [12, 15, 20, 32, 34, 58, 60, 66], являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость в этом случае имеет следующий вид:

$$p_R = p_R^0 - \psi_p (\sigma_{ост}^{экв})^{ноб}, \quad (3.1)$$

где $p_R(\sigma_R, \tau_R)$ – предел выносливости упрочнённой детали, $p_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочнённой детали, $\psi_p(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по остаточным напряжениям на поверхности, $(\sigma_{ост}^{экв})^{ноб}$ – эквивалентные остаточные напряжения на поверхности детали.

Чаще всего в расчётах используется теория наибольших касательных напряжений. Учитывая, что после поверхностного упрочнения на поверхности детали $\sigma_1 = \sigma_r^{ноб} = 0$, а

$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_z^{нов} = \sigma_\theta^{нов}$ (обработка дробью, ультразвуковое упрочнение, химико-термическая обработка (ХТО)) или $\sigma_2 = \sigma_\theta^{нов}$, $\sigma_3 = \sigma_z^{нов}$ (обкатка роликом, шариком, алмазное выглаживание), то в этом случае $\sigma_{ост}^{экв} = \sigma_z$. Тогда формула (3.1) с учётом этих зависимостей будет иметь вид

$$p_R = p_R^0 - \psi_p \sigma_z^{нов}, \quad (3.2)$$

Обычно (3.2) записывают для приращения $\Delta p_R (\Delta \sigma_R, \Delta \tau_R)$ предела выносливости

$$\Delta p_R = \psi_p |\sigma_z^{нов}|, \quad (3.3)$$

Первый критерий $\sigma_z^{нов}$, учитывающий остаточные напряжения на поверхности упрочнённой детали, может быть применён для расчёта предела выносливости по трещинообразованию. Однако, как следует из литературного обзора и наших исследований, при рассмотрении предела выносливости по разрушению формула (3.3) оказывается несостоятельной, что можно было предвидеть в связи с наличием нераспространяющихся трещин усталости. Заметим, что практическое значение, в основном, имеет предел выносливости по разрушению.

На практике, при обработке деталей механическими способами, в том числе поверхностным пластическим деформированием (ППД), наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности напряжения уменьшаются. Этот спад часто является весьма существенным, иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [73]. Однако увеличение предела выносливости по разрушению наблюдается и при таком распределении остаточных напряжений. Какие же остаточные напряжения принимать в расчёт при вычислении приращения предела выносливости в таких случаях? Логично учитывать не только остаточные напряжения на поверхности

концентратора, но и напряжения в приповерхностных слоях. О влиянии характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя на предел выносливости указывается в работах [56, 62, 64, 72, 75]. Так, например, авторы исследования [65] определяли остаточные напряжения и сопротивление усталости азотированных и упрочнённых роликом стальных цилиндрических образцов. При нагреве и выдержке этих образцов при температурах 150 и 200°C наблюдалось уменьшение сжимающих остаточных напряжений на поверхности и увеличение на некотором расстоянии от неё при одновременном повышении предела выносливости.

Все вышеизложенное говорит о том, что критерий оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости деталей с концентраторами должен базироваться на учёте остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. Прежде всего необходимо установить толщину слоя с сжимающими остаточными напряжениями, ответственную за приращение предела выносливости.

При достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочнённой детали с концентратором всегда возникают нераспространяющиеся усталостные трещины [1, 3, 5, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 39, 43, 51, 52, 57, 58, 59, 60, 61, 66]. На рисунке 3.1 в качестве примера приведена фотография излома упрочнённого дробью образца из сплава В93 диаметром 10 мм с надрезом полукруглого профиля радиуса $\rho_0 = 0,3$ мм, прошедшего базу испытаний $10 \cdot 10^6$ циклов нагружения и разрушенного затем при статическом растяжении. На фотографии чётко видна нераспространяющаяся трещина усталости 2 глубиной 0,20 мм.

На рисунке 3.2, а, для этих же образцов из сплава В93 по результатам работы [37] с использованием зависимости (2.10) построен график изменения дополнительных осевых остаточных напряжений $\sigma_{z0}^{нов}$ на дне трещины, возникающих в результате перераспределения остаточных усилий упрочнённых дробью образцов. При этом радиус трещины ρ считался постоянным,

глубина трещины $t \gg \rho$, а $\sqrt{\frac{1}{\rho}} = B$.

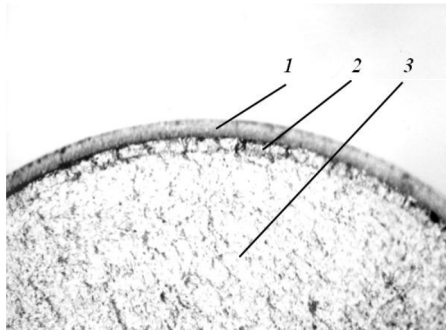


Рисунок 3.1 – Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром 10 мм с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм из сплава В93: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона статического долома

Видно, что по мере развития трещины сжимающие остаточные напряжения на её дне растут и, достигнув наибольшей величины, останавливают трещину. В связи с этой особенностью сопротивления усталости за искомый критерий логично взять остаточные напряжения на дне трещины, в качестве которых следует рассматривать дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий детали в результате образования трещины [40, 42, 44]. Исходные остаточные напряжения детали на дне трещины можно не учитывать в силу их малости.

Для определения второго критерия в работах [40, 42, 44] была использована формула (2.9) – формула определения дополнительных остаточных напряжений после нанесения надреза полуэллиптического профиля на упрочнённую деталь. Если в

(2.9) пренебречь уточняющими членами $\sum_{k=0,2,\dots}^{2m} A_k \mu_k(\xi)$, которые,

как показали расчёты, составляют при $\xi \approx 1$ не более 5 – 10% от основной части $\lambda(\xi)$, то формула для определения дополни-

тельных остаточных напряжений на дне надреза будет иметь вид

$$\sigma_{z0}(1) = \frac{2(1+c)}{1-c} \bar{\sigma}_{ост}, \quad (3.4)$$

где

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_z(\nu) d\nu - \quad (3.5)$$

– среднеинтегральные осевые остаточные напряжения по толщине слоя, равной глубине концентратора.

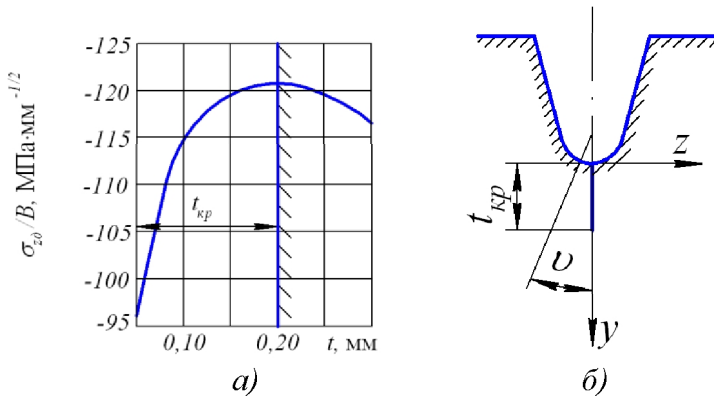


Рисунок 3.2 – Дополнительные остаточные напряжения на дне трещины в зависимости от её глубины, упрочнённых дробью образцов из сплава В93 диаметром 10 мм с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (а) и нераспространяющаяся трещина усталости в детали с концентратором напряжений (б)

В формуле (3.4) исходные остаточные напряжения участвуют только в $\bar{\sigma}_{ост}$, что даёт основание взять эти напряжения в качестве критерия, который имеет чётко выраженный физический смысл – остаточные напряжения на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у

дна трещины и её глубины. Предел выносливости упрочнённой детали при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ определяется по формуле:

$$p_R = p_R^0 - \bar{\psi}_p \bar{\sigma}_{ocm}, \quad (3.6)$$

где $\bar{\psi}_p$ ($\bar{\psi}_\sigma$, $\bar{\psi}_\tau$) – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$. Напряжение $\bar{\sigma}_{ocm}$ можно вычислять по формуле (3.5) или, произведя в (3.5) замену переменной, по более удобной для расчётов зависимости

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (3.7)$$

где $\sigma_z(\xi), (\sigma_z(\nu))$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором; $\xi = \frac{y}{t_{kp}}$ – расстояние от

дна надреза (рисунок 3.2) до текущего слоя, выраженное в долях t_{kp} . Через t_{kp} обозначена максимально возможная глубина не распространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Формула для вычисления приращения предела выносливости упрочнённой детали с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ будет иметь вид

$$\Delta p_R = \bar{\psi}_p | \bar{\sigma}_{ocm} |, \quad (3.8)$$

Возможность использования изложенной теории влияния остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации напряжений подтверждается приведёнными в исследовании результатами экспериментов.

4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ

Рассматривалось влияние остаточных напряжений, вызванных различными способами поверхностного упрочнения, совместное и раздельное влияние остаточных напряжений и наклёпа, а также коротких зон упрочнения на предел выносливости деталей и образцов с концентраторами напряжений.

С целью определения критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости все образцы, выстоявшие базу испытаний, были доведены до разрушения при статическом растяжении или при переменных напряжениях, существенно бóльших предела выносливости. Для контрастности трещин часть образцов обрабатывалась красителями на основе родалина или судана [33]. При обнаружении трещин без разрушения образцов применялся магнитопорошковый метод дефектоскопии [7].

Во всех упрочнённых образцах наблюдались нераспространяющиеся трещины усталости, глубина которых замерялась на инструментальном микроскопе УИМ-23 с точностью ± 2 мкм. В образцах без остаточных напряжений такие трещины отсутствовали. Нераспространяющиеся трещины были и на изломах разрушившихся до базы испытаний упрочнённых образцов (рисунок 4.1), причём размер этих трещин соответствует $t_{кр}$ образцов, прошедших базу испытаний без разрушения.

Для образцов, испытанных при напряжениях, мёньших предела выносливости, глубина нераспространяющейся трещины тем меньше, чем меньше напряжение от внешних сил. На рисунке 4.2 представлен график изменения глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ в зависимости от действующего номинального напряжения σ при изгибе для сплошных образцов из стали 45 диаметром 15 мм с надрезом полукруглого профиля $\rho_0 = 0,3$ мм, подвергнутых гидродробе-

струйной обработке.

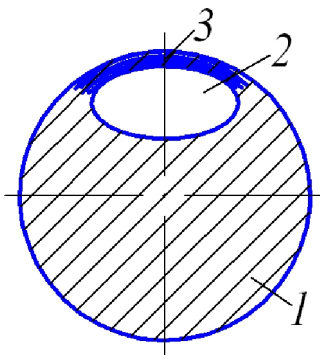


Рисунок 4.1 – Усталостный излом упрочнённого образца:
 1 – зона развития магистральной трещины, 2 – зона долома,
 3 – нераспространяющаяся трещина усталости

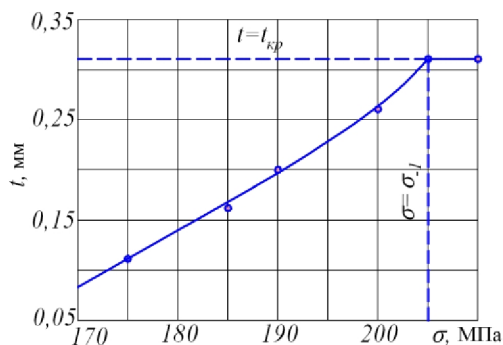


Рисунок 4.2 – Зависимость глубины t нераспространяющейся трещины усталости от действующего напряжения σ

Подобные зависимости наблюдались и в других случаях. Из данных рисунка 4.2 следует, что при напряжении, равном пределу выносливости, трещина достигает значения $t_{кр}$ и при дальнейшем увеличении рабочего напряжения своих размеров не изменяет.

4.1. Методы поверхностного упрочнения, материал, последовательность образования концентратора

Для создания остаточных напряжений применялись следующие методы поверхностного упрочнения: гидродробеструйная обработка (ГДО), пневмодробеструйная обработка (ПДО), обкатка роликом (ОР) на двух режимах, алмазное выглаживание (АВ) (таблица 4.1), обработка микрошариками (ОМ), ультразвуковое упрочнение (УЗУ), азотирование (А), цементация, борирование. Концентраторы на исследуемые детали и образцы наносились как до, так и после упрочнения.

Таблица 4.1. Режимы упрочняющих обработок

Обработка	Материал	Давление масла (воздуха) p , МПа	Диаметр шариков d , мм	Время обработки τ , мин	Усилия накатывания P (выглаживания), кН	Число оборотов образца n , об/мин	Подача S , мм/об	Диаметр ролика D , мм	Профильный радиус ролика $R_{пр}$, мм
ГДО	ЭИ961 ЭИ437Б 30ХГСА 12Х18Н10Т сталь 45	0,28	2	8	—	—	—	—	—
	В93	0,19	2	8	—	—	—	—	—
ПДО	сталь 20	0,28	1,5-2	10	—	—	—	—	—
	В95 Д16Т	0,25	1,5-2	10	—	—	—	—	—
ОР	30ХГСА 12Х18Н10Т сталь 20	—	—	—	0,5 (1) 1,0 (2)	400	0,11	60	1,6
АВ	ЭИ961	—	—	—	0,1	160	0,05	—	2,0

Вначале был изучен случай создания сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении детали за счёт перераспределения остаточных усилий после нанесения надреза на гладкую упрочнённую деталь, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). Точением с последующим шлифованием были изготовлены образцы диаметром 10 мм из сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961, 45, сплавов ЭИ437Б, В93 и диаметром 7,5 мм из стали ЭИ961. Механические характеристики материалов после нормализации (30ХГСА, сталь 45) и стандартной термообработки (12Х18Н10Т, ЭИ961, ЭИ437Б, В93) приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	σ_{θ} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
30ХГСА	788	536	18,9	65,9	1484
12Х18Н10Т	646	281	50,8	65,6	1444
ЭИ961	1090	992	11,3	67,4	2047
сталь 45	757	411	17,4	39,6	1097
ЭИ437Б	972	728	13,4	15,2	1100
В93	334	219	16,3	20,8	358

Одна половина образцов после изготовления подвергалась электрополированию, другая – поверхностному упрочнению на режимах (таблица 4.1), характерных для практики авиационных предприятий. В качестве смазывающеохлаждающей жидкости (СОЖ) при обкатке роликом и алмазном выглаживании использовалось масло И20А.

Эпюры осевых остаточных напряжений в гладких образцах после гидродробеструйной обработки приведены на рисунке 4.3, *а*, а после обкатки роликом и алмазного выглаживания – на рисунке 4.3, *б*. Определялись и окружные остаточные напряжения σ_{θ} , но в настоящей работе они не приведены, так как в

используемые критерии оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости эти напряжения не входят. Однако следует отметить, что после гидродробеструйной обработки выполняется условие $\sigma_\theta = \sigma_z$, а после обкатки роликом и алмазного выглаживания σ_θ меньше σ_z в 1,8 - 2,2 раза.

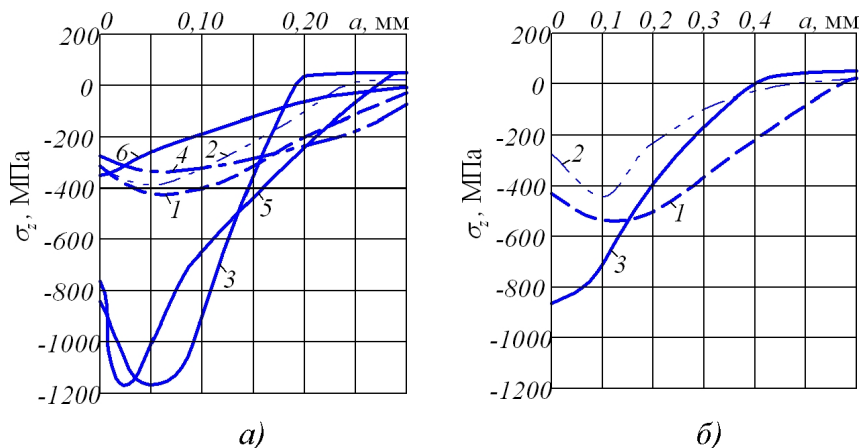


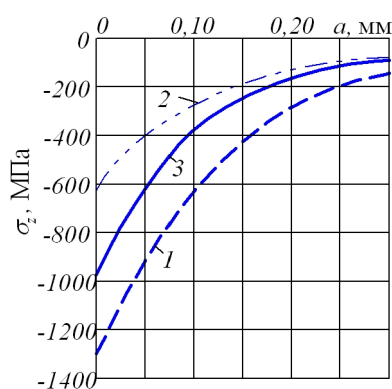
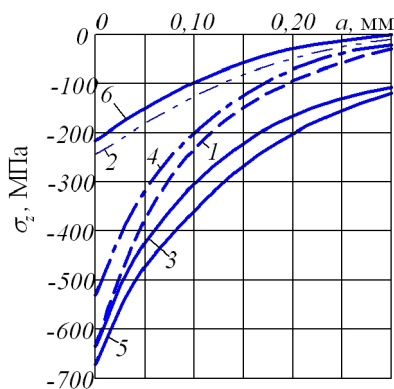
Рисунок 4.3 – Остаточные напряжения в гладких образцах после гидродробеструйной обработки (а), обкатки роликом (б – 1,2), алмазного выглаживания (б – 3): 1 – 30ХГСА, 2 – 12Х18Н10Т, 3 – ЭИ961, 4 – сталь 45, 5 – ЭИ437Б, 6 – В93

Из данных рисунка 4.3 видно, что сжимающие остаточные напряжения после упрочнения дробью в образцах из стали ЭИ961 и сплава ЭИ437Б превышают -1100 МПа, имея подповерхностный максимум. Наибольший спад напряжений к поверхности наблюдается у образцов из сплава ЭИ437Б, как имеющего наименьшую температуропроводность [41]. Толщина слоя с сжимающими остаточными напряжениями после обкатки роликом примерно в два раза больше по сравнению с обработкой на гидродробеструйной установке. Эпюры остаточных напряжений гладких образцов (рисунок 4.3) использовались для вычисления дополнительных остаточных напряжений, возника-

ющих в области надреза после его нанесения на упрочнённую поверхность.

На гладкие неупрочнённые и упрочнённые образцы безнаклёпным способом с использованием электрополирования наносились надрезы полукруглого профиля $\rho_0 = 0,3$ мм. По методике раздела 2.2 проводились расчёты дополнительных остаточных напряжений, просуммировав которые с исходными напряжениями, получали остаточные напряжения в образцах с надрезом. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений в наименьшем сечении образцов с надрезом приведены на рисунке 4.4. Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения, имея максимум на поверхности надреза, быстро уменьшаются по толщине поверхностного слоя. Следует обратить внимание на тот факт, что величину напряжений в детали с надрезом определяет не только наибольшая величина остаточных напряжений гладкой детали, но и характер их распределения. Так, например, в гладких образцах из сплава ЭИ437Б (рисунок 4.3, *а*, эпюра 5) максимальные остаточные напряжения выше, чем в образцах из стали 30ХГСА (рисунок 4.3, *б*, эпюра 1). Однако в образцах с надрезом из стали 30ХГСА максимальные напряжения в два раза выше в силу более полного распределения исходных остаточных напряжений. Это обстоятельство хорошо подтверждает закономерности концентрации остаточных напряжений [46, 48], установленные ранее расчётом по первоначальным деформациям.

При анализе распределений остаточных напряжений, представленных на рисунке 4.4, следует обратить внимание на наибольшую величину сжимающих остаточных напряжений, действующих на поверхности дна надреза. Эти напряжения превышают не только предел текучести, но и предел прочности материала (таблица 4.2). В работе [53] показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых образцах и деталях может достигать сопротивления разрыву S_k и даже превышать его, но не более чем на 15 %. Из данных рисунка 4.4 и таблицы 4.2 видно, что этот предел в



настоящем исследовании не превышен.

б)

Рисунок 4.4 – Остаточные напряжения в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм после гидродробеструйной обработки (а), обкатки роликом при $P = 0,5$ кН (б – 1, 2); алмазного выглаживания (б – 3): 1 – 30ХГСА, 2 – 12Х18Н10Т, 3 – ЭИ961, 4 – сталь 45, 5 – ЭИ437Б, 6 – В93

Значения пределов выносливости при изгибе в случае симметричного цикла, остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности концентратора, глубин нераспространяющихся трещин усталости $t_{кр}$, среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, коэффициентов ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ приведены в таблице 4.3.

На изломах образцов из сталей 30ХГСА и 45 хорошо просматривались нераспространяющиеся трещины усталости, которые являлись практически концентричными.

Из приведённых в таблице 4.3 данных следует, что для различных материалов и методов поверхностного упрочнения коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменяется в меньших пределах, чем коэффициент ψ_σ и равен в среднем 0,358. Обращает также на себя

внимание небольшое различие критических глубин нераспространяющихся трещин усталости для образцов диаметром 10 мм, изготовленных из материалов, существенно отличающихся физико-механическими свойствами и упрочнённых различными методами ППД.

Таблица 4.3. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
		упрочняющая обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	180	ГДО	270	-620	0,145	0,204	-233	0,386
		ОР (1)	400	-1320	0,167	0,202	-576	0,382
12Х18Н10Т	175	ГДО	220	-268	0,168	0,207	-126	0,356
		ОР (1)	280	-640	0,164	0,198	-273	0,384
ЭИ961	230	ГДО	330	-616	0,163	0,200	-302	0,331
		АВ*	380	-1010	0,150	0,160	-422	0,356
сталь 45	155	ГДО	225	-590	0,119	0,197	-204	0,343
ЭИ437Б	215	ГДО	325	-694	0,159	0,200	-325	0,338

Вс	67,5	ГДО	100	-213	0,153	0,203	-96	0,339
----	------	-----	-----	------	-------	-------	-----	-------

* Образцы, упрочнённые алмазным выглаживанием, имели в гладкой части диаметр 7,5 мм

Далее были рассмотрены остаточные напряжения и их влияние на предел выносливости образцов с концентраторами, нанесёнными до упрочняющей обработки. На образцы диаметром $D_1 = 15$ мм из сталей 45, 30ХГСА, ВНС40 наносились V-образные надрезы глубиной $t = 3,75$ мм и $\rho_0 = 0,5$ мм (рисунок 4.5) по ГОСТ 25.502-79 и на образцы диаметром $D_1 = 10$ мм из сталей 38Х2МЮА – V-образные надрезы глубиной $t = 2,5$ мм двух радиусов $\rho_0 = 0,5$ мм и $\rho_0 = 2,5$ мм (рисунок 4.6). Механические характеристики материалов приведены в таблице 4.4.

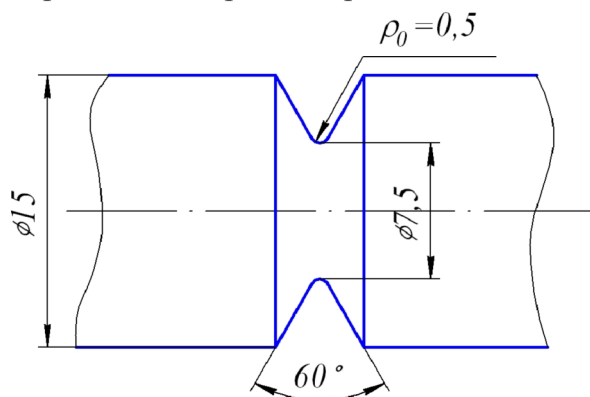
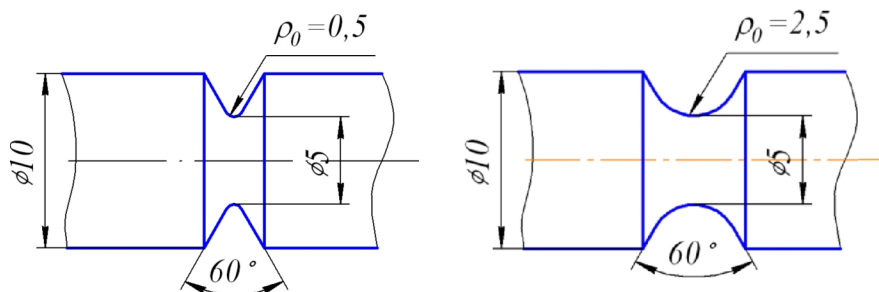


Рисунок 4.5 – Рабочая часть образцов из сталей 30ХГСА, ВНС40 и 45



а)

б)

Рисунок 4.6 – Рабочая часть образцов из стали 38Х2МЮА

Таблица 4.4. Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	σ_{ϵ} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
30ХГСА	788	536	18,9	65,9	1484
ВНЧ40	1070	980	18,0	70,0	2080
сталь 45	710	422	19,7	41,4	1079
38Х2МЮА	1000	810	16,2	58,3	1790

Образцы из сталей 30ХГСА и 45 подвергались обработке микрошариками (ОМ) диаметром 0,10 - 0,15 мм в течение трёх минут на дробемётной установке, ВНЧ40 и 38Х2МЮА – азотированию при температуре 550°C в среде аммиака. Для получения азотированного слоя различной толщины часть образцов из стали 38Х2МЮА подвергалась азотированию в течение 6 часов (А1), другая – 8 часов (А2), образцы из ВНЧ40 азотировались в течение 8 часов (А2), охлаждение с печью.

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах из сталей 30ХГСА и 45 после упрочнения микрошариками приведено на рисунке 4.7, в образцах из сталей ВНЧ40 и 38Х2МЮА после азотирования – на рисунке 4.8. Здесь же для сравнения представлены остаточные напряжения в гладких образцах. Видно, что в образцах с концентраторами остаточные напряжения выше, причём при уменьшении радиуса надреза до 0,5 мм (рисунок 4.8, б) и неизменной толщине деформированного слоя наблюдается существенный рост напряжений на поверхности образца и уменьшается толщина слоя с сжимающими остаточными напряжениями.

В таблице 4.5 приведены результаты испытаний на усталость при изгибе, остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ на поверхности

концентратора, среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, а также результаты измерения критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$.

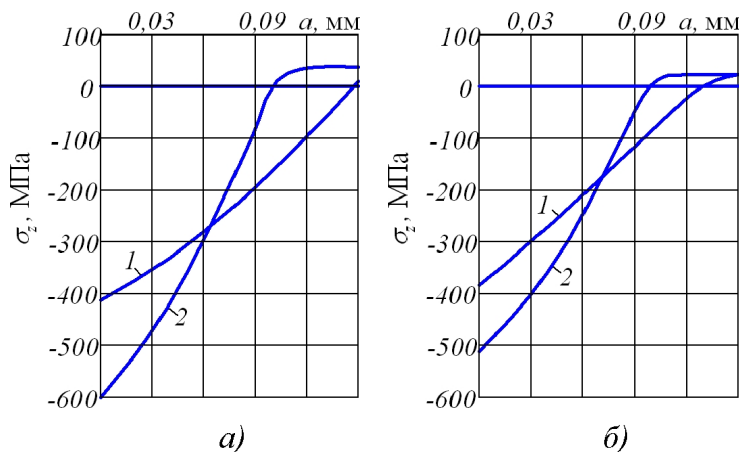


Рисунок 4.7 – Остаточные напряжения в гладких образцах (1) и образцах с надрезом $\rho_0 = 0,5$ мм (2) после обработки микрошариками: а – 30ХГСА, б – сталь 45

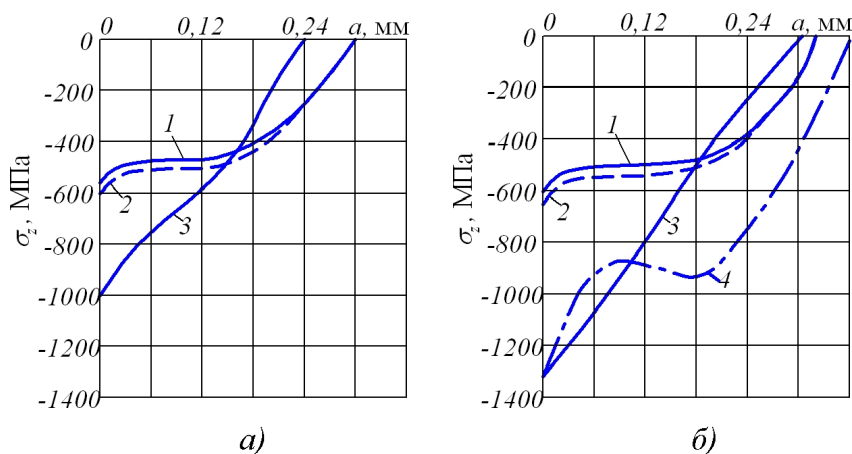


Рисунок 4.8 – Остаточные напряжения в гладких образцах (1), образцах с надрезами $\rho_0 = 2,5$ мм и $\rho_0 = 0,5$ мм (3,4) из сталей 38Х2МЮА (1,2,3) и ВНС40 (4) после азотирования: а – выдержка 6 час (А1), б – выдержка 8 час (А2)

Таблица 4.5. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	ρ_0 , мм	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
			упрочняющая обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	0,5	35	ОМ	85	-780	0,064	0,166	-137	0,364
ВНС40	0,5	200	А2	560	-1320	0,273	0,160	-947	0,380
сталь 45	0,5	77,5	ОМ	120	-580	0,072	0,162	-119	0,357
38Х2МЮА	0,5	165	А1	405	-990	0,242	0,110	-712	0,337
	2,5	545	А2	738	-680	0,284	0,103	-539	0,356

На изломе азотированного образца из стали ВНС40 также наблюдалась нераспространяющаяся трещина усталости (рисунок 4.9), критическая глубина которой составляла 0,160 МПа.

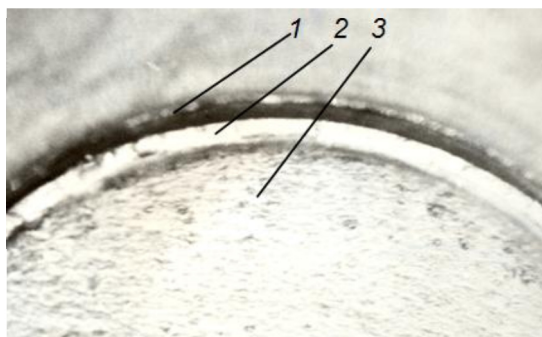


Рисунок 4.9 – Фрагмент излома азотированного образца из стали ВНС40 после испытаний на усталость: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Из данных таблицы 4.5 следует, что и при непосредственном упрочнении концентраторов микрошариками и азоти-

рованием коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменяется в значительно меньших пределах, чем ψ_σ , и равен в среднем 0,359. Коэффициент ψ_σ , учитывающий влияние остаточных напряжений на поверхности концентратора, изменяется от 0,064 (30ХГСА, ОМ) до 0,284 (38Х2МЮА, А2). Также как и в предыдущих опытах, не наблюдалось влияния вида упрочняющей обработки на коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$.

Таким образом, проведённые эксперименты показывают, что оценку приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами для рассмотренных методов упрочнения и материалов можно проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ с помощью формулы (3.8), приняв в ней $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$.

4.2 Наклёп

Исследовалось отдельное и совместное влияние остаточных напряжений и наклёпа на предел выносливости при изгибе образцов из отожжённой стали 45 диаметром 10 мм с надрезом полукруглого профиля $\rho_0 = 0,3$ мм. Проводился отжиг заготовок с целью исключения остаточных напряжений и наклёпа, которые возможны в прутках в состоянии поставки. Механические характеристики стали 45 после отжига приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Механические характеристики стали 45

σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
580	300	23	38	1014

Для создания остаточных напряжений в ненаклёпанном материале использовались упрочнённые микрошариками и дробью гладкие образцы, на которые точением, а затем электрополированием наносились надрезы на глубину, превышающую

толщину наклёпанного при упрочнении слоя. Остаточные напряжения на дне надреза в ненаклёпанном материале возникали за счёт перераспределения остаточных усилий гладкого образца.

Для создания наклёпа без остаточных напряжений заготовки из исследуемых материалов подвергались растяжению до степени пластической деформации $\varepsilon_{ост} = 2, 10, 15\%$. После изготовления образцов точением использовалось электрополирование на глубину, необходимую для удаления вторично наклёпанного слоя и устранения остаточных напряжений.

Для создания наклёпа с остаточными напряжениями гладкие образцы, изготовленные из предварительно растянутых заготовок, электрополировались и подвергались упрочнению дробью. Далее точением, а затем электрополированием наносились надрезы на глубину, превышающую толщину вторично наклёпанного слоя. В изготовленных таким образом образцах на дне надрезов действовали известные остаточные напряжения в материале с заданным наклёпом.

В качестве методов поверхностного пластического деформирования использовались обработка микрошариками диаметром 0,10 - 0,15 мм на роторной установке в течение трёх минут, гидродробеструйная обработка и обкатка роликом, режимы которых приведены в таблице 4.1. После упрочнения гладких образцов микрошариками и дробью сжимающие остаточные напряжения меняли знак на глубине до 0,3 мм, обкаткой роликом – 0,5 мм. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в гладких и надрезанных образцах представлено на рисунке 4.10, а результаты испытаний на усталость, значения $\sigma_z^{нов}$ на поверхности, $\bar{\sigma}_{ост}$, $t_{кр}$, ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ – в таблице 4.7.

Из приведённых в таблице 4.7 данных видно, что наклёп без остаточных напряжений в условиях концентрации не влияет на предел выносливости. Такой же результат получен в работе [12] применительно к алюминиевому сплаву АК8. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости при наличии

наклёпа на дне надреза остаётся таким же, как и без него – коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ различается в этих случаях незначительно. Кроме того, неравномерный наклёп в наименьшем сечении надрезанного образца, обкатанного роликом (здесь наклёпанный ролик слой был прорезан не полностью), также не оказывает влияния на коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$. В целом, среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma = 0,341$ здесь несколько ниже, чем в предыдущих случаях, но это различие не превышает 6%.

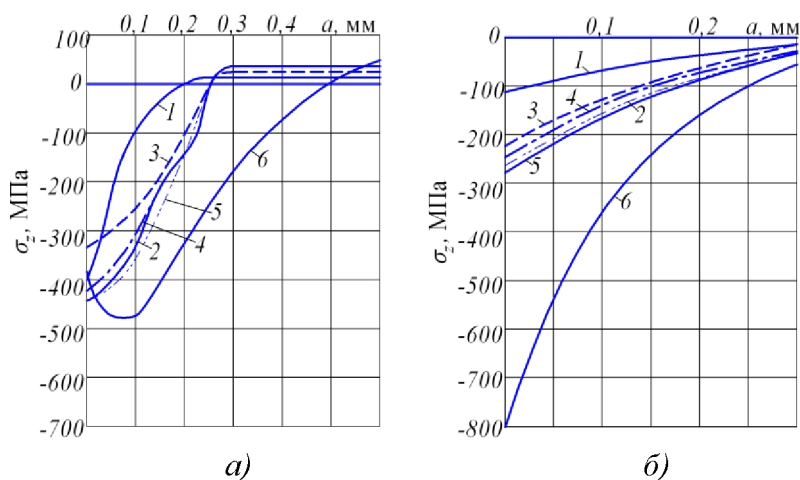


Рисунок 4.10 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) из отожжённой стали 45:

1 – ОМ ($\delta = 0$); 2 – ГДО ($\delta = 0$); 3 – ГДО ($\delta = 2\%$);
4 – ГДО ($\delta = 10\%$); 5 – ГДО ($\delta = 15\%$); 6 – ОР (1) ($\delta = 0$)

Таблица 4.7. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Обработка	$\varepsilon_{осм}, \%$	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}, \text{МПа}$	Упрочнённые образцы					
			$\sigma_{-1}, \text{МПа}$	$\sigma_z^{нов}, \text{МПа}$	ψ_σ	$t_{кр}, \text{мм}$	$\bar{\sigma}_{осм}, \text{МПа}$	$\bar{\psi}_\sigma$
ОМ	0	120	140	-118	0,169	0,203	-59	0,338

ГДО	0	120	165	-275	0,164	0,203	-135	0,333
	2	120	160	-214	0,187	0,205	-111	0,362
	10	120	165	-255	0,176	0,198	-140	0,320
	15	115	160	-261	0,172	0,206	-132	0,341
ОР (1)	0	120	235	-827	0,139	0,197	-325	0,354

Обращает на себя внимание и тот факт, что коэффициент $\overline{\psi}_{\sigma}$ остаётся практически постоянным при изменении остаточных напряжений на дне надреза в широком диапазоне: от -118 МПа после обработки микрошариками до -827 МПа после обработки роликом.

Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ практически одинакова во всех партиях образцов (таблица 4.7). Следовательно, $t_{кр}$ не зависит в исследованных пределах ни от степени наклёпа, ни от величины сжимающих остаточных напряжений и составляет в среднем для исследованных образцов примерно 0,2 мм. На это обстоятельство указывалось также в работе [49], где описаны результаты исследования нераспространяющихся трещин в образцах из стали 30ХГСА с резьбой М16х2, нарезанной по предварительно упрочнённой роликом поверхности. Было установлено, что $t_{кр}$ не зависит от усилия обкатывания, наклёпа и глубины наклёпанного слоя.

Также как и в разделе 4.1, обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений на дне надреза в случае обкатки роликом, которая существенно превышает предел текучести материала образца ($\sigma_{0,2} = 300$ МПа). Объясняя это явление, необходимо учесть, что упрочнённый поверхностный слой материала имеет механические характеристики, превышающие механические характеристики всего образца (детали), так как предел текучести поверхностного слоя в результате наклёпа может достигать величины сопротивления разрыву. В работе [53] показано, что при плоском напряжённом состоянии в поверхностно упрочнённых образцах и деталях остаточные напряжения могут быть выше сопротивления разрыву материала S_k на 15%.

4.3. Короткие зоны упрочнения

Для подтверждения расчётного исследования коротких зон упрочнения [46, 47] были проведены испытания на усталость гладких образцов диаметром 10 мм из стали 45, механические характеристики которой приведены в таблице 4.2. В качестве упрочняющей обработки использовалось обкатывание роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм. Было изготовлено пять партий образцов, характер и режимы упрочнения (усилие накатывания P , продольная подача S , число оборотов n , СОЖ), а также результаты испытаний на усталость представлены в таблице 4.8.

Первая партия образцов испытывалась после течения (исходное состояние). Вторая и третья подвергались равномерному упрочнению по всей поверхности рабочей части образцов. На образцы четвёртой и пятой партий за один оборот наносились одиночные следы упрочняющим роликом без продольной подачи.

Равномерное упрочнение образцов привело к существенному увеличению предела выносливости, которое составило соответственно 26 и 32% при $P = 0,5$ (1) и 1,0 (2) кН. Предел выносливости четвёртой и пятой партий несколько снизился по сравнению с исходным состоянием, причём при $P = 1,0$ кН снижение более значительное, чем при $P = 0,5$ кН. Необходимо отметить, что все поломки образцов этих партий произошли по середине следа от упрочняющего ролика. Ширина одиночного кольцевого следа ролика, которую можно принять за протяжённость зоны упрочнения $S_{\text{упр}}$, измерялась на инструментальном микроскопе УИМ-23 с точностью ± 2 мкм. В таблице 4.9 приведены средние значения $S_{\text{упр}}$ по 15 образцам в каждой партии и результаты расчётов толщины упрочнённого слоя δ по методике работы [23].

Можно видеть, что для образцов с одиночным кольцевым

следом выполняется условие $S_{упр} < \delta$, поэтому, как это следует из расчётного исследования [47], в среднем сечении образца возникают растягивающие остаточные напряжения, чем и объясняется уменьшение предела выносливости четвёртой и пятой партий образцов по сравнению с первой.

Таблица 4.8. Режимы упрочнения образцов и результаты испытаний на усталость

Партия	Характер обработки образцов	Режимы упрочнения			СОЖ	σ_{-1} , МПа	$S_{\sigma_{-1}}$, МПа
		P , кН	S , мм/об	n , об/мин			
1	исходное состояние	-	-	-	-	272	8,6
2	равномерное упрочнение по всей поверхности	0,5	0,11	400	масло И20А	343	4,1
3	равномерное упрочнение по всей поверхности	1,0	0,11	400	масло И20А	358	16,4
4	одиночный кольцевой след от обкатного ролика	0,5	0	12,5	масло И20А	264	6,5
5	одиночный кольцевой след от обкатного ролика	1,0	0	12,5	масло И20А	255	4,5

Таблица 4.9. Параметры одиночного кольцевого следа

Партия	$S_{упр}$, мм	δ , мм	ρ_0 , мм не менее	K_σ не более
--------	----------------	---------------	---------------------------	------------------------

4	0,34	0,71	1,6	1,01
5	0,50	1,01	1,6	1,03

Возникает вопрос: не является ли наблюдаемое снижение предела выносливости следствием концентрации рабочих напряжений, возникающих на дне кольцевого следа? Для ответа на этот вопрос по результатам измерений глубины следа и радиуса ρ_0 был вычислен эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ по формуле [61]

$$K_\sigma = 1 + q_\sigma(\alpha_\sigma - 1). \quad (4.1)$$

Значения коэффициента K_σ (таблица 4.9) свидетельствуют о том, что столь малая концентрация рабочих напряжений не может быть причиной уменьшения предела выносливости образцов с одиночным кольцевым следом.

Таким образом, уменьшение предела выносливости, локализация очага разрушения, параметры зоны упрочнения образцов с одиночным кольцевым следом от обкатного ролика подтверждают выявленное расчётным путём [47] возникновение растягивающих остаточных напряжений при упрочнении малых по протяжённости зон деталей.

5. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ

Рассматривалось влияние типа и размеров концентраторов, поперечных размеров деталей, в том числе и диаметра отверстия, на остаточные напряжения и предел выносливости деталей и образцов.

5.1. Тип концентратора

Изучались остаточные напряжения и предел выносливости деталей и образцов с концентраторами в виде полукруглых и V-образных надрезов, галтелей различного радиуса, напрессованной втулки.

На неупрочнённые и упрочнённые дробью и роликом образцы диаметром 15 мм из стали 30ХГСА наносились надрезы полукруглого профиля двух радиусов $\rho_0 = 0,3$ и 0,5 мм, на упрочнённые роликом образцы диаметром 25 мм из стали 40Х таким же способом наносились надрезы полукруглого профиля $\rho_0 = 1,0$ мм. Режимы упрочнения приведены в таблице 4.1, причём образцы из стали 40Х накатывались при усилии $P = 1,0$ кН (2), а образцы диаметром 25 мм из стали 20 при усилии $P = 0,5$ кН (1) и $P = 1,0$ кН (2). Механические характеристики материалов представлены в таблице 5.1.

Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений гладких образцов показаны на рисунке 5.1, а, образцов с надрезом – на рисунке 5.1, б. Можно видеть, что в обкатанных образцах с надрезом действуют значительные сжимающие остаточные напряжения, достигающие для стали 30ХГСА -1530 МПа.

Образцы из сталей 30ХГСА, 45, 12Х18Н10Т и сплава Д16Т (таблица 5.1) диаметром 10 мм в гладкой части с галтелью радиуса ρ_0 (рисунок 5.2) подвергались упрочнению микроша-риками диаметром 0,10-0,15 мм на роторной установке в тече-

ние трёх минут.

Таблица 5.1. Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
30ХГСА	788	536	18,9	65,9	1484
40Х	751	444	17,6	60,7	1330
Д16Т	557	410	15,0	23,1	728
сталь 45	710	422	19,7	41,4	1079
12Х18Н10Т	646	281	50,8	65,6	1444
сталь 20	522	395	26,1	65,9	1416

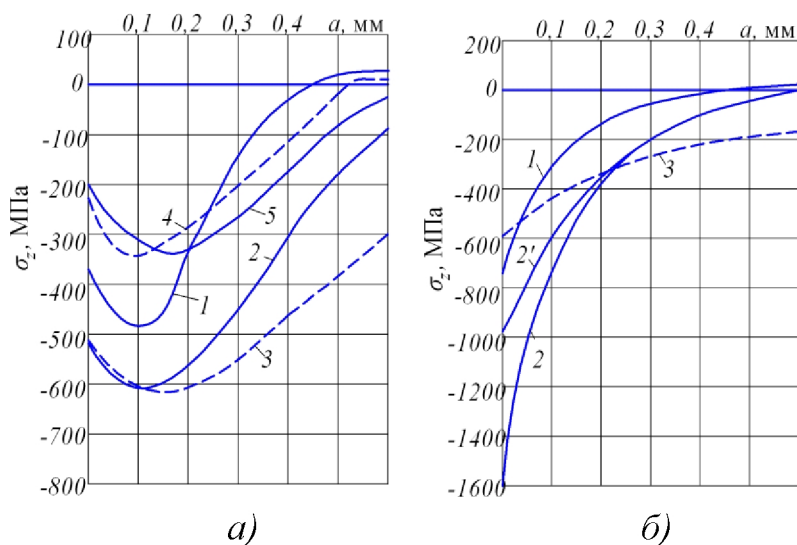


Рисунок 5.1 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из сталей 30ХГСА (1,2), 40Х (3) и 20 (4, 5): 1 – ГДО, $\rho_0 = 0,3$ мм; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН, $\rho_0 = 0,3$ мм; 2' – ОР, $P = 0,5$ кН, $\rho_0 = 0,5$ мм; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН, $\rho_0 = 1,0$ мм; 4 – ОР, $P = 0,5$ кН; 5 – ОР, $P = 1,0$ кН

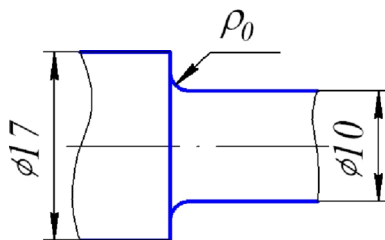


Рисунок 5.2 – Рабочая часть образца с галтелью

Обработка образцов микрошариками осуществлялась перпендикулярно их оси, поэтому упрочнялась лишь цилиндрическая часть поверхности с галтелью, а боковая поверхность оставалась в исходном состоянии, то есть без упрочнения. Необходимо отметить, что на основании результатов исследования работы [48] остаточные напряжения в галтели не будут заметно отличаться от напряжений гладкой части образца. Поэтому для вычисления среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ использовались эпюры осевых σ_z остаточных напряжений гладких образцов, приведённые на рисунке 5.3.

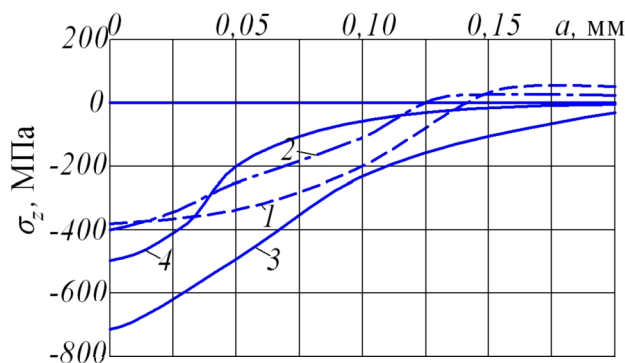


Рисунок 5.3 – Остаточные напряжения в гладких образцах после обработки микрошариками: 1 – 30ХГСА, 2 – сталь 45, 3 – 12Х18Н10Т, 4 – Д16Т

Испытывались также упрочнённые роликом образцы диаметром 25 мм из сталей 40X ($P = 1,0$ кН (2)) и 20 ($P = 0,5$ кН (1) и $P = 1,0$ кН (2)) с напрессованной втулкой, через которую передавалось усилие. Механические характеристики сталей 40X и 20 представлены в таблице 5.1, а эпюры осевых σ_z остаточных напряжений – на рисунке 5.1, а (кривые 3, 4, 5).

Результаты определения пределов выносливости при изгибе, расчёта среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, измерения $t_{кр}$, вычисления коэффициентов ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ приведены в таблице 5.2.

Из приведённых в таблице 5.2 данных видно, что для надрезов и галтелей с различными радиусами коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, отражающий влияние упрочнения через критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, $\bar{\sigma}_{ост}$ изменяется также, как и в предыдущих опытах, в небольших пределах и равен в среднем $\bar{\psi}_\sigma = 0,361$. Это значение близко к величине $\bar{\psi}_\sigma$ в других экспериментах для образцов с аналогичной степенью концентрации напряжений. Коэффициент ψ_σ , учитывающий влияние остаточных напряжений на поверхности $\sigma_z^{нов}$, изменяется в широких пределах – от 0,065 до 0,156.

Рассмотренные в этом разделе концентраторы следует дополнить V-образными надрезами с радиусами $\rho_0 = 0,5$ и 2,5 мм, изученными в разделе 4, для которых коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ имел такие же значения. Необходимо обратить внимание на увеличение критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости с увеличением диаметра образца (детали).

Для образцов из стали 40X с напрессованной втулкой коэффициент $\bar{\psi}_\sigma = 0,253$, что заметно меньше, чем в других случаях, а также для образцов из стали 20 с напрессованной втулкой. Это различие объясняется бóльшей степенью концентрации напряжений для образцов из стали 40X, чем для образцов из сталей 20. Эффективный коэффициент концентрации напряже-

Таблица 5.2. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Концентратор ρ_0 , мм	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
			упрочняющая обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	надрез 0,3	177,5	ГДО	255	-740	0,105	0,309	-200	0,387
			ОР (1)	360	-1530	0,119	0,314	-507	0,360
	надрез 0,5	180	ОР (1)	327,5	-1005	0,147	0,300	-422	0,350
	галтель 0,1	155	ОМ	180	-332	0,075	0,217	-74,8	0,335
сталь 45	галтель 0,125	117,5	ОМ	152,5	-412	0,085	0,225	-95,3	0,367
12Х18Н10Т	галтель 0,15	150	ОМ	220	-680	0,103	0,220	-180	0,389
Д16Т	галтель 0,08	42,5	ОМ	72,5	-460	0,065	0,220	-81,5	0,368
40Х	надрез 1,0	160	ОР (2)	257,5	-642	0,156	0,490	-110	0,334
	напрес. втулка	162,5	ОР (2)	285	-520	0,235	0,523	-484	0,253
сталь 20	напрес. втулка	100	ОР (1)	150	-220	0,227	0,535	-148	0,338
			ОР (2)	170	-200	0,350	0,540	-201	0,348

ний K_σ в случае втулки, напрессованной на вал, для стали 40Х составляет $K_\sigma = 3,95$, а для стали 20 – $K_\sigma = 2,33$ [61]. В работе [17] установлено, что на значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ существенное влияние оказывает концентрация напряжений, что выражается зависимостью (7.4).

Таким образом, для исследованных типов концентраторов в случае, если через них не передаётся усилие, в среднем коэффициент $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$. Если же через концентратор передаётся сила (втулка, напрессованная на вал), то коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ будет меньше и для валов из стали 40Х его ориентировочно можно принять равным 0,25.

5.2. Размеры поперечного сечения

Вначале было рассмотрено влияние размеров внутреннего диаметра полый цилиндрической детали на остаточные напряжения и предел выносливости при изгибе. Эксперименты проводились на сплошных и полых образцах с надрезом полукруглого профиля с наружным диаметром $D_I = 15$ мм (рисунок 5.4) из сталей 30ХГСА, 45, 12Х18Н10Т и сплава Д16Т, а также на образцах $D_I = 25$ мм из стали 40Х. Механические характеристики материалов приведены в таблице 5.1. Образцы диаметром 15 мм изготавливались с отверстием $d = 5, 8$ (сталь 45), 10,4 и 12,4 мм (сталь 45), диаметром 25 мм – $d = 10$ и 19 мм. Гладкие образцы упрочнялись на гидродробеструйной установке и обкаткой роликом с режимами, указанными в таблице 4.1. Отличие было лишь для образцов из стали 40Х, для которых усилие накатывания было увеличено до $P = 1,0$ кН (2).

На неупрочнённые и упрочнённые образцы безнаклёпным способом наносились надрезы полукруглого профиля $\rho_0 = 0,3$ мм (30ХГСА, 45, 12Х18Н10Т, Д16Т, 40Х), 0,5 мм (30ХГСА) и 1,0 мм (40Х). Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений в гладких и надрезанных образцах приведены на рисун-

ках 5.5 – 5.9. На рисунке 5.5, б не вынесены лишь эпюры напряжений для образцов из стали 30ХГСА с радиусом надреза $\rho_0 = 0,5$ мм.

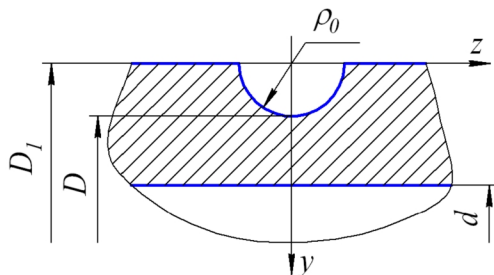


Рисунок 5.4 – Надрез полукруглого профиля на цилиндрической детали

Из приведённых на рисунках 5.5 – 5.9 данных для гладких образцов можно видеть, что при упрочнении на одних и тех же режимах сжимающие остаточные напряжения уменьшаются с увеличением диаметра отверстия, то есть с уменьшением толщины стенки. Этот результат согласуется с расчётами по аналитическим зависимостям работы [2]. Кроме того, уменьшение толщины стенки детали приводит к уменьшению толщины слоя с сжимающими остаточными напряжениями. Для образцов с надрезом уменьшение толщины стенки не приводит к резкому падению остаточных напряжений, как этого следовало ожидать из-за снижения напряжений гладких деталей, так как в соответствии с выявленными закономерностями уменьшение толщины стенки влечёт за собой рост концентрации остаточных напряжений [46].

Результаты испытаний на усталость, остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ на поверхности концентраторов, критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, коэффициенты ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$, размеры образцов и надрезов приведены в таблице 5.3. Из

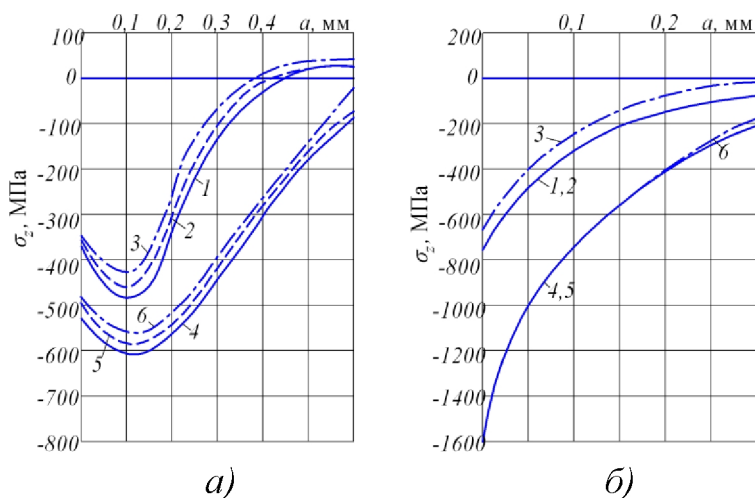


Рисунок 5.5 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) из стали 30ХГСА после ГДО (1-3) и ОР (4-6): 1,4 – $d = 0$; 2,5 – $d = 5$ мм; 3,6 – $d = 10$ мм

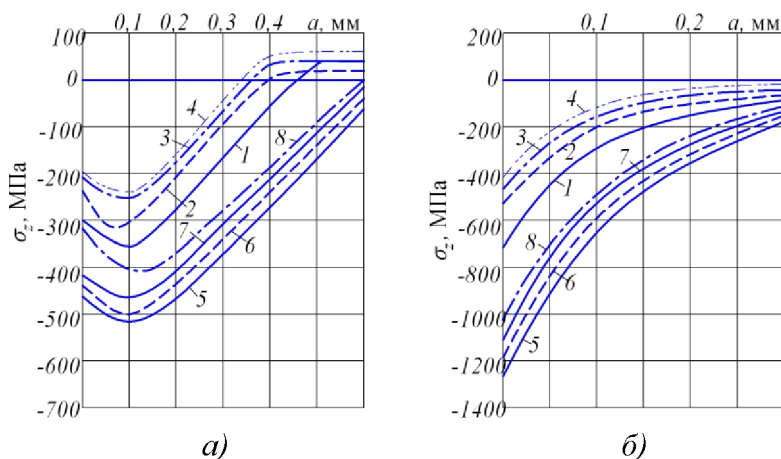


Рисунок 5.6 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) из стали 45 после ГДО (1-4) и ОР (5-8): 1,5 – $d = 0$; 2,6 – $d = 5$ мм; 3,8 – $d = 10$ мм; 4 – $d = 12,4$ мм; 7 – $d = 8$ мм

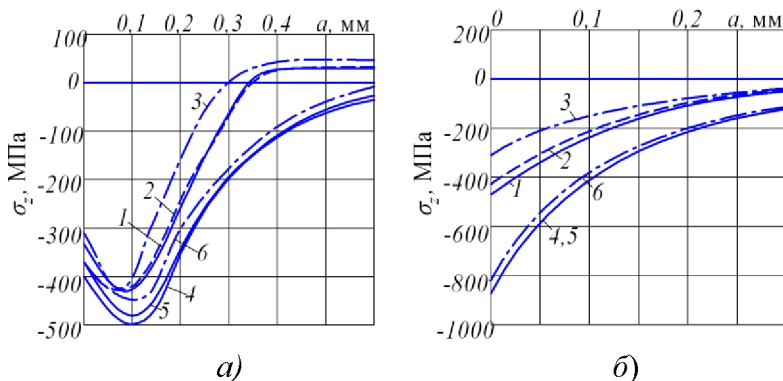


Рисунок 5.7 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) из стали 12Х18Н10Т после ГДО (1-3) и ОР (4-6): 1, 4 – $d = 0$; 2, 5 – $d = 5$ мм; 3, 6 – $d = 10$ мм

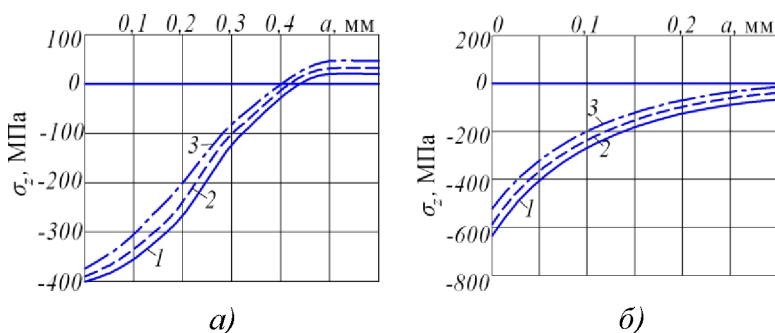


Рисунок 5.8 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) из сплава Д16Т после ГДО: 1 – $d = 0$; 2 – $d = 5$ мм; 3 – $d = 10$ мм

данных этой таблицы следует, что с увеличением диаметра отверстия глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ уменьшается, однако это изменение $t_{кр}$ не является пропорциональным ни толщине стенки, ни диаметру отверстия. Отметим также, что для образцов из разных материалов, но одинаковой геометрии, значения $t_{кр}$ практически не различаются. Для об-

разцов из стали 40X, испытанных при изгибе в одной плоскости, нераспространяющаяся трещина усталости имеет серповидную форму: в наиболее удалённых от нейтральной оси точках её глубина $t_{кр}$ – наибольшая, ближе к оси – глубина трещины уменьшается.

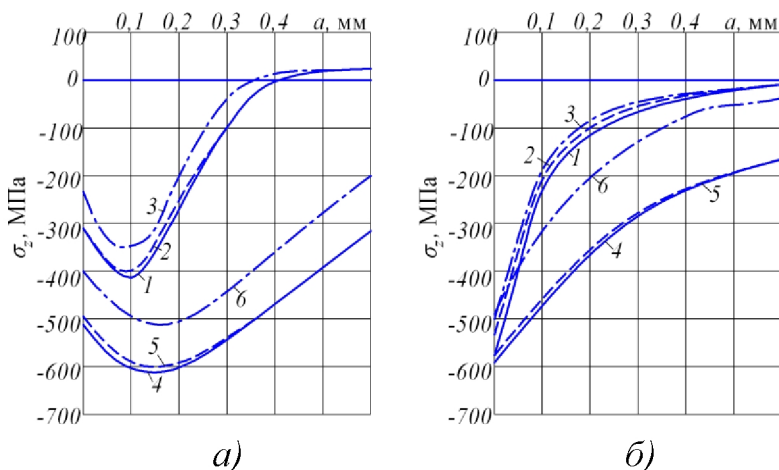


Рисунок 5.9 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) $\rho_0 = 0,3$ мм после ГДО (1-3) и $\rho_0 = 1,0$ мм после ОР (4-6) из стали 40X: 1, 4 – $d = 0$; 2, 5 – $d = 10$ мм; 3, 6 – $d = 19$ мм

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменяется от 0,318 до 0,388, составляя в среднем 0,358 для всех партий образцов. Он практически не зависит от толщины стенки образцов, то есть и в этих случаях среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ хорошо отражают влияние сжимающих остаточных напряжений на приращение предела выносливости полых цилиндрических деталей с различным соотношением наружного и внутреннего диаметров.

На примере образцов из стали 40X видно, что предло-

Таблица 5.3. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Размеры образцов и концентраторов				Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
	D_1 , мм	D , мм	d , мм	ρ_0 , мм		упрочняющая обраб.	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
30ХГСА	15	14,4	0	0,3	177,5	ГДО	255	-740	0,105	0,309	-200	0,387
						ОР (1)	360	-1550	0,119	0,314	-507	0,360
	15	14,0	0	0,5	180	ОР (1)	327,5	-1005	0,147	0,300	-422	0,350
	15	14,4	5	0,3	177,5	ГДО	255	-704	0,110	0,294	-206	0,376
						ОР (1)	360	-1520	0,120	0,310	-510	0,357
	15	14,0	5	0,5	180	ОР (1)	317,5	-990	0,139	0,302	-404	0,341
	15	14,4	10	0,3	175	ГДО	255	-658	0,121	0,249	-206	0,388
						ОР (1)	380	-1540	0,133	0,257	-592	0,346
	15	14,0	10	0,5	175	ОР (1)	290	-940	0,122	0,262	-321	0,358
сталь 45	15	14,4	0	0,3	130	ГДО	205	-712	0,098	0,309	-184	0,381
						ОР (1)	260	-1250	0,104	0,310	-409	0,318
	15	14,4	5	0,3	130	ГДО	180	-524	0,095	0,296	-133	0,376
						ОР (1)	260	-1220	0,107	0,298	-388	0,335
	15	14,4	8	0,3	130	ОР (1)	250	-1120	0,107	0,276	-357	0,336
	15	14,4	10	0,3	125	ГДО	175	-510	0,098	0,243	-134	0,372
						ОР (1)	245	-1050	0,114	0,248	-360	0,330
	15	14,4	12,4	0,3	105	ГДО	152,5	-466	0,102	0,184	-136	0,348

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12X18H10T	15	14,4	0	0,3	162,5	ГДО	205	-460	0,092	0,310	-129	0,329
						ОР (1)	262,5	-865	0,116	0,308	-277	0,361
	15	14,4	5	0,3	162,5	ГДО	205	-448	0,095	0,299	-126	0,338
	15	14,4	10	0,3	155	ГДО	197,5	-322	0,132	0,256	-117	0,364
Д16Т	15	14,4	0	0,3	75	ГДО	140	-635	0,103	0,309	-171	0,380
	15	14,4	5	0,3	75	ГДО	135	-615	0,097	0,296	-160	0,375
	15	14,4	10	0,3	70	ГДО	130	-555	0,108	0,245	-167	0,358
40Х	25	24,4	0	0,3	160	ГДО	202,5	-642	0,066	0,540	-110	0,386
		23,0		1,0	160	ОР (2)	257,5	-624	0,156	0,490	-292	0,334
	25	24,4	10	0,3	160	ГДО	202,5	-644	0,066	0,520	-114	0,373
		23,0		1,0	160	ОР (2)	260	-628	0,159	0,510	-293	0,410
	25	24,4	19	0,3	147,5	ГДО	187,5	-528	0,076	0,360	-111	0,360
		23,0		1,0	125	ОР (2)	195	-512	0,136	0,340	-193	0,364

женный критерий оценки учитывает характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. Остаточные напряжения на поверхности концентратора после гидродробеструйной обработки выше, чем после обкатки роликом, однако приращение предела выносливости, наоборот, в два раза ниже, что объясняется различной полнотой эпюр остаточных напряжений (рисунок 5.9).

Далее было рассмотрено влияние наружного диаметра детали на распределение и величину остаточных напряжений, а также приращение предела выносливости при изгибе.

Эксперименты проводились на сплошных образцах из сплава Д16Т, сталей 45, 20 и полых образцах из сталей 45, 20 с постоянной толщиной стенки, равной 5 мм. Механические характеристики материалов приведены в таблице 5.4. Гладкие сплошные и полые образцы диаметром $D_l = 10 - 50$ мм изготавливались из прутков диаметром 50 мм (Д16Т) и диаметром 60 мм (стали 45 и 20).

Таблица 5.4. Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
Д16Т	547	426	14,8	16,5	647
сталь 45	757	411	17,4	39,6	1097
сталь 20	522	395	26,1	65,9	1416

Размеры образцов представлены в таблице 5.5. Половина образцов из сплава Д16Т и стали 45 подвергалась гидродробеструйной обработке (ГДО) с режимами, приведёнными в таблице 4.1, из стали 20 – пневмодробеструйной обработке (ПДО) и обкатке роликом (ОР) по режимам таблицы 4.1. На упрочнённые и неупрочнённые образцы наносились надрезы полукруглого профиля $\rho_0 = 0,3$ мм, 0,5 мм и 1,0 мм.

Таблица 5.5 Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Размеры образцов и концентраторов				Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
	D_I , мм	D , мм	d , мм	ρ_0 , мм		упрочняющая обраб.	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Д16Т	10	9,4	0	0,3	102,5	ГДО	172,5	-528	0,132	0,209	-191	0,367
	15	14,4	0	0,3	85	ГДО	142,5	-564	0,087	0,305	-170	0,338
	25	24,4	0	0,3	62,5	ГДО	107,5	-686	0,066	0,535	-127	0,354
	40	39,4	0	0,3	57,5	ГДО	87,5	-732	0,041	0,860	-85	0,352
сталь 45	10	9,4	0	0,3	155,0	ГДО	225	-590	0,119	0,197	-204	0,343
	15	14,4	0	0,3	152,5	ГДО	210	-640	0,090	0,312	-157	0,366
	15	14,4	5	0,3	152,5	ГДО	210	-616	0,093	0,300	-154	0,372
	25	24,4	0	0,3	147,5	ГДО	190	-724	0,059	0,508	-112	0,378
	25	24,4	15	0,3	140	ГДО	185	-734	0,061	0,477	-125	0,361
	50	49,4	0	0,3	122,5	ГДО	147,5	-828	0,030	1,064	-67	0,372
	50	49,4	40	0,3	87,5	ГДО	117,5	-776	0,039	0,763	-80	0,375
сталь 20	10	9,4	0	0,3	110	ПДО	155	-263	0,171	0,203	-126	0,357
						ОР (1)	230	-732	0,164	0,195	-337	0,356
						ОР (2)	267,5	-861	0,183	0,205	-454	0,347
	10	9,0	0	0,5	120	ПДО	137,5	-90	0,194	0,196	-48	0,365
						ОР (1)	187,5	-311	0,217	0,202	-178	0,379
						ОР (2)	250	-517	0,251	0,192	-333	0,390

Продолжение таблицы 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
статья 20	25	24,4	0	0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
						ОР (1)	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
						ОР (2)	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
		24,0	0	0,5	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
						ОР (1)	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
						ОР (2)	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
		23,0	0	1,0	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
						ОР (1)	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
						ОР (2)	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380
		24,4	15	0,3	95	ПДО	127,5	-307	0,106	0,452	-88	0,368
						ОР (1)	155	-732	0,082	0,445	-181	0,331
						ОР (2)	177,5	-861	0,096	0,442	-248	0,333
		24,0	15	0,5	110	ПДО	127,5	-124	0,121	0,438	-47	0,372
						ОР (1)	152,5	-311	0,137	0,442	-128	0,332
						ОР (2)	182,5	-517	0,140	0,446	-218	0,333
		23,0	15	1,0	90	ПДО	95	-29	0,175	0,410	-14	0,357
						ОР (1)	105	-77	0,195	0,420	-39	0,384
						ОР (2)	110	-105	0,191	0,420	-53	0,377
	50	49,0	40	0,5	60	ОР (1)	87,5	-311	0,088	0,710	-82	0,335
						ОР (2)	105	-517	0,087	0,720	-133	0,338

Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений в гладких образцах и в образцах с надрезом представлены на рисунках 5.10 – 5.13. Видно, что при одинаковой упрочняющей обработке в сплошных образцах бóльшего диаметра возникают бóльшие сжимающие остаточные напряжения с бóльшей глубиной их залегания. В полых образцах при постоянной толщине стенки с увеличением диаметра величина и глубина залегания сжимающих остаточных напряжений изменяется незначительно. Эти закономерности совпадают с результатами расчётов по первоначальным деформациям [2]. Из данных рисунков 5.12 и 5.13 можно видеть, что с увеличением радиуса надреза при ОПД уровень сжимающих остаточных напряжений существенно снижается.

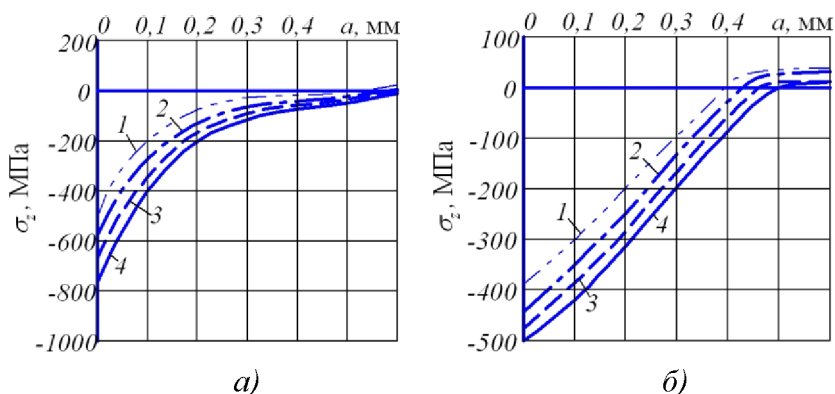


Рисунок 5.10 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) из сплава Д16Т после ГДО: 1 – $D_1 = 10$ мм; 2 – $D_1 = 15$ мм; 3 – $D_1 = 25$ мм; 4 – $D_1 = 40$ мм

Результаты испытаний на усталость при изгибе, остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ и $\bar{\sigma}_{ост}$, глубина трещины $t_{кр}$, коэффициенты ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ представлены в таблице 5.5. Из данных таблицы 5.5 следует, что с увеличением диаметра сплошного образца

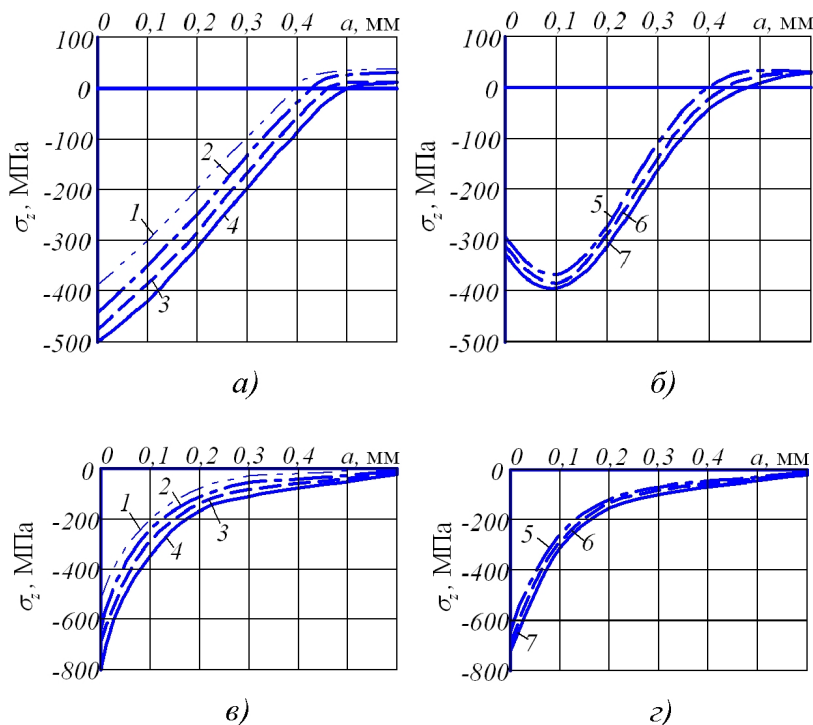


Рисунок 5.11 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а,б) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (в,г) из стали 45 после

ГДО: 1 – $D_I = 10$ мм, 2 – $D_I = 15$ мм, 3 – $D_I = 25$ мм,

4 – $D_I = 50$ мм, 5 – $D_I = 15$ мм, $d = 5$ мм, 6 – $D_I = 25$ мм,

$d = 15$ мм, 7 – $D_I = 50$ мм, $d = 40$ мм

остаточные напряжения на дне надреза возрастают, что связано с более полной эпюрой остаточных напряжений гладкой детали. Приращение предела выносливости с ростом диаметра уменьшается. Коэффициент ψ_σ в проведённых экспериментах изменяется в широких пределах – от 0,030 до 0,251 (в 8 раз), то есть критерий оценки предела выносливости по остаточным напряжениям $\sigma_z^{нов}$ на поверхности концентратора не может быть использован для прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей различного диаметра.

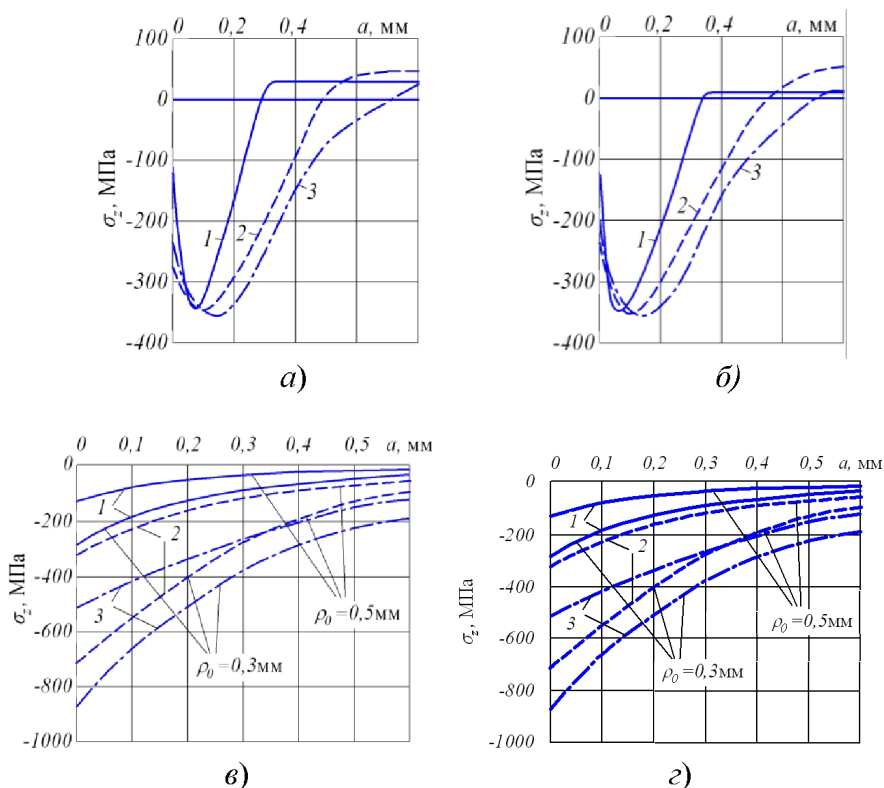


Рисунок 5.12 – Остаточные напряжения в гладких сплошных образцах (а, б) диаметром $D_I = 10$ мм (а), $D_I = 25$ мм (б) и в образцах с надрезом (в, г) диаметром $D_I = 10$ мм (в), $D_I = 25$ мм (г) из стали 20 после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Глубина нераспространяющейся трещины усталости с увеличением диаметра увеличивается; при одинаковой толщине стенки детали $t_{кр}$ растёт с ростом диаметра. На рисунках 5.14 – 5.16 представлены фотографии изломов упрочнённых ПДО и ОР образцов из стали 20 с надрезом $R = 0,5$ мм диаметром $D_I = 10$ мм (рисунок 5.14) и $D_I = 25$ мм с отверстием диаметром $d = 15$ мм (рисунок 5.15), $D_I = 50$ мм с отверстием диаметром

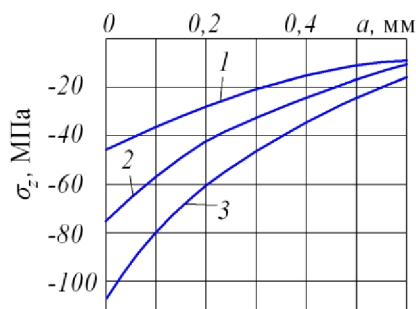


Рисунок 5.13 – Остаточные напряжения в образцах ($D_1/d = 25/15$ мм/мм) из стали 20 с надрезом $\rho_0 = 1,0$ мм после:

1 – ПДО, 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

40 мм (рисунок 5.16). На фотографиях чётко видны нераспространяющиеся трещины усталости 2, причём для образцов с $D_1 = 10$ мм нераспространяющаяся трещина имеет концентрическую форму, так как в этом случае испытания на усталость проводились при чистом изгибе с вращением образцов. Для образцов диаметрами $D_1/d = 25/15$ мм/мм и $D_1/d = 50/40$ мм/мм трещина имеет серповидную форму, так как испытания этих образцов проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

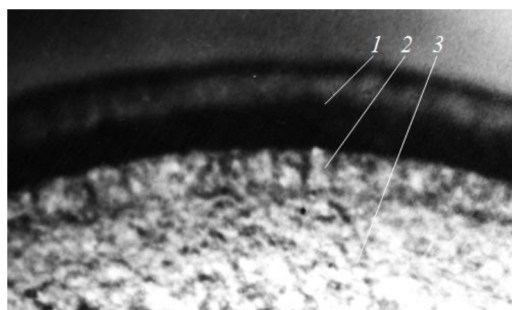


Рисунок 5.14 – Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром $D_1 = 10$ мм с надрезом $\rho_0 = 0,5$ мм из стали 20: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

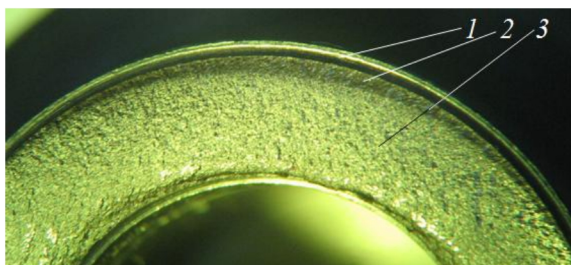


Рисунок 5.15 – Фрагмент излома упрочнённого роликом при $P = 1,0$ кН образца диаметром $D_I = 25$ мм с отверстием диаметром $d = 15$ мм и надрезом $\rho_0 = 0,5$ мм из стали 20:

1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина,
3 – зона долома

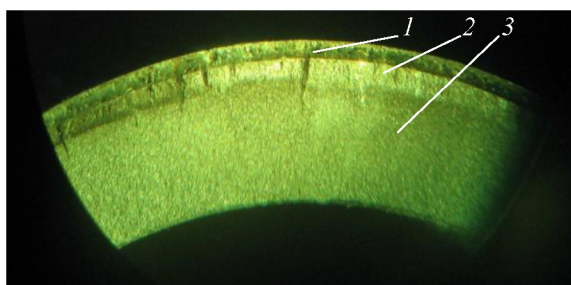


Рисунок 5.16 – Фрагмент излома упрочнённого роликом при $P = 1,0$ кН образца диаметром $D_I = 50$ мм с отверстием диаметром $d = 40$ мм и надрезом $\rho_0 = 0,5$ мм из стали 20: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Оценка приращения предела выносливости по среднеинтегральным остаточным напряжениям и в этом случае даёт хорошие результаты – коэффициент $\overline{\psi}_\sigma$ изменяется в значительно меньших пределах (от 0,331 до 0,390), чем коэффициент ψ_σ , составляя в среднем 0,355, и практически не зависит от размеров

поперечного сечения детали. Из приведённого анализа следует, что для повышения эффекта поверхностного упрочнения деталей с большими поперечными размерами необходимо увеличивать толщину слоя с сжимающими остаточными напряжениями, что обусловлено большими размерами критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

Далее исследовалось влияние остаточных напряжений в условиях концентрации на предел выносливости образцов прямоугольного поперечного сечения (рисунок 5.17). Были изготовлены образцы двух типоразмеров (таблица 5.6) из нормализованной стали 45 ($\sigma_s = 673$ МПа, $\sigma_{0,2} = 392$ МПа, $\delta = 20,3$ %, $\psi = 47,1$ %, $S_k = 1101$ МПа). Половина гладких образцов после изготовления подвергалась гидродробеструйной обработке на режиме, приведённом в таблице 4.1. Затем на гладкие неупрочнённые и упрочнённые образцы профильной фрезой наносились надрезы полукруглого профиля (рисунок 5.17) с радиусом $\rho_0 = 0,3$ мм.

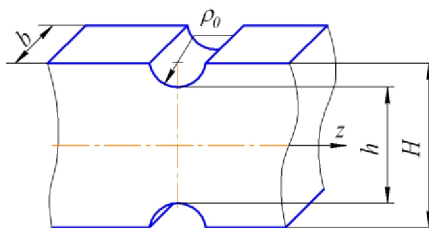


Рисунок 5.17 – Рабочая часть образца прямоугольного поперечного сечения из стали 45 для испытаний на усталость

Таблица 5.6. Варианты размеров образцов прямоугольного поперечного сечения из стали 45

Вариант	H , мм	h , мм	b , мм	ρ_0 , мм
1	10	9,4	30	0,3
2	22	21,4	22	0,3

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись по формулам (2.7), (2.8) на полосках, вырезанных из образцов на электроэрозионном станке. При этом тензорезисторами замерялись деформации полоски, вызванные её отделением от образца. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов представлены на рисунке 5.18, *а*. Дополнительные остаточные напряжения, возникающие в упрочнённых образцах за счёт перераспределения остаточных усилий после нанесения надреза, определялись МКЭ при решении плоской задачи теории упругости. Суммируя дополнительные остаточные напряжения с исходными, находились осевые σ_z остаточные напряжения в образцах с надрезами, эпюры которых приведены на рисунке 5.18, *б*.

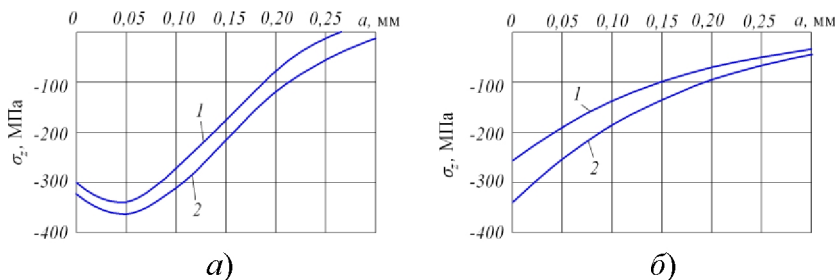


Рисунок 5.18 – Остаточные напряжения в гладких образцах (*а*) прямоугольного поперечного сечения и в образцах с надрезом (*б*) из стали 45 после ГДО; номера эпюр соответствуют номерам вариантов образцов таблицы 5.6

Результаты испытаний образцов прямоугольного поперечного сечения на усталость при изгибе в одной плоскости и определения остаточных напряжений представлены в таблице 5.7, где варианты размеров образцов соответствуют вариантам таблицы 5.6. Из данных таблицы 5.7 видно, что с увеличением размера поперечного сечения в плоскости изгиба предел выносливости уменьшается, причём для упрочнённых образцов

падение предела выносливости значительнее.

Таблица 5.7. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Вариант	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы					
		σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	150	192,5	-256	0,166	0,210	-123	0,345
2	142,5	172,5	-342	0,088	0,480	-81	0,371

Все образцы, выстоявшие базу испытаний без поломки при напряжениях, близких к пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. В упрочнённых образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя критическая глубина $t_{кр}$ которых приведена в таблице 5.7. Следует отметить, что глубина трещины по ширине поперечного сечения изменялась в значительно больших пределах, чем по контуру сечения цилиндрических образцов, однако среднее её значение для каждого образца примерно удовлетворяет зависимости (7.1), если в ней диаметр D заменить на высоту сечения h . В неупрочнённых образцах нераспространяющихся трещин не обнаружено.

Значения остаточных напряжений на поверхности надрезов $\sigma_z^{нов}$ и среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ приведены в таблице 5.7. В этой таблице представлены также коэффициенты ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$. Можно видеть, что и в случае образцов прямоугольного поперечного сечения значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ близки к значению $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленному для поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов с такой же концентрацией напряжений. Коэффициент ψ_σ , характеризующий влияние поверхностного упрочнения через остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ на поверхности концентратора, изменяется в

изученных вариантах размеров образцов в два раза (таблица 5.7), что затрудняет его использование на практике.

5.3. Корсетные и гладкие образцы

Корсетные образцы

Изучалось влияние технологии изготовления корсетных образцов круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм из сплавов ВКС-5, ВНС-17 и ЭП718 (рисунок 2.15) на предел выносливости через величину и распределение остаточных напряжений поверхностного слоя [38]. После механической обработки (шлифование) образцы подвергались термической и химико-термической обработке по режимам, приведённым в таблице 5.8.

После термической и химико-термической обработки шлифованию подвергалась только коническая часть образцов, поэтому в рабочей (корсетной) части остаточное напряжённое состояние оставалось неизменным.

Испытания образцов на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МВП-10000, база испытаний – $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения, температура испытаний – 20°C. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице 5.8. Из данных таблицы 5.8 можно видеть, что цементация, азотирование и борирование образцов приводят к существенному повышению сопротивления усталости. Часть цементированных, азотированных и борированных образцов, испытанных на пределе выносливости при $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения, были доведены до разрушения при статической нагрузке в случае растяжения. Во всех образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина $t_{кр}$ которых составляла 0,160 мм. На рисунке 5.19 в качестве примера представлена фотография усталостного излома цементированного образца из сплава ВКС-5, где чётко просматривается нераспространяющаяся трещина усталости l .

Таблица 5.8. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Вариант	Режимы обработки	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{пов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
ВКС-5	1	исходное состояние: закалка 900°C; отпуск 600°C – 1 час	760	-1950	–	-136	–
	2	ионная цементация 950°C – 1 час; отпуск 650°C – 3 часа	900	-2100	0,933	-389	0,553
	3	цементация 940°C – 6 часов; отпуск 650°C – 3 часа; закалка 900°C; обработка холодом: -70°C	1040	-2200	1,120	-672	0,522
ВКС-17	1	исходное состояние: закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час	640	-1830	–	-372	–
	2	закалка 860°C; отпуск 580°C – 10 час; азотирование 560°C – 36 час	760	-2190	0,333	-606	0,513
ЭП718	1	ложное борирование	340	-580	–	-82	–
	2	борирование	580	-1510	0,258	-593	0,465

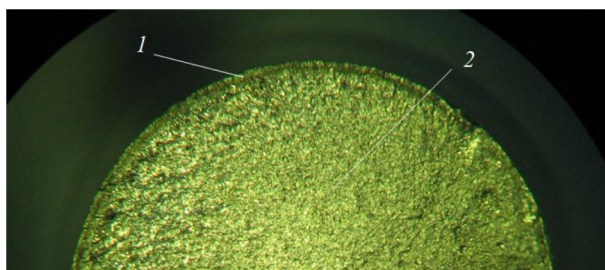


Рисунок 5.19 – Фрагмент излома корсетного образца из сплава ВКС-5: 1 – нераспространяющаяся трещина, 2 – зона долома

Следует обратить внимание на то, что нераспространяющиеся трещины усталости обнаружены в корсетных образцах, то есть в образцах с весьма малой концентрацией напряжений, причём значение критической глубины $t_{кр}$ этих трещин соответствует зависимости (7.1), установленной для поверхностно упрочнённых образцов и деталей с существенной концентрацией напряжений.

Меридиональные σ_φ остаточные напряжения (осевые σ_z – в наименьшем сечении образца) определялись методом удаления половины поверхности образца в пределах его корсетной части по методике, описанной в разделе 2.2. Исследовались остаточные напряжения в образцах как непосредственно после термической обработки, так и после испытаний на усталость. Необходимо отметить, что остаточные напряжения в образцах, прошедших базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, практически не отличались от остаточных напряжений образцов, не подвергавшихся испытаниям на усталость. Следовательно, остаточные напряжения после термической и химико-термической обработок в исследованных образцах весьма устойчивы к воздействию переменных напряжений. Распределение меридиональных σ_φ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a корсетных образцов представлено на рисунке 5.20.

Из данных рисунка 5.20 видно, что при всех видах химико-термической обработки в образцах действуют сжимающие остаточные напряжения с максимумом на поверхности, достигающим -2200 МПа. После цементации и азотирования распределение остаточных напряжений является более полным, чем в исходном состоянии.

На примере образцов из сплава ВКС-5 можно проследить за влиянием полноты эпюры сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости. После ионной цементации и обычной цементации наибольшие остаточные напряжения различаются незначительно: -2100 МПа и -2200 МПа соответственно (рисунок 5.20, a ; эпюры 2 и 3). Однако, после ионной цемен-

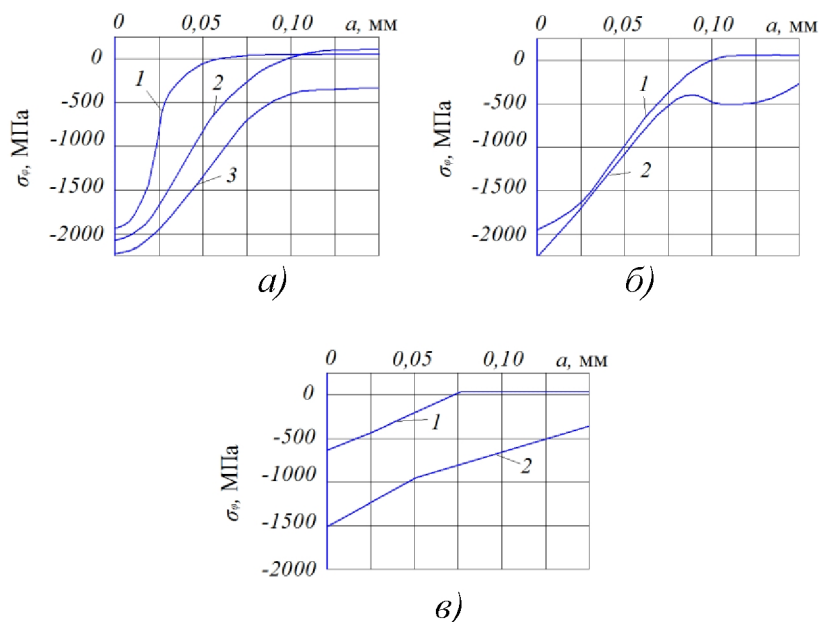


Рисунок 5.20 – Остаточные напряжения в корсетных образцах из сплавов ВКС-5 (а), ВНС-17 (б) и ЭП718 (в); номера эпюр соответствуют номерам вариантов таблицы 5.8

тации распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя является менее полным, чем после обычной цементации – смена знака остаточных напряжений в первом случае (рисунок 5.20, а; эпюра 2) происходит на глубине $\alpha = 0,1$ мм, а во втором (рисунок 5.20, а; эпюра 3) – на глубине $\alpha = 0,23$ мм. В результате приращение предела выносливости образцов по сравнению с исходным состоянием (рисунок 5.20, а; эпюра 1) после ионной цементации в два раза меньше, чем после обычной цементации: $\Delta\sigma_{-1} = 140$ МПа и $\Delta\sigma_{-1} = 280$ МПа соответственно. О влиянии характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя упрочнённых деталей на сопротивление усталости указывалось ранее в работах [42, 62, 64, 65]. Из данных таблицы 5.8 видно, что прогнозиро-

вание предела выносливости по остаточным напряжениям $\sigma_z^{нов}$ на поверхности образцов может привести в рассмотренных случаях к существенной ошибке, так как коэффициент ψ_σ изменяется примерно в четыре раза.

Оценка влияния остаточных напряжений на предел выносливости образцов по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ (таблица 5.8) показала, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ для исследованных образцов в среднем составил 0,513. Это значение незначительно отличается от величины $\bar{\psi}_\sigma = 0,53$, вычисленной по зависимости (7.4), если в ней теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ для корсетных образцов (рисунок 2.15) принять равным 1,06 [50].

Следует отметить, что критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ обычно используется для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) с концентраторами напряжений. В настоящем исследовании для корсетных образцов концентрация напряжений весьма мала ($\alpha_\sigma = 1,06$), однако полученное значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma = 0,513$ соответствует зависимости (7.4), полученной для случаев значительной концентрации напряжений. Этот результат позволяет применять критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с малой концентрацией напряжений, но только в том случае, когда остаточные напряжения не изменяются в процессе испытаний на усталость под действием переменных напряжений.

Гладкие образцы

Исследовалось влияние остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе гладких плоских образцов толщиной 3 мм из сплава ЭИ698ВД, упрочнённых пневмодробеструйной обработкой на различных режимах [17]. В исследовании

определялась также микротвёрдость упрочнённых образцов и её связь с остаточными напряжениями.

Образцы для определения остаточных напряжений и испытаний на усталость (рисунок 5.21) после шлифования подвергались упрочнению стеклянными и стальными шариками при различном давлении воздуха p . Режимы упрочняющей обработки приведены в таблице 5.9.

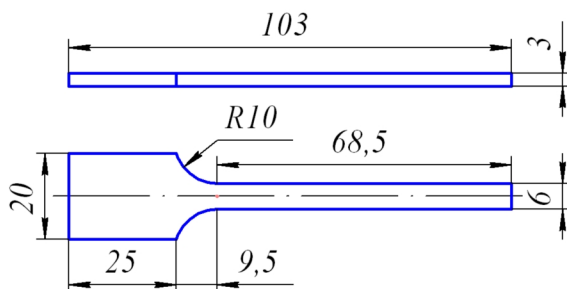


Рисунок 5.21 – Образец для испытаний на усталость

Таблица 5.9. Режимы упрочнения, результаты измерения остаточных напряжений и испытаний на усталость

Вариант	Тип шариков	p , МПа	σ_{-1y} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	стеклянные	0,2	395,2	-620	0,100	-529	0,118
2		0,3	395,2	-640	0,097	-595	0,105
3		0,4	411,5	-610	0,129	-637	0,123
4	стальные	0,15	545,4	-440	0,483	-531	0,400
5		0,3	562,6	-280	0,820	-524	0,438
6		0,45	630,2	-260	1,143	-483	0,616
7		0,6	574,8	-220	1,100	-472	0,513
8	исходное состояние	—	332,9	—	—	—	—

Осевые σ_z остаточные напряжения в образцах по тол-

щине поверхностного слоя a приведены на рисунке 5.22. В образцах после шлифования (исходное состояние – эпюра 8) действовали растягивающие остаточные напряжения с максимумом 180 МПа на глубине 0,04 мм. При упрочнении стеклянными шариками диаметром 0,2 – 0,3 мм с увеличением давления воздуха глубина залегания сжимающих остаточных напряжений увеличивается при практически неизменных максимальных значениях, достигающих -670 МПа.

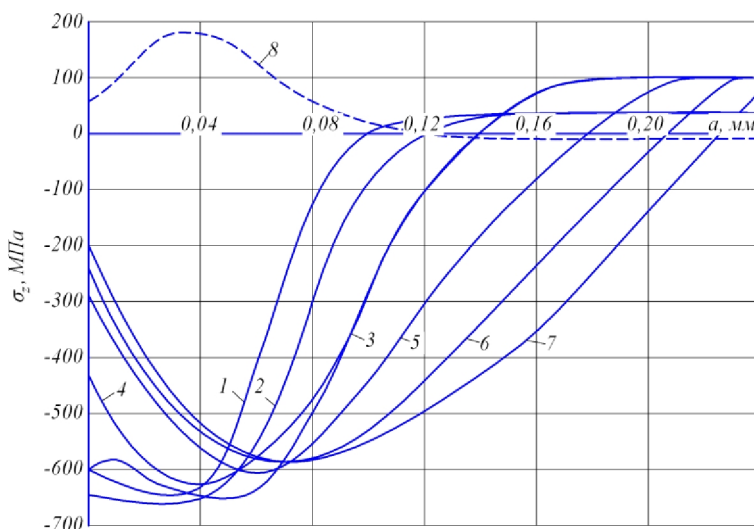


Рисунок 5.22 – Остаточные напряжения в гладких образцах из сплава ЭИ698ВД после упрочнения (1–7) и в исходном состоянии (8); номера эпюр соответствуют номерам вариантов упрочнения таблицы 5.9

При упрочнении стальными шариками диаметром 0,18 – 0,5 мм толщина поверхностного слоя с сжимающими остаточными напряжениями существенно больше, чем при упрочнении стеклянными шариками. С увеличением давления воздуха глубина залегания остаточных напряжений увеличивается при одновременном уменьшении напряжений к поверхности и смещении максимума от поверхности вглубь образца. В таблице 5.9

приведены значения остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности упрочнённых образцов.

Ускоренные испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на вибростенде, база испытаний – $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения условного предела выносливости σ_{-1y} представлены в таблице 5.9. В упрочнённых образцах после испытаний на усталость при напряжениях, равных пределу выносливости, были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина которых составляла $t_{кр} = 0,065$ мм. На рисунке 5.23 приведена фотография излома упрочнённого стальными шариками образца, на которой видна нераспространяющаяся усталостная трещина 1.

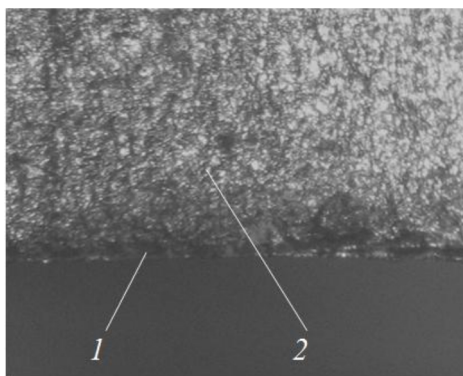


Рисунок 5.23 – Фрагмент излома плоского упрочнённого стальными шариками образца из сплава ЭИ698ВД:

1 – нераспространяющаяся трещина, 2 – зона долома

По формуле (3.7) были вычислены среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ по толщине поверхностного слоя образца, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Значения $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в таблице 5.9. Здесь же приведены значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ влияния по-

верхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

Из данных, приведённых в таблице 5.9 и на рисунке 5.22, видно, что несмотря на существенный спад к поверхности сжимающих остаточных напряжений, упрочнение образцов стальными шариками приводит к большему увеличению предела выносливости по сравнению с упрочнением стеклянными шариками. При этом наиболее эффективным из исследованных вариантов упрочнения является вариант №6.

При упрочнении стальными шариками коэффициент влияния остаточных напряжений $\bar{\psi}_{\sigma}$ составляет в среднем 0,492 и практически совпадает с значением $\bar{\psi}_{\sigma}$, вычисленным по формулам (7.4) для случая гладкой детали, то есть без концентратора напряжений. Приняв для гладкой детали теоретический α_{σ} и эффективный K_{σ} коэффициенты концентрации напряжений равными единице, получим среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,490$. Такое совпадение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ объясняется устойчивостью остаточных напряжений под действием переменных нагрузок в образцах, упрочнённых стальными шариками [12]. Коэффициент ψ_{σ} , учитывающий влияние остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности образцов, изменяется в значительно больших пределах, чем коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$.

При упрочнении стеклянными шариками коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ составляет в среднем 0,115, что в четыре раза меньше, чем при упрочнении стальными шариками. Значительно меньшее значение $\bar{\psi}_{\sigma}$ объясняется снижением сжимающих остаточных напряжений в упрочнённых стеклянными шариками образцах под действием переменных напряжений при испытаниях на усталость, что было показано в работе [54]. Кроме того, из данных таблицы 5.9 и рисунка 5.22 видно, что на предел выносливости образцов (деталей) основное влияние оказывает не величина сжимающих остаточных напряжений на поверхности, а

полнота распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, о чём говорилось в разделе 3.

На образцах для определения остаточных напряжений была измерена микротвёрдость $H_{\mu}^{нов}$ упрочнённой поверхности, а также микротвёрдость $H_{\mu}^{подсл}$ образцов после удаления стравленного слоя $a_{стр}$. В таблице 5.10 представлены средние значения микротвёрдости по двенадцати отпечаткам в каждом случае. Из данных таблицы 5.10 следует, что толщина стравленного слоя $a_{стр}$ при определении остаточных напряжений во всех случаях превышает глубину смены знака остаточных напряжений $a_{ОН}$. В связи с этим можно считать, что микротвёрдость $H_{\mu}^{подсл}$ – это микротвёрдость ненаклёпанного материала, составляющая в среднем 5505 МПа.

Таблица 5.10. Результаты измерения микротвёрдости

Вариант	Тип шариков	p , МПа	$H_{\mu}^{нов}$, МПа	$a_{стр}$, мм	$H_{\mu}^{подсл}$, МПа	$a_{ОН}$, мм
1	стеклянные	0,2	6020	0,118	5459	0,100
2		0,3	6038	0,127	5506	0,120
3		0,4	5918	0,169	5375	0,140
4	стальные	0,15	5813	0,178	5615	0,150
5		0,3	5802	0,189	5414	0,180
6		0,45	5768	0,225	5542	0,215
7		0,6	5674	0,234	5578	0,230
8	исходное состояние	–	5743	0,118	5550	–

Следует обратить внимание на то, что микротвёрдость $H_{\mu}^{нов}$ упрочнённой стеклянными шариками поверхности выше по сравнению с микротвёрдостью поверхности, упрочнённой стальными шариками. Из данных таблиц 5.9 и 5.10 видно, что величина микротвёрдости $H_{\mu}^{нов}$ следует за значениями остаточ-

ных напряжений на поверхности – чем выше сжимающие остаточные напряжения на поверхности, тем выше микротвёрдость. Из анализа данных таблиц 5.9 и 5.10 также видно, что микротвёрдость поверхности после обработки стеклянными шариками выше, чем после обработки стальными шариками, а предел выносливости, наоборот, выше после обработки стальными, чем стеклянными шариками. Поэтому микротвёрдость упрочнённой поверхности, в отличие от остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, не может служить объективным критерием оценки влияния упрочнения на предел выносливости детали.

Проведённое исследование на гладких и корсетных образцах показало, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ можно использовать и для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых гладких деталей, но лишь в том случае, когда сжимающие остаточные напряжения не изменяются под действием переменных нагрузок.

Таким образом, описанные в разделе 5 эксперименты показали, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с различными размерами поперечного сечения и различными концентраторами следует использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленный по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

6. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ

Изучалось влияние типа деформации (изгиб, кручение, растяжение-сжатие), асимметрии цикла напряжений и рабочих температур на остаточные напряжения и предел выносливости упрочнённых деталей и образцов.

6.1. Тип деформации

В разделах 4 и 5 было изучено влияние остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе упрочнённых деталей и образцов с концентраторами в зависимости от различных технологических и конструктивных факторов. Характерной деформацией для большой группы авиационных деталей (валы, торсионы, рессоры) является переменное кручение, поэтому представляет интерес исследование влияния остаточных напряжений на предел выносливости при кручении в условиях концентрации напряжений.

Были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 12 мм из сталей 30ХГСА, ЭИ961, 40 и алюминиевого сплава В95 [15, 45]. Механические характеристики материалов представлены в таблице 6.1. Половина образцов подвергалась обработке на гидродробеструйной установке по режимам, приведённым в таблице 6.2. С целью изучения влияния на предел выносливости величины и характера распределения остаточных напряжений образцы из 30ХГСА упрочнялись на двух режимах.

На неупрочнённые и упрочнённые образцы из сталей ЭИ961, 40 и сплава В95 безнаклёпным способом наносились надрезы полукруглого профиля с $\rho_0 = 0,3$ мм, на образцы из стали 30ХГСА – с $\rho_0 = 0,35$ мм и 0,5 мм. Образцы из стали 40 исследовались также с одиночными и групповыми надрезами прямоугольного профиля, размеры которых показаны на рисун-

ке 6.1 и рисунке 6.2 ($t = b = 0,5$ мм, $\rho_0 = 0,1$ мм, $P = 3$ мм, $D_I = 12$ мм).

Таблица 6.1. Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	σ_v , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
30ХГСА	796	534	17,4	67,3	1520
ЭИ961	913	769	16,9	65,1	1720
сталь 40	580	322	30,8	52,1	988
В95	649	593	8,8	16,4	792

Таблица 6.2. Режимы гидродробеструйной обработки

Материал	Давление масла p , МПа	Время обработки τ , мин	Диаметр шариков $d_{ш}$, мм
30ХГСА	0,19	8	2
30ХГСА	0,30	8	2
ЭИ961	0,29	8	2
сталь 40	0,25	8	2
В95	0,19	8	2

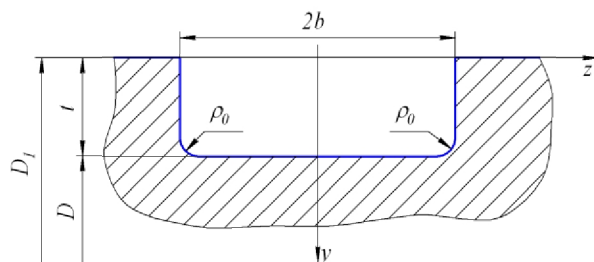


Рисунок 6.1 – Одиночный надрез прямоугольного профиля

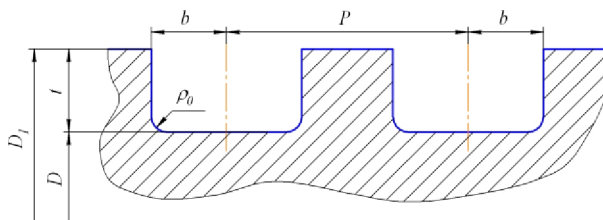


Рисунок 6.2 – Групповой надрез прямоугольного профиля

Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений для гладких образцов и образцов с надрезами полукруглого профиля приведены на рисунке 6.3, кроме образцов из стали 30ХГСА с $\rho_0 = 0,5$ мм.

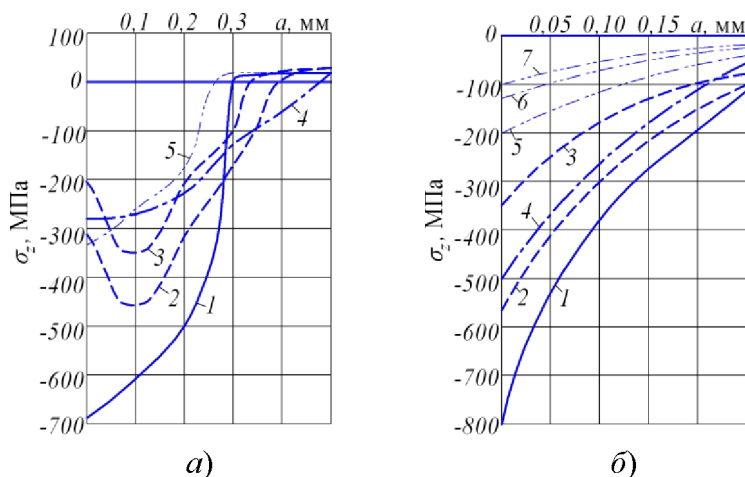


Рисунок 6.3 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) после ГДО: 1 – ЭИ961; 2 – 30ХГСА ($p = 0,30$ МПа); 3 – 30ХГСА ($p = 0,19$ МПа); 4 – В95; 5 – сталь 40, полукруглый надрез; 6 – сталь 40, групповой надрез; 7 – сталь 40, одиночный надрез

Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений в поперечном

сечении образцов с надрезом прямоугольного профиля у радиусного перехода, где наблюдалась нераспространяющаяся трещина усталости, приведены на рисунке 6.3, б. Из данных рисунка 6.3, а видно, что материал на дне надрезов образцов из сталей ЭИ961, 30ХГСА ($\rho_0 = 0,5$ мм), 40 находился в ненаклёпанном состоянии, а из стали 30ХГСА ($\rho_0 = 0,35$ мм) и сплава В95 – в наклёпанном.

Результаты испытаний на усталость при кручении в случае симметричного цикла, остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ на поверхности надреза, среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, значения коэффициентов ψ_τ и $\bar{\psi}_\tau$ приведены в таблице 6.3.

Необходимо отметить, что в случае кручения нераспространяющиеся усталостные трещины видны менее отчётливо, чем при изгибе (рисунок 6.4). Они прерывисты, их размеры имеют значительные отклонения от средней глубины $t_{кр}$ при обходе по контуру излома, однако среднее значение $t_{кр}$ соответствует зависимости (7.1).

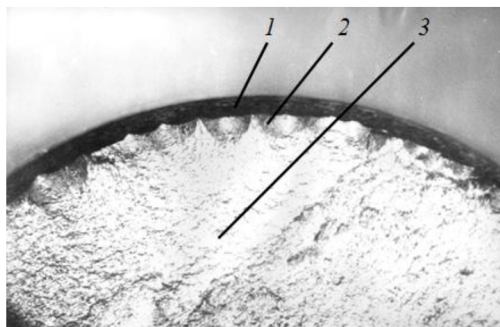


Рисунок 6.4 – Фрагмент излома упрочнённого ГДО образца из стали 30ХГСА с надрезом $\rho_0 = 0,35$ мм после испытаний на усталость при кручении: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Таблица 6.3. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Размеры образцов и концентраторов				Неупрочнённые образцы		Упрочнённые образцы						
	D_1 , мм	D , мм	тип надреза	ρ_0 , мм	τ_{-1} , МПа	$S_{\tau_{-1}}$, МПа	τ_{-1} , МПа	$S_{\tau_{-1}}$, МПа	$\sigma_z^{пов}$, МПа	ψ_τ	$l_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\tau$
30ХГСА	12	11,3	полукр.	0,35	180,7	4,07	207,1	1,84	-358	0,074	0,240	-146	0,181
							222,5	1,72	-584	0,072	0,235	-233	0,179
	12	11,0	полукр.	0,50	185,3	3,71	201,1	1,64	-222	0,071	0,235	-92	0,172
							211,4	1,59	-361	0,072	0,220	-149	0,175
ЭИ961	12	11,4	полукр.	0,30	244	4,20	300	1,57	-790	0,070	0,240	-293	0,191
В95	12	11,4	полукр.	0,30	37,5	2,84	72,5	2,02	-510	0,069	0,250	-193	0,180
сталь 40	12	11,4	полукр.	0,30	150	4,53	166	1,37	-210	0,080	0,250	-94	0,170
	12	11,0	прямоуг. одиноч.	0,10	150,8	3,83	157,8	2,08	-103	0,068	0,245	-38	0,187
	12	11,0	прямоуг. группов.	0,10	150,4	4,53	160	2,14	-132	0,073	0,230	-49	0,195

Из данных таблицы 6.3 видно, что для всех рассмотренных типов концентраторов и материалов коэффициент $\overline{\psi}_\tau$ различается незначительно и составляет в среднем 0,181, что в два раза ниже значения аналогичного коэффициента при изгибе. Также как и при изгибе, коэффициент $\overline{\psi}_\tau$ не зависит от степени неравномерного наклёпа на дне концентратора. При изменении остаточных напряжений на поверхности надреза образцов из стали 30ХГСА от -222МПа до -584МПа коэффициент $\overline{\psi}_\tau$ также не изменяется. Следовательно, выводы о закономерностях влияния сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе справедливы и для кручения с той лишь разницей, что коэффициент $\overline{\psi}_\tau$ в два раза меньше, чем коэффициент $\overline{\psi}_\sigma$.

Далее было рассмотрено влияние остаточных напряжений на предел выносливости при растяжении-сжатии в случае симметричного цикла напряжений. Опыты проводились на образцах диаметром 10 мм из нормализованной стали 45, сталей 30ХГСА, ЭИ961 и сплава Д16Т, механические характеристики которых содержатся в табл. 6.4. Половина образцов после изготовления подвергалась гидродробеструйной обработке с режимами, приведёнными в таблице 4.1.

Таблица 6.4. Механические характеристики исследуемых материалов

Материал	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
сталь 45	610	396	24,2	51,8	1010
30ХГСА	788	536	18,9	65,9	1484
ЭИ961	1090	990	11,3	67,4	2050
Д16Т	547	426	14,8	16,5	647

На неупрочнённые и упрочнённые образцы безнаклёпным способом наносились надрезы полукруглого профиля с ра-

диусом $\rho_0 = 0,3$ мм. Распределение остаточных осевых σ_z напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких и надрезанных образцов представлено на рисунке 6.5.

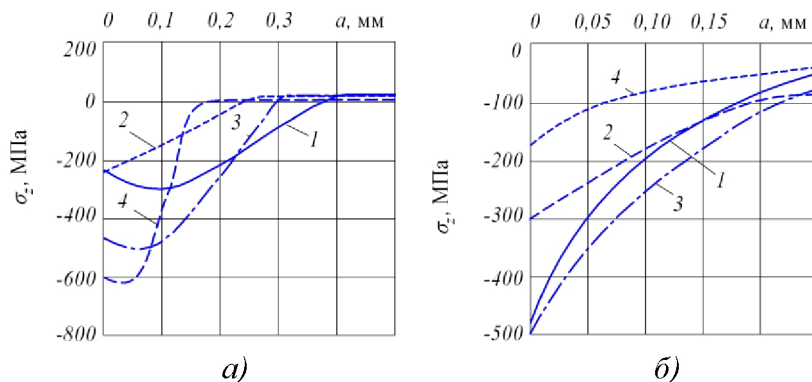


Рисунок 6.5 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) после гидродробеструйной обработки: 1 – сталь 45; 2 – 30ХГСА; 3 – ЭИ961; 4 – Д16Т

Пределы выносливости образцов с надрезом σ_{-1p} и значения σ_z^{nov} , $\bar{\sigma}_{ост}$, $t_{кр}$, ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ приведены в таблице 6.5. Можно видеть, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при растяжении-сжатии в случае симметричного цикла по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ для образцов с одинаковой степенью концентрации напряжений приводит к таким же результатам, как и при изгибе – коэффициент $\bar{\psi}_\sigma = 0,355$ практически равен аналогичному коэффициенту. Необходимо обратить внимание и на то, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости практически не отличается от $t_{кр}$ при изгибе аналогичных по поперечным размерам образцов.

Таблица 6.5. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Неупрочн. образцы	Упрочнённые образцы					
	σ_{-1p} , МПа	σ_{-1p} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
сталь 45	152,5	200	-478	0,099	0,206	-134	0,355
30ХГСА	146	198	-300	0,173	0,200	-144	0,361
ЭИ961	151,3	233,4	-500	0,164	0,160	-258	0,357
Д16Т	78,4	105	-160	0,166	0,200	-75,3	0,353

6.2. Асимметрия цикла напряжений

Большая группа деталей машин испытывает асимметричный цикл напряжений. Например, тяги, резьбовые детали работают при переменных нагрузках со средними растягивающими напряжениями. Поэтому представляет определённый интерес исследовать совместное влияние остаточных и средних напряжений на предельную амплитуду цикла и установить возможность использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ применительно к такому нагружению.

Испытания на усталость при растяжении-сжатии с средним напряжением цикла σ_m проводились на таких же упрочнённых и неупрочнённых образцах из стали 45, как и при симметричном цикле. Результаты испытаний на усталость, измерения $t_{кр}$, вычисления ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ представлены в таблице 6.6.

Можно видеть, что с увеличением среднего напряжения предельная амплитуда цикла σ_{Ra} упрочнённых образцов уменьшается. Уменьшается σ_{Ra} и для неупрочнённых образцов, но менее интенсивно. Следует отметить также, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ не зави-

сит от среднего напряжения и равна в среднем 0,206 мм.

Таблица 6.6. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

σ_m , МПа	Неупрочн. образцы σ_{Ra} , МПа	Упрочнённые образцы					
		σ_{Ra} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
0	152,5	200	-478	0,099	0,206	-134	0,355
50	137,5	-	-	-	-	-	-
100	135	180	-478	0,094	0,205	-134	0,336
200	132,5	155	-478	0,047	0,207	-134	0,167

С увеличением среднего напряжения коэффициенты ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ уменьшаются. Возникает вопрос – как же в этом случае проводить оценку приращения предельной амплитуды с помощью критерия среднеинтегральных остаточных напряжений? Для этого предлагается использовать диаграмму Ганна [55, 69, 74, 76] предельных амплитуд цикла напряжений $\sigma_a = \sigma_a(\sigma_m)$ (рисунок 6.6).

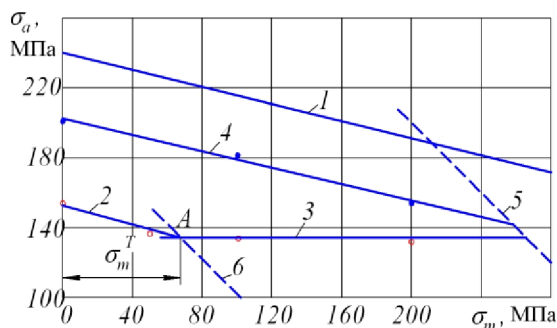


Рисунок 6.6 – Диаграммы предельных амплитуд цикла:

1 – материала; 2, 3 – неупрочнённой детали;

4 – упрочнённой детали; 5, 6 – по текучности

Построим диаграмму для нашего случая, вначале для материала. Предел выносливости исследованной стали 45, механи-

ческие характеристики которой приведены в таблице 6.4, при растяжении-сжатии в случае симметричного цикла (σ_{-1p}) составляет 240 МПа, который откладывается по оси σ_a . По оси σ_m откладывается не предел прочности σ_s , как это обычно принято, а сопротивление разрыву $S_k = 1010$ МПа, что обосновано в работе [67]. Далее проводится схематизированная по линейному закону диаграмма предельных амплитуд цикла для материала (прямая 1). Справа диаграмма ограничивается условием текучести материала (прямая 5).

Затем строится диаграмма (ломаная прямая 2, 3) для неупрочнённой детали с концентратором напряжений [69]. Левая часть (прямая 2) этой диаграммы проводится параллельно диаграмме 1 материала при уменьшении амплитуды в K_σ раз, где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений.

В нашем случае $K_\sigma = 1,55$, тогда $\sigma_{-1p}^{det} = 154$ МПа. Точка A возникновения пластических деформаций в концентраторе находится на пересечении прямых 2 и 6. Здесь штриховая прямая 6 ограничивает текучесть детали. Далее предполагается, что среднее напряжение в надрезе с ростом статической нагрузки из-за течения материала детали не увеличивается, поэтому правая часть (прямая 3) диаграммы предельных амплитуд цикла проводится параллельно оси σ_m .

Для построения диаграммы предельных амплитуд цикла упрочнённой детали (прямая 4) по формуле (3.6) вычисляется предел выносливости детали с остаточными напряжениями. Приняв $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ и $\bar{\sigma}_{ocm} = -134$ МПа (таблица 6.6), получим $\sigma_{-1p}^{det} = 202$ МПа. Эта величина откладывается по оси σ_a и проводится прямая 4, параллельная диаграмме материала – это и будет диаграмма предельных амплитуд цикла для упрочнённой детали с концентратором. На рисунке 6.6 точками показаны экспериментальные данные. Можно видеть, что эксперимент достаточно хорошо согласуется с принятой диаграммой предельных

амплитуд цикла, поэтому предложенный подход может быть использован в практических расчётах.

Из геометрических соображений можно получить формулу для коэффициента влияния поверхностного упрочнения $\bar{\psi}_\sigma^{(m)}$ по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ при среднем напряжении цикла σ_m

$$\bar{\psi}_\sigma^{(m)} = \bar{\psi}_\sigma - \frac{\sigma_{-1p}(\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k \bar{\sigma}_{ост}}, \quad (6.1)$$

где σ_m^T – среднее напряжение (рисунок 6.6), при котором в концентраторе без остаточных напряжений появляются первые пластические деформации. Формула (6.1) справедлива при $\sigma_m > \sigma_m^T$, если же $\sigma_m \leq \sigma_m^T$, то коэффициент $\bar{\psi}_\sigma^{(m)} = \bar{\psi}_\sigma$. Значение сопротивления разрыву S_k можно вычислить по формуле [6]

$$S_k = \sigma_\epsilon (1 + 1,35\psi), \quad (6.2)$$

где σ_ϵ – предел прочности материала, ψ – относительное остаточное сужение после разрушения (в долях).

Таким образом, зная предел выносливости материала, сопротивление разрыву, эффективный коэффициент концентрации напряжений, среднеинтегральные остаточные напряжения и коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, можно построить диаграмму предельных амплитуд цикла упрочнённой детали описанным выше способом. Для определения приращения предела выносливости при любом среднем напряжении можно воспользоваться формулой (3.8), в которой $\bar{\psi}_\sigma^{(m)}$ определяется по зависимости (6.1).

6.3. Рабочая температура

Вначале рассматривалось влияние рабочей температуры на остаточные напряжения и предел выносливости в случае изгиба при симметричном цикле. Опыты проводились на образцах

диаметром 7,5 мм из стали ЭИ961, механические характеристики которой представлены в таблице 4.2. Часть образцов после изготовления подвергалась алмазному выглаживанию (таблица 4.1), а затем на все образцы наносились надрезы полукруглого профиля $\rho_0 = 0,3$ мм. Эпюры остаточных осевых σ_z напряжений в гладких и надрезанных образцах приведены на рисунке 6.7. На этом же рисунке показаны остаточные напряжения в образцах после их выдержки в печи при температуре 400°C в течение 100 часов. Видно, что после термоэкспозиции остаточные напряжения уменьшились примерно на 30%.

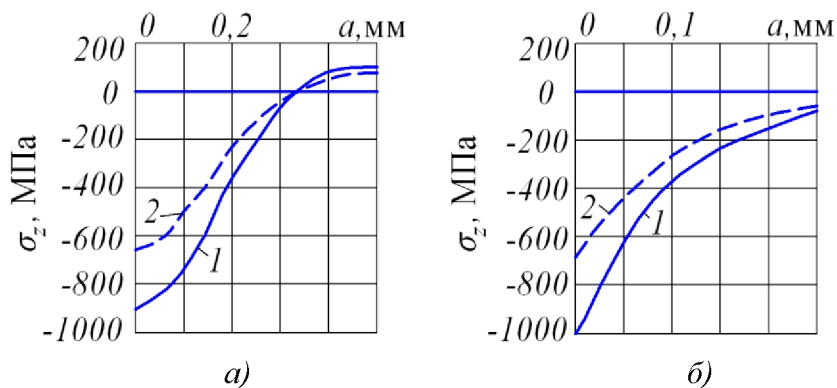


Рисунок 6.7 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из стали ЭИ961 после алмазного выглаживания: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T = 400^\circ\text{C}$

Результаты испытаний на усталость при изгибе, остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ и $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в таблице 6.7. Можно видеть, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, учитывающий влияние поверхностного упрочнения через критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, для стали ЭИ961 и при температуре 400°C достаточно близок к значению $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$. Поэтому формулу (3.8) можно использовать для приближённых вычислений приращения предела выносливости упрочнённых деталей при

рабочих температурах, заложив в неё оставшиеся после воздействия температуры остаточные напряжения.

Таблица 6.7. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Температура, град. С	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы					
		σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
20	230	380	-1010	0,150	0,160	-422	0,356
400	190	270	-630	0,127	0,160	-242	0,331

Были проведены также эксперименты на цилиндрических образцах из алюминиевых сплавов В95 и Д16Т [52], механические характеристики которых приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8. Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	σ_σ , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ_σ , %	S_k , МПа
В95	679	645	6,0	17,3	755
Д16Т	618	451	11,9	13,3	684

Гладкие образцы диаметром $D_1 = 15$ мм с отверстием $d = 5$ мм (рисунок 5.4) упрочнялись на пневмодробеструйной установке по режимам таблицы 4.1. Половина неупрочнённых и упрочнённых образцов подвергалась термоэкспозиции при температуре $T = 125^\circ\text{C}$ в течение 100 часов. Затем на все гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля двух радиусов $\rho_0 = 0,3$ мм и $\rho_0 = 0,5$ мм. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений в гладких образцах и в образцах с надрезом после ПДО представлены на рисунке 6.8, после ПДО и термоэкспозиции – на рисунке 6.9.

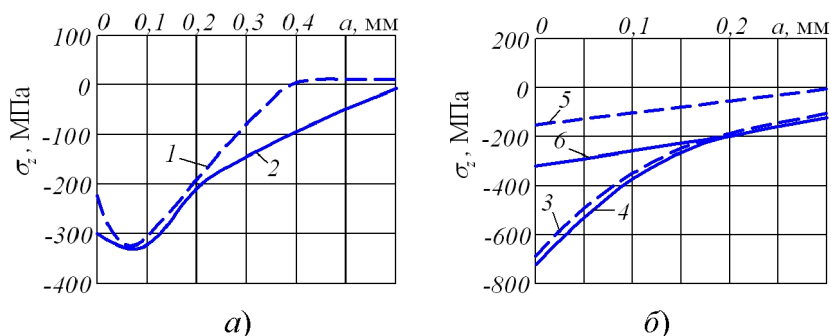


Рисунок 6.8 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из сплавов В95 (1, 3, 5) и Д16Т (2, 4, 6) после ПДО: 3, 4 – $\rho_0 = 0,3$ мм; 5, 6 – $\rho_0 = 0,5$ мм

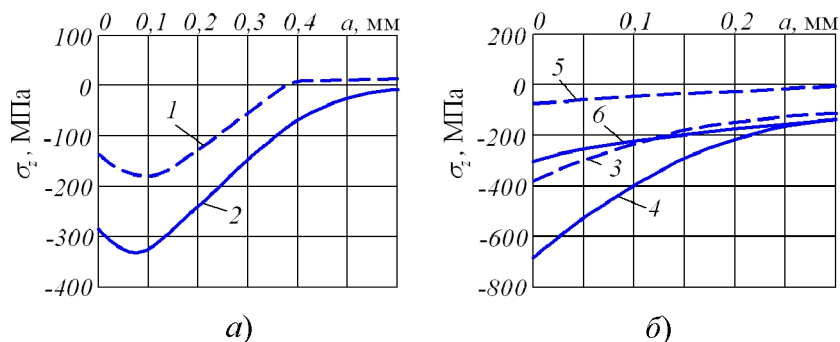


Рисунок 6.9 – Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из сплавов В95 (1, 3, 5) и Д16Т (2, 4, 6) после ПДО и термоэкспозиции: 3, 4 – $\rho_0 = 0,3$ мм; 5, 6 – $\rho_0 = 0,5$ мм

Результаты испытаний образцов с надрезом на усталость при чистом изгибе в случае симметричного цикла и определения остаточных напряжений после ПДО представлены в таблице 6.9, после ПДО и термоэкспозиции – в таблице 6.10. На рисунке 6.10 приведена фотография излома упрочнённого образца из сплава

В95, на которой видна нераспространяющаяся трещина усталости 2.

Таблица 6.9. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений после ПДО

Материал	ρ_0 , мм	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы					
			σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
В95	0,3	105	200	-686	0,138	0,310	-249	0,382
	0,5	107,5	132,5	-151	0,166	0,320	-72	0,347
Д16Т	0,3	82,5	182,5	-720	0,139	0,300	-261	0,383
	0,5	82,5	157,5	-322	0,233	0,320	-197	0,381

Таблица 6.10. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений после ПДО и термоэкспозиции

Материал	ρ_0 , мм	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы					
			σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
В95	0,3	105	155	-361	0,139	0,310	-141	0,355
	0,5	107,5	115	-67	0,112	0,320	-21	0,352
Д16Т	0,3	82,5	175	-652	0,142	0,320	-250	0,370
	0,5	82,5	150	-275	0,245	0,310	-171	0,395

Из приведённых в таблицах 6.9 и 6.10 данных следует, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ составляет в среднем для образцов после ПДО значение 0,373, а для образцов после ПДО и термоэкспозиции – 0,368. Следовательно, коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, учитывающий влияние упрочнения через критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, для образцов из сплавов В95, Д16Т и при температуре – $T = 125^\circ\text{C}$ достаточно близок к значению $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, полученному выше для образцов и деталей при такой же степени концентрации напряжений. Коэффициент ψ_σ , учитывающий влияние остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхно-

сти концентратора (таблица 6.10), изменяется более чем в 2 раза, поэтому использование критерия $\sigma_z^{нов}$ для оценки влияния упрочнения на предел выносливости и в этом случае приведёт к существенной погрешности.

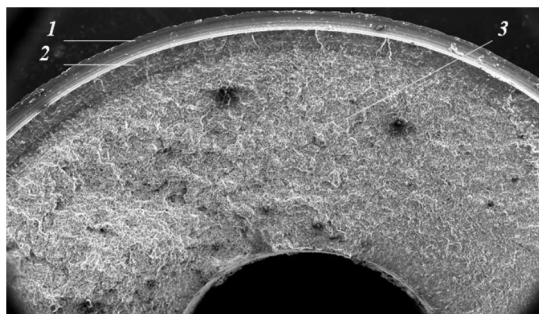


Рисунок 6.10 – Фрагмент излома упрочнённого ПДО образца из сплава В95 с $\rho_0 = 0,3$ мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Изучалось также влияние азотирования корсетных образцов (рисунок 2.15) из сплава ВНС-17 на предел выносливости при температуре 500°C . После шлифования образцы подвергались термической и химико-термической обработке по режимам, приведённым в таблице 6.11. Испытания образцов на усталость при чистом изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МВП-10000, база испытаний – $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице 6.11.

Меридиональные σ_φ (осевые σ_z – в наименьшем сечении образца) остаточные напряжения определялись методом удаления половины поверхности образца в пределах его корсетной части по методике, описанной в разделе 2.2. Остаточные напряжения определялись в образцах, прошедших базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости. Эпюры

меридиональных σ_φ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a представлены на рисунке 6.11.

Таблица 6.11. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов из сплава ВНС-17

Вариант	Режимы обработки	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	закалка 860°C;	360	-1170	–	-116	–
	отпуск 580°C – 10 час;					
	азотирование 580°C – 30 час;					
	азотирование 630°C – 20 час					
2	закалка 860°C;	400	-1950	0,051	-190	0,541
	отпуск 580°C – 10 час;					
	азотирование 630°C – 20 час;					
	отпуск 600°C – 2 час					

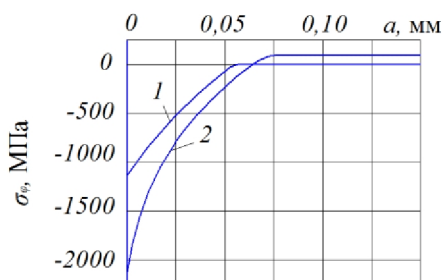


Рисунок 6.11 – остаточные напряжения в образцах из сплава ВНС-17; номера эпюр соответствуют номерам вариантов таблицы 6.11

Значения остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$, критерия $\bar{\sigma}_{ост}$,

коэффициентов ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ приведены в таблице 6.11. Величина коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ составляет 0,541 и незначительно отличается от значения $\bar{\psi}_\sigma = 0,53$, вычисленного по зависимости (7.4) при теоретическом коэффициенте концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 1,06$ для исследованных корсетных образцов [50].

Коэффициент $\psi_\sigma = 0,051$ в 22 раза меньше соответствующего коэффициента для таких же корсетных образцов, испытанных на усталость при нормальной температуре (таблица 5.8). Это обстоятельство, как и в предыдущих экспериментах, указывает на неправомерность использования остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Далее приведены результаты экспериментов на образцах прямоугольного поперечного сечения из сплавов ЭИ698ВД и ЖС6У с V-образными надрезами (рисунок 6.12) двух радиусов – $\rho_0 = 0,5$ и $1,0$ мм, имитирующих ёлочный замок лопатки ГТД.

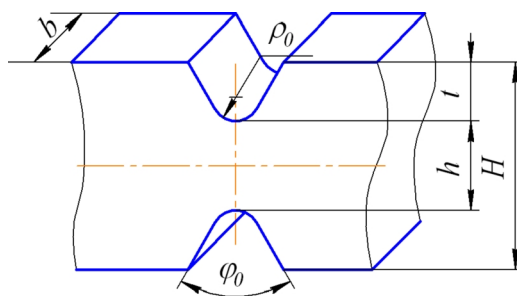


Рисунок 6.12 – Рабочая часть образца, имитирующего ёлочный замок лопатки ГТД

Размеры образцов представлены в таблице 6.12, а механические характеристики материалов при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ и 700°C – в таблице 6.13.

Таблица 6.12. Геометрические параметры образцов

Вариант	H , мм	h , мм	b , мм	t , мм	ρ_0 , мм	φ_0 , град
1	4,74-5,74	2,0-3,0	10	1,37	0,5	55,5
2	6,10-7,10	2,0-3,0	10	2,05	1,0	55,5

Таблица 6.13. Механические характеристики материалов

Материал	T , °C	Механические характеристики				
		σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ_σ , %	S_k , МПа
ЭИ698ВД	20	1120	700	25	28	1540
	700	920	640	19	21	1180
ЖС6У	20	1030	940	4	6	1110
	700	960	870	2	3	1000

Надрезы на образцы наносились вначале фрезерованием, а затем доводились до нужных размеров профильным шлифовальным кругом. Половина образцов после шлифования подвергалась ультразвуковому упрочнению (УЗУ) по вариантам режимов, приведённых в таблице 6.14, где $d_{ш}$ – диаметр шариков, τ – время упрочнения.

Таблица 6.14. Режимы ультразвукового упрочнения

Материал	ρ_0 , мм	Вариант упрочнения	Режимы УЗУ	
			$d_{ш}$, мм	τ , с
ЭИ698ВД	0,5	1	1,0	60
		2	0,68	40
	1,0	3	1,3	60
		4	1,0	60
ЖС6У	0,5	5	0,68	80
	1,0	6	0,68	60
		7	0,68	30

Для определения меридиональных σ_φ остаточных напряжений по методике раздела 2.2 использовались образцы с пятью идентичными надрезами, отстоящими друг от друга на расстоянии 12 мм, а для испытаний на усталость – с одним надрезом. Исследовались остаточные напряжения как непосредственно после УЗУ, так и после термоэкспозиции при температуре $T = 700^\circ\text{C}$ в течение 1000 часов. Эпюры меридиональных σ_φ остаточных напряжений приведены на рисунках 6.13 - 6.15.

После шлифования на поверхности дна надрезов возникают сжимающие остаточные напряжения до -360 МПа , переходящие на глубине $0,015 - 0,04\text{ мм}$ в растягивающие. Термоэкспозиция не привела к существенному изменению характера распределения остаточных напряжений после шлифования, но в образцах из сплава ЭИ698ВД с $\rho_0 = 0,5\text{ мм}$ (рисунок 6.13, а) растягивающие напряжения появились и на поверхности надреза.

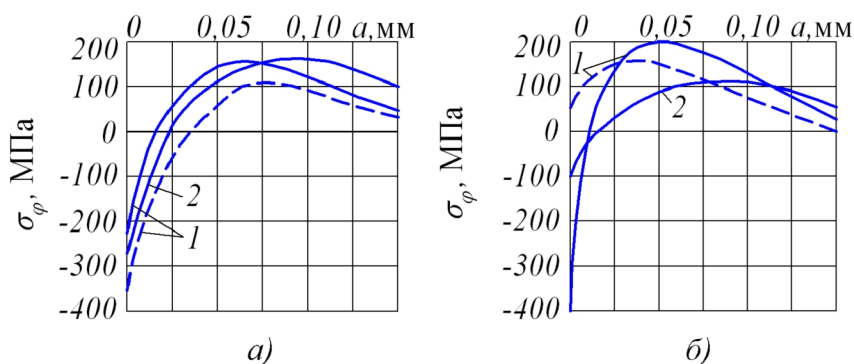


Рисунок 6.13 – Остаточные напряжения в образцах с надрезом после шлифования (а) и последующей термоэкспозиции (б): 1 – ЭИ698ВД; 2 – ЖС6У: — $\rho_0 = 1,0\text{ мм}$; --- $\rho_0 = 0,5\text{ мм}$

Ультразвуковое упрочнение образцов привело к созданию в области впадин надрезов значительных сжимающих оста-

точных напряжений с глубиной залегания 150 - 200 мкм, достигающих у поверхности концентратора -1200 МПа для сплава ЭИ698ВД (рисунок 6.14, *а*) и -1300 МПа для сплава ЖС6У (рисунок 6.15, *а*). В образцах с $\rho_0 = 0,5$ мм напряжения несколько выше, а глубина смены знака меньше, чем при $\rho_0 = 1,0$ мм, что совпадает с результатами расчётов по первоначальным деформациям [46, 48]. Одновременное увеличение диаметра упрочняющих шариков с 0,68 до 1,0 мм и времени обработки с 40 до 60 с не изменяет максимальных значений остаточных напряжений в образцах из сплава ЭИ698ВД (рисунок 6.14), но приводит к созданию более полной эпюры.

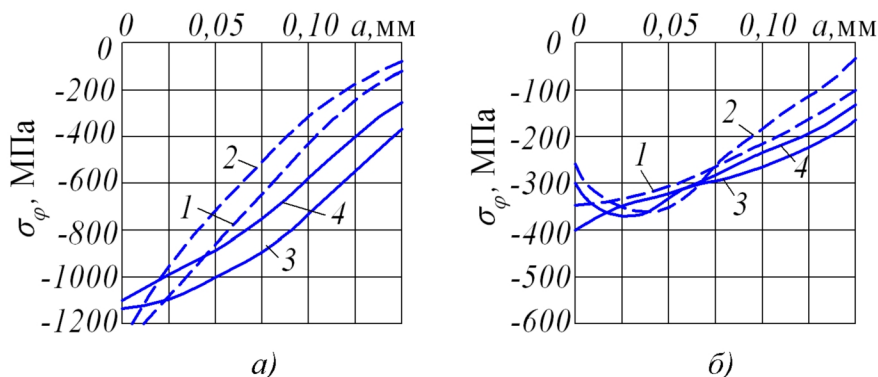


Рисунок 6.14 – Остаточные напряжения в образцах из сплава ЭИ698ВД с надрезом после УЗУ (*а*) и последующей термоэкспозиции (*б*): — $\rho_0 = 1,0$ мм; --- $\rho_0 = 0,5$ мм; номера эпюр соответствуют номерам вариантов упрочнения таблицы 6.14

Наибольшие остаточные напряжения возникают в образцах из сплава ЖС6У с радиусом надреза $\rho_0 = 0,5$ мм (рисунок 6.15, *а*). Увеличение времени обработки образцов с $\rho_0 = 1,0$ мм из этого сплава с 30 до 60 с при неизменном диаметре упрочняющих шариков $d_{ui} = 0,68$ мм приводит к повы-

шению как максимальных остаточных напряжений на поверхности концентратора, так и по толщине слоя.

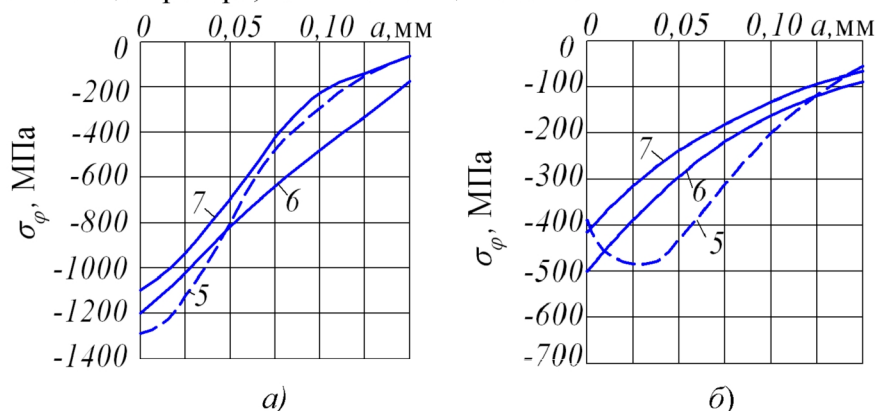


Рисунок 6.15 – Остаточные напряжения в образцах из сплава ЖС6У с надрезом после УЗУ (а) и последующей термоэкспозиции (б): — $\rho_0 = 1,0$ мм; --- $\rho_0 = 0,5$ мм; номера эпюр соответствуют номерам вариантов упрочнения таблицы 6.14

Термоэкспозиция образцов с УЗУ привела к снижению сжимающих остаточных напряжений в 2,5 - 3 раза, причём в некоторых случаях наблюдается появление подслоного максимума, обусловленного, очевидно, бóльшим наклёпом впадин надрезов шариками мёньшего диаметра. В образцах из сплава ЖС6У максимум остаточных напряжений выше, чем в образцах из сплава ЭИ698ВД, однако эпюра менее полная. Наблюдавшееся различие остаточных напряжений образцов, обработанных на различных режимах УЗУ было сnivelировано. Исключение составляет лишь случай упрочнения образцов из сплава ЖС6У по варианту 7 (рисунок 6.15, б), при котором остаточные напряжения заметно меньше, чем в случае упрочнения по варианту 6. Поэтому для сплава ЖС6У можно рекомендовать вариант упрочнения 6 как более предпочтительный.

Были проведены испытания на усталость образцов с единичными V-образными надрезами $\rho_0 = 0,5$ мм и $\rho_0 = 1,0$ мм

при температуре 700°C. Испытания осуществлялись при растяжении в случае асимметричного цикла напряжений с $\sigma_m = 450$ МПа для образцов из сплава ЭИ698ВД и $\sigma_m = 350$ МПа для образцов из сплава ЖС6У. Результаты испытаний приведены в таблице 6.15, где представлены также остаточные напряжения $\sigma_z^{нов}$ и $\bar{\sigma}_{ост}$, коэффициенты ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$.

Таблица 6.15. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	ρ_0 , мм	Вариант упрочнения	Неупрочнённые образцы σ_{Ra} , МПа	Упрочнённые образцы				
				σ_{Ra} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
ЭИ698ВД	0,5	1	168	192	-350	0,069	-315	0,076
		2		193	-260	0,096	-330	0,076
	1,0	3	195	220	-400	0,062	-340	0,074
		4		218	-310	0,074	-320	0,072
ЖС6У	1,0	6	159	184	-500	0,050	-335	0,075
		7		177	-410	0,044	-250	0,072

Следует отметить, что глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр} = 0,065$ мм не измерялась, а вычислялась по формуле (7.1) по аналогии с упрочнёнными цилиндрическими образцами.

Можно видеть, что и в этом случае коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, равный в среднем 0,074, изменяется в значительно меньших пределах, чем коэффициент ψ_σ . Для определения значений пределов выносливости при других средних напряжениях необходимо построить диаграммы предельных амплитуд циклов для каждого материала по вышеизложенной методике.

7. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

Проведённые эксперименты показали, что прогнозирование приращения предела выносливости упрочнённых деталей можно проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ с помощью формулы (3.8). Для расчёта, кроме остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, необходимо знать критическую глубину $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости и коэффициент $\bar{\psi}_p$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости.

Анализ результатов измерения $t_{кр}$ показал, что её величина определяется только размерами поперечного сечения детали. На рисунке 7.1, а представлены значения $t_{кр}$ в зависимости от наименьшего размера D поперечного сечения сплошных деталей, испытанных при изгибе, кручении и растяжении-сжатии. Кроме полученных в настоящем исследовании величин, использованы также данные, приведённые в литературе [13, 30, 49, 51] для деталей из сталей 40, 45, 30ХГСА с галтелями, напрессованной втулкой, резьбой, упрочнённых роликом.

Можно видеть, что приведённые на рисунке 7.1, а значения $t_{кр}$ в зависимости от диаметра хорошо описываются линейной функцией

$$t_{кр} = 0,0216D. \quad (7.1)$$

С этой зависимостью согласуются и результаты исследований [30, 61] для валов диаметром 160 мм с галтелью и диаметром 241 мм с напрессованной втулкой. Значения $t_{кр}$ для этих случаев составляли соответственно 3,3 и 5,5 мм, а зависимость (7.1) даёт 3,46 и 5,2 мм, то есть различие не превышает 6%.

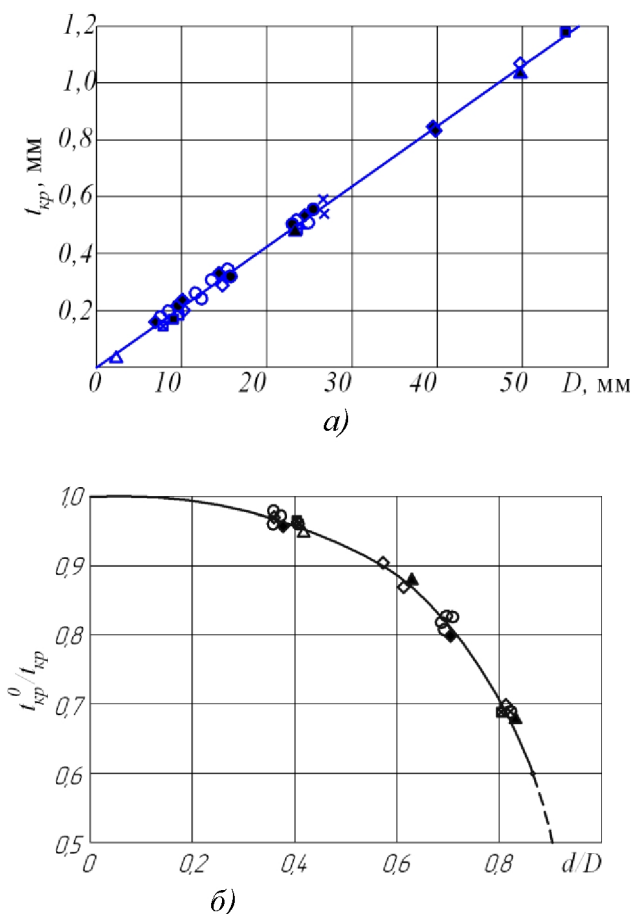


Рисунок 7.1 – Зависимость глубины нераспространяющейся трещины от размеров поперечного сечения деталей:

◐ – 30ХГСА, ● – 12Х18Н10Т, ◻ – ЭИ961, ◼ – ЭИ437Б,
 ▲ – ЭИ698ВД, ◊ – сталь 45, ◆ – Д16Т, ⊗ – 40Х,
 ▲ – сталь 20, ⊠ – сталь 40 [51], × – сталь 45 [30],
 + – 30ХГСА [49]; а – сплошные детали, б – полые детали

При проведении экспериментов в некоторых образцах наблюдались эксцентричные нераспространяющиеся трещины, в этом случае хорошо согласуется с (7.1) средняя их глубина. От-

клонение от зависимости (7.1) результатов работ [26, 30, 57], в которых $t_{кр}$ определялась в одном осевом сечении образца, можно объяснить наличием эксцентричной трещины.

На рисунке 7.1, б представлены значения $t_{кр}^{\circ}/t_{кр}$ в зависимости от отношения d/D , где $t_{кр}^{\circ}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости в упрочнённой полый детали, $t_{кр}$ – по формуле (7.1), d – диаметр отверстия, D – наименьший диаметр детали (рисунок 5.4). Видно, что $t_{кр}^{\circ}$ зависит от d/D по нелинейному закону, который в исследованных пределах изменения d/D можно аппроксимировать выражением

$$t_{кр}^{\circ} = t_{кр} \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (7.2)$$

Если учесть (7.1), то зависимость (7.2) будет иметь следующий вид:

$$t_{кр}^{\circ} = 0,0216D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right]. \quad (7.3)$$

Следовательно, для рассмотренных случаев критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости в сплошных и полых упрочнённых деталях с концентраторами зависит только от размеров поперечного сечения. Это даёт возможность определять значения $t_{кр}$ и $t_{кр}^{\circ}$ по формулам (7.1) и (7.3) без проведения экспериментов.

Коэффициент $\overline{\psi}_{\sigma}$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали в случае симметричного цикла при изгибе и растяжении-сжатии в зависимости от степени концентрации напряжений можно определить по следующим формулам, полученным в работе [17] на основании обработки экспериментальных данных,

$$\begin{aligned}\bar{\psi}_{\sigma} &= 0,612 - 0,081\alpha_{\sigma}, \\ \bar{\psi}_{\sigma} &= 0,514 - 0,065K_{\sigma},\end{aligned}\tag{7.4}$$

где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений, K_{σ} – эффективный коэффициент концентрации напряжений.

Коэффициент $\bar{\psi}_{\tau}$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали при кручении в случае симметричного цикла, как показали опыты, описанные в настоящем исследовании, составляет половину от коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$. В случае асимметричного цикла изменения напряжений коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ можно определить по формуле (6.1).

Таким образом, предел выносливости при изгибе, растяжении-сжатии и кручении поверхностно упрочнённой детали представляется возможным определить расчётным путём по формуле (3.8), где $\bar{\psi}_{\sigma}$ ($\bar{\psi}_{\tau}$) вычисляется по зависимостям (7.4) и (6.1), а среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ определяются с помощью формулы (3.7) по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ (7.1) или $t_{кр}^{\circ}$ (7.3).

На основании изложенных в настоящем исследовании данных необходимо отметить, что предложенная методика прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых гладких деталей применима только в том случае, когда остаточные напряжения в этих деталях не изменяются под действием переменных нагрузок.

8. ВЫВОДЫ

8.1. По результатам большого числа экспериментов при различных методах поверхностного упрочнения, степенях наклёпа, размерах и формах концентраторов, асимметриях цикла напряжений для прогнозирования предела выносливости по разрушению поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами обосновано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений, вычисляемых по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

8.2. Установлено, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости в опасном сечении упрочнённых деталей с концентраторами напряжений определяется только размерами поперечного сечения 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.

8.3. Установлено, что для исследованных видов поверхностного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, обкатка роликом, алмазное выглаживание, обработка микрошариками, азотирование, цементация, борирование), различных материалов (стали 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961, ВНС40, 38Х2МЮА, 40Х, 45, 40, 20; сплавы ЭИ437Б, ЭИ698ВД, ВКС-5, ВНС-17, ЭП718, ЖС6У, В93, В95, Д16Т), степеней равномерного и неравномерного наклёпа, величин (-29 – -2200 МПа) и характера распределения сжимающих остаточных напряжений, типов и размеров концентраторов, поперечных размеров деталей критерий среднеинтегральных остаточных напряжений хорошо отражает связь между остаточными напряжениями и приращением предела выносливости.

8.4. Экспериментально установлено, что коэффициент $\overline{\psi}_p$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений

зависит от типа деформации (изгиб, растяжение-сжатие и кручение), асимметрии цикла и степени концентрации напряжений. По результатам исследования предложены методики учёта влияния этих факторов при определении коэффициент $\overline{\psi}_p$.

8.5. В случае симметричного цикла для образцов и деталей с надрезами коэффициент влияния поверхностного упрочнения по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений составляет при изгибе и растяжении-сжатии $\overline{\psi}_\sigma = 0,36$, при кручении $\overline{\psi}_\tau = 0,18$. В случае асимметричного цикла напряжений на основе критерия среднеинтегральных остаточных напряжений предложена методика построения диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений и вычисления предельной амплитуды для упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

8.6. Исследования, проведённые на гладких и корсетных образцах, показали, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений можно использовать и для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых гладких деталей, но лишь в том случае, когда сжимающие остаточные напряжения не изменяются под действием переменных нагрузок.

8.7. Показано, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений может быть использован и в случае работы детали при повышенной температуре, но при этом в расчёт необходимо брать остаточные напряжения детали в конце её ресурса, то есть с учётом релаксации. Эти напряжения можно определить путём термоэкспозиции.

8.8. Установлено, что прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей по величине сжимающих остаточных напряжений на поверхности не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент влияния $\overline{\psi}_p$ в проведённых экспериментах при симметричном цикле изменяется в широких пределах – от 0,030 до 1,143, то есть в 38 раз.

8.9. Экспериментально подтверждены закономерности распределения остаточных напряжений, выявленные расчётом

по первоначальным деформациям: повышение остаточных напряжений на поверхности концентратора и уменьшение толщины слоя с сжимающими напряжениями при увеличении теоретического коэффициента концентрации, повышение остаточных напряжений в области концентратора с увеличением толщины упрочнённого слоя, увеличение остаточных напряжений гладкой сплошной детали с увеличением диаметра.

8.10. Уменьшением предела выносливости, локализацией очага разрушения, параметрами зоны упрочнения образцов с одиночным кольцевым следом при обкатывании роликом без продольной подачи подтверждено выявленное расчётным путём возникновение растягивающих остаточных напряжений при упрочнении малых по протяжённости зон деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесман А.И. Изменение прочностных свойств сталей при усталостном разрушении (обзор) // Повышение прочности и долговечности деталей машин. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 284-296.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
3. Бордаков С.А., Сургутанова Ю.Н. Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое неупрочнённых деталей под действием циклических нагрузок. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2010. – 127с.
4. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. – М.: Изд-во иностр.литер., 1960. – 434 с.
5. Гуревич С.Е. Некоторые закономерности усталостного разрушения при наличии острых концентраторов напряжений // Физико-химическая механика материалов. – 1970. – №4. – С. 107-109.
6. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряжённого состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. – 1945. – №6. – С. 583-593.
7. Дефектоскопия деталей при эксплуатации авиационной техники / Под ред. П.И.Беды. – М.: Воениздат, 1978. – 231с.
8. Иванов С.И., Григорьева И.В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.48. – С. 179-183.
9. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.53. – С. 32-42.
10. Иванов С.И., Митряев К.Ф. Об изучении остаточного напряжённого состояния детали путём исследования образцов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.53. – С. 115-121.

11. Иванов С.И. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндра// Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 139-152.
12. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
13. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Коновалов Г.В., Минин Б.В. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей. – М.: МАП (отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации»), 1992. – 191с.
14. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Прохоров А.А. Роль остаточных напряжений в сопротивлении усталости при кручении в условиях концентрации напряжений // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1986. – С. 136-142.
15. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Прохоров А.А. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1988. – №5. – С. 31-33.
16. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 3. – С. 88-95.
17. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 81-85.
18. Кирпичёв В.А., Семёнова О.Ю., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых цилиндрических деталей различного диаметра по распределению остаточных напряжений // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки, 2009. – №4. – С. 139-142.
19. Когаев В.П., Гальперин М.Я. Оценка критических радиу-

- сов кривизны в зонах концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1982. – №3. – С. 21-25.
20. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев, 1968. – 131 с.
 21. Кудрявцев И.В., Андреев В.М. Экспериментальное определение сопротивления усталости крупных стальных валов при кручении // Вестник машиностроения. – 1964. – №6. – С. 50-54.
 22. Кудрявцев И.В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. – М.: Машгиз, 1951. – 278 с.
 23. Кудрявцев И.В., Минков Я.Л., Дворникова Е.Э. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклёпом. – М.: НИИинформтяжмаш, 1970. – 144 с.
 24. Кудрявцев И.В. О причинах, вызывающих остановку развития усталостной трещины // Заводская лаборатория. – 1965. – №7. – С. 754-759.
 25. Кудрявцев И.В., Саверин М.М., Рябченков А.В. Методы поверхностного упрочнения деталей машин. – М.: Машгиз, 1949. – 222 с.
 26. Кудрявцев И.В., Салтыков М.А., Тищенко А.Т. Повышение прочности коленчатых валов методом ППД галтелей малого радиуса // Вестник машиностроения. – 1986. – №5. – С. 49-50.
 27. Кудрявцев П.И. Изменение номинальной напряжённости в вершине кольцевой усталостной трещины // Повышение прочности и долговечности деталей машин. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 233-238.
 28. Кудрявцев П.И., Морозова Т.И. Развитие усталостных трещин в сталях в связи с поверхностным наклёпом // Исследования по упрочнению деталей машин. – М.: Машиностроение, 1972. – С. 194-200.
 29. Кудрявцев П.И. Некоторые особенности строения трещин усталости в низкоуглеродистой стали // Повышение

- прочности и долговечности деталей машин. Кн. ЦНИИТМАШ, №110. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 105-113.
30. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
 31. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины при кручении стальных деталей, упрочнённых ППД // Вестник машиностроения. – 1977. – №3. – С. 55-57.
 32. Митряев К.Ф., Егоров В.И., Мальков Г.Ф. и др. Повышение усталостной прочности жаропрочных материалов алмазным выглаживанием поверхности деталей // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.53. – С. 150-159.
 33. Неразрушающий контроль металлов и изделий / Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
 34. Нисиока К. и др. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность. Перев. с яп.яз.статьи из журн. // Сумитомо киндзоку. – 1974. – Т.26. – №4. – С. 448-457. – Пер. №Ц 88462.
 35. Одинг И.А., Гуревич С.Е. Механизм возникновения нераспространяющихся трещин усталости в надрезах металлов. – ДАН СССР, 1965. – Т.161. – №2. – С. 336-340.
 36. Одинг И.А., Гуревич С.Е. Циклическая прочность стали в случае острых надрезов // Прочность металлов при переменных нагрузках.: Материалы третьего совещания по усталости металлов 5-9 марта 1962 г. – М.: АН СССР, 1963. – С. 75-81.
 37. Павлов В.Ф., Вакулук В.С., Кутовой В.А. Влияние остаточных напряжений на образование нераспространяющихся усталостных трещин / КуАИ. – Куйбышев. – 1986. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 14.08.86, №5770 - В86.
 38. Павлов В.Ф., Вакулук В.С., Кирпичёв В.А., Лапин В.И. Остаточные напряжения и предел выносливости корсетных образцов после различных видов термической и химико-термической обработки // Вестник СамГТУ. Серия

- «Технические науки». – 2010. – №7 (28). – С. 101-106.
39. Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Чирков А.В., Сазанов В.П. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей в условиях концентрации напряжений // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15, №4 (44). – С. 111-115.
40. Павлов В.Ф. Влияние величины сжимающих остаточных напряжений на приращение предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №7. – С. 10-14.
41. Павлов В.Ф. Влияние теплофизических характеристик материала на распределение остаточных напряжений у поверхности детали // Вестник машиностроения. – 1986. – №5. – С. 23-24.
42. Павлов В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – №7. – С. 3-6.
43. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Семёнова О.Ю., Чирков А.В. Закономерности распределения дополнительных остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических деталях с кольцевыми надрезами полукруглого профиля // Вестник СамГТУ. Серия «Физико-математические науки». – 2010. – №1 (20). – С. 121-126.
44. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
45. 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.
46. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.

47. Павлов В.Ф., Столяров А.К. Влияние размеров зоны поверхностного упрочнения на распределение остаточных напряжений в деталях / КуАИ. – Куйбышев. – 1986. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 19.02.86, №1162-В86.
48. Павлов В.Ф., Столяров А.К. Влияние схем поверхностного деформирования на распределение остаточных напряжений в области концентратора / КуАИ. – Куйбышев. – 1985. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 12.11.85, №1870-В86.
49. Павлов В.Ф., Филатов А.П., Вакулюк В.С. Нераспространяющиеся трещины усталости в резьбовых образцах из стали 30ХГСА/ КуАИ – Куйбышев. – 1986. – 5 с. – Деп. в ВИНТИ 13.08.86, №5750-В86.
50. Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Издательство «МИР», 1977. – 304 с.
51. Попов Г.Г., Усов А.М. Исследование усталостной прочности стали. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – 132 с.
52. Радченко В.П., Кирпичёв В.А., Лунин В.В. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т // Вестник СамГТУ. Серия «Физико-математические науки». – 2011. – №3 (24). – С. 181-184.
53. Радченко В.П., Павлов В.Ф. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Прочность материалов и элементов конструкций. Труды международной научно-технической конференции. – ИПП НАН Украины, 2011. – С. 354-357.
54. Радченко В.П., Морозов А.П. Влияние поверхностного упрочнения и усталостных испытаний на металлофизические характеристики плоских образцов из сплава ЭИ698ВД // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1. Математические модели механики, прочности и надёжности элемен-

- тов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2010. – С. 287-294.
55. Ромашёв Р.В., Фёдоров В.В., Соболев В.Л. О корреляционной связи пределов выносливости металлов с характеристиками статической прочности // Проблемы прочности. – 1980. – №11. – С. 24-27.
 56. Рублёв Я.А. Поверхностный наклёп и кинетика разрушения // Поверхностный наклёп высокопрочных материалов. – М.: ОНТИ, 1971. – С. 82-90.
 57. Рудницкий Н.М. Некоторые закономерности усталостного разрушения деталей машин, упрочняемых остаточными напряжениями // Проблемы прочности. – 1980. – №1. – С. 29-34.
 58. Свешников Д.А., Кудрявцев И.В., Гуляева Н.А., Голубовская Л.Д. Сопротивление усталости цементованных и цианированных сталей применительно к зубчатым колесам // Вопросы прочности и долговечности машиностроительных материалов и деталей. – М.: ВНИИТМАШ, ОНТИ, 1966. – С. 48-55.
 59. Семёнова О.Ю. Остаточные напряжения и сопротивление усталости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов с надрезами из стали 20 // Вестник СГАУ. – 2011. – №1 (25). – С. 86-92.
 60. Серенсен С.В., Борисов С.П., Бородин Н.А. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.
 61. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
 62. Смагленко Ф.П. Влияние распределения остаточных напряжений на усталостную прочность твёрдого сплава ВК15 // Проблемы прочности. – 1980. – №8. – С. 35-38.
 63. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
 64. Торбило В.М., Маркус Л.И. Остаточные напряжения в

- поверхностном слое закалённых сталей после алмазного выглаживания // Вестник машиностроения. – 1969. – №6. – С. 44-45.
65. Туровский М.Л., Новик Р.А. Упрочняющая обкатка роликами азотированных стальных деталей // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39-42.
66. Туровский М.Л. Остаточные напряжения во впадинах зубьев цементованных шестерён // Вестник машиностроения. – 1971. – №9. – С. 38-40.
67. Фёдоров В.В., Щипачёв А.М., Цыганов С.Г. Зависимость для определения предела выносливости с учётом асимметрии цикла // Оптимизация технологических процессов по критериям прочности. – Уфа: УАИ, 1986. – С. 26-30.
68. Филатов Э.Я., Павловский В.Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.
69. Форрест П. Усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
70. Шашин М.Я., Кузько Э.Р. О влиянии надреза на циклическую прочность стали // Вестник машиностроения. – 1970. – №3. – С. 33-35.
71. Шашин М.Я., Харченко Л.А., Кузько Э.Р. Чувствительность металлов к надрезу в зависимости от способа его нанесения // Вестник машиностроения. – 1972. – №3. – С. 68-69.
72. Шканов И.Н., Смирнов В.А., Касаткин А.С. Сравнение усталостной прочности стали, упрочнённой вибро- и дробеструйными способами на одинаковую толщину наклёпанного слоя // Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов. – Куйбышев: КпТИ, 1976. – С. 91-96.
73. Школьник Л.М., Девяткин В.П. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 13-15.
74. Gunn K. Effect of Yielding on the Fatigue Properties of Test-

- pieces Containing Stress Concentrations // Aero.Quarterly 6, 1955. – 277 p.
75. Starker P., Macherauch E. Kugelstrahlen und Schwingfestigkeit // Zeitschrift für Werkstofftechnik. – 1983. – No.14.S.109-115.
76. Yoshimoto I., Mazuyama K., Yamada Y. Prediction of Fatigue Strength of Bolt-Nut Joints Based on Residual Stress // Bulletin of Research Laboratory of Precision Machinery and Elektroniks. – 1985. – No.55 – P. 5-10.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	3
2. МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ	4
2.1. Методика определения остаточных напряжений в гладких образцах и деталях.....	14
2.2. Методика определения остаточных напряжений в образцах и деталях с концентраторами напряжений.....	14
2.3. Методика проведения и оборудование для испытаний на усталость.....	22
3. ТЕОРИЯ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ.....	26
4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ.....	32
4.1. Методы поверхностного упрочнения, материал, последовательность образования концентратора	34
4.2. Наклёп.....	44
4.3. Короткие зоны упрочнения.....	47
5. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ	51
5.1. Тип концентратора	51
5.2. Размеры поперечного сечения.....	56
5.3. Корсетные и гладкие образцы	74
6. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ	85
6.1. Тип деформации	85
6.2. Асимметрия цикла напряжений	92
6.3. Рабочая температура	95
7. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ	108
8. ВЫВОДЫ.....	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115

Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С.

**Остаточные напряжения и сопротивление усталости
упрочнённых образцов с концентраторами напряжений**

Самара. 2011