

УДК 621.787:539.319

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

**В.П. Радченко<sup>1</sup>, В.А. Кирпичёв<sup>2</sup>, В.В. Лунин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет, Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва Россия, 443086, г. Самара, Московское ш., 34

*Экспериментально исследовано влияние поверхностного пластического упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра (10 – 50 мм) из стали 20 с концентраторами напряжений в условиях изгиба. Рассматривались полукруглые надрезы с радиусами 0,3; 0,5 и 1 мм. Распределение остаточных напряжений в гладких образцах определялось экспериментально методом колец и полосок, а в образцах с надрезами – путём суммирования дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего упрочнения и остаточных напряжений гладких образцов. Приведены распределения осевых остаточных напряжений в гладких образцах и в наименьшем сечении образцов с концентраторами. Установлено, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей в условиях концентрации напряжений наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. Показано, что после обработки поверхности микрошариками и обкатки роликом в образцах с концентраторами напряжений наблюдается увеличение величины предела выносливости на 30÷100 % по сравнению с неупрочнёнными образцами. Приводятся экспериментальные и расчётные значения пределов выносливости.*

**Ключевые слова:** *поверхностное упрочнение, цилиндрический образец, концентратор напряжений, остаточные напряжения, предел выносливости.*

Повышение надёжности и долговечности деталей является одной из важнейших проблем, комплексное и системное решение которой, как правило, сопровождается созданием и эксплуатацию всех изделий техники. Одним из основных видов разрушения деталей являются усталостные поломки, которые приводят к тяжёлым последствиям, так как возникают внезапно. Важнейшей характеристикой работоспособности деталей двигателей по сопротивлению усталости является предел выносливости, прогнозируемое значение которого в значительной мере зависит от достоверности расчётов, выполненных на этапах проектирования и разработки конструкторской документации. Поэтому выбор конструкции, материалов, геометрических параметров деталей и технологии их изготовления представляет собой весьма важную задачу теории и практики.

<sup>1</sup> Владимир Павлович Радченко (д.ф.-м.н, проф.), заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика».

<sup>2</sup> Виктор Алексеевич Кирпичёв (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Сопротивление материалов».

Валентин Валериевич Лунин, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика».

Одним из резервов повышения качества, надёжности и ресурса является использование при изготовлении деталей современных видов и средств упрочняющей технологии, которая позволяет существенно повысить сопротивление усталости. При изготовлении деталей широко применяются такие методы поверхностного пластического деформирования (ППД), как гидро- и пневмодробеструйная обработка, ультразвуковое упрочнение, обработка микрошариками, алмазное выглаживание, раскатка, обкатка роликом.

Влияние технологии упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием проявляется через ряд факторов качества поверхностного слоя, среди которых остаточные напряжения играют основную роль [1]. Особенно важно знать влияние этого фактора на сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений, так как усталостные разрушения происходят, как правило, в местах нарушения призматической формы деталей. Поэтому исследование влияния технологических остаточных напряжений на сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений является актуальной задачей технологии изготовления и обеспечения прочности деталей. Это позволит ввести остаточные напряжения в стандартные прочностные расчёты, прогнозировать сопротивление усталости деталей, значительно сократить длительные и дорогостоящие испытания на усталость.

Для оценки влияния сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей в настоящее время применяются два критерия. Первым критерием, использованным в работах [1 – 4], являются остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали. Зависимость для определения предела выносливости  $P_R$  с применением этого критерия имеет вид

$$P_R = P_R^0 - \psi_p \cdot \sigma_z^{нов}, \quad (1)$$

где  $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$  – предел выносливости неупрочнённой детали,  $\psi_p(\psi_\sigma, \psi_\tau)$  – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию  $\sigma_z^{нов}$  на предел выносливости,  $\sigma_z^{нов}$  – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора в наименьшем (опасном) сечении детали. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с третьей теорией предельных напряжённых состояний не участвуют, так как радиальные напряжения на поверхности концентратора  $\sigma_\rho = 0$ , а окружные  $\sigma_\theta$  являются промежуточными главными напряжениями [5].

Зависимость (1) обычно записывается для приращения  $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$  предела выносливости

$$\Delta P_R = \psi_p \cdot |\sigma_z^{нов}|. \quad (2)$$

При упрочнении деталей ППД часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей напряжения уменьшаются. Этот спад бывает весьма существенным, иногда сжимающие остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [6]. Однако увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях. Так, например, авторами исследования [7] определялись остаточные напряжения и сопротивление усталости азотированных и упрочнённых роликом стальных цилиндрических образцов. После нагрева и выдержки этих образцов при температуре 150 °С и 200 °С наблюдалось снижение сжимающих

остаточных напряжений на поверхности и их увеличение на некотором расстоянии от неё, в результате чего предел выносливости повышался.

Всё изложенное выше говорит о том, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей.

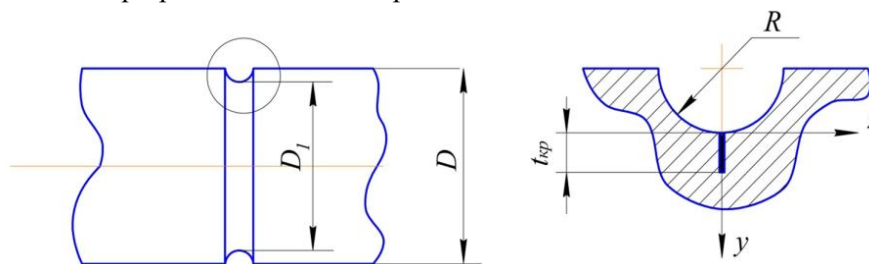
Это, в свою очередь, интенсифицировало разработку методов расчёта распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине упрочнённого слоя не только при нормальной температуре [8 – 10], но и при повышенных температурах нагружения [8, 11 – 13].

При достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочнённых деталях с концентраторами всегда возникают нераспространяющиеся усталостные трещины [3, 14, 15]. В связи с этой особенностью сопротивления усталости в исследовании [16] было предложено принять за критерий остаточные напряжения на дне нераспространяющейся трещины, в качестве которых следует рассматривать дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий упрочнённой детали в результате образования трещины.

Для определения второго критерия в работе [16] использовалось решение задачи [17] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Была выделена основная часть решения [17] и предложен второй критерий – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  – влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённой детали в виде

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (3)$$

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали,  $\xi = y/t_{кр}$  – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$  (рис. 1),  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.



Р и с. 1. Деталь с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

Критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$  имеет чётко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины. Приращение предела выносливо-

сти  $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$  упрочнённой детали с концентратором напряжений при использовании критерия  $\bar{\sigma}_{ocm}$  определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P \cdot |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (4)$$

где  $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$  – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию  $\bar{\sigma}_{ocm}$  на предел выносливости.

В работе [18] для упрочнённых различными методами ППД деталей и образцов из различных материалов с различными концентраторами напряжений при растяжении-сжатии, изгибе и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров опасного поперечного сечения и для цилиндрической детали сплошного сечения определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216D_1, \quad (5)$$

где  $D_1$  – диаметр опасного поперечного сечения детали (рис. 1).

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах различного диаметра из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля. Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики:  $\sigma_T = 395$  МПа,  $\sigma_s = 522$  МПа,  $\delta = 26,1$  %,  $\psi = 65,9$  %,  $S_k = 1416$  МПа.

Гладкие сплошные образцы диаметром  $D = 10$  мм и  $D = 25$  мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5 – 2,5 мм при давлении воздуха 0,28 МПа в течение 10 минут, а также обкатке роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии  $P = 0,5$  кН (ОР1) и  $P = 1,0$  кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин; гладкие образцы диаметром  $D = 50$  мм – обкатке роликом. Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы диаметром  $D = 10$  мм наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм; диаметрами  $D = 25$  мм и  $D = 50$  мм –  $R = 0,3$  мм,  $R = 0,5$  мм и  $R = 1,0$  мм.

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром  $D = 10$  мм определялись экспериментально методом колец и полосок [19], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [20]. Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром  $D = 25$  мм и  $D = 50$  мм определялись методом колец и полосок [19].

Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  гладких образцов представлено на рис. 2. Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания при одной и той же упрочняющей обработке в образцах диаметром  $D = 50$  мм несколько больше, чем в образцах диаметром  $D = 25$  мм и образцах диаметром  $D = 10$  мм. Это различие объясняется повышением жёсткости образцов с увеличением размеров их поперечного сечения. Аналогичные закономерности в распределении остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки образцов из стали 45 и сплава Д16Т были установлены в работе [18] при изменении диаметра образцов  $D$  от 10 мм до 50 мм.

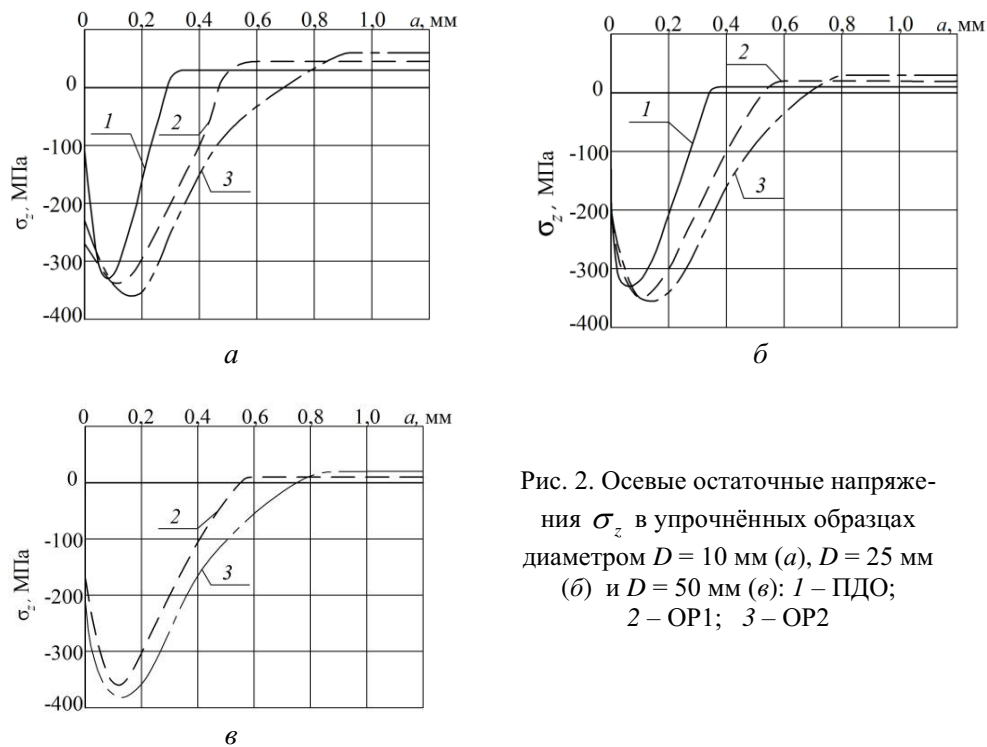


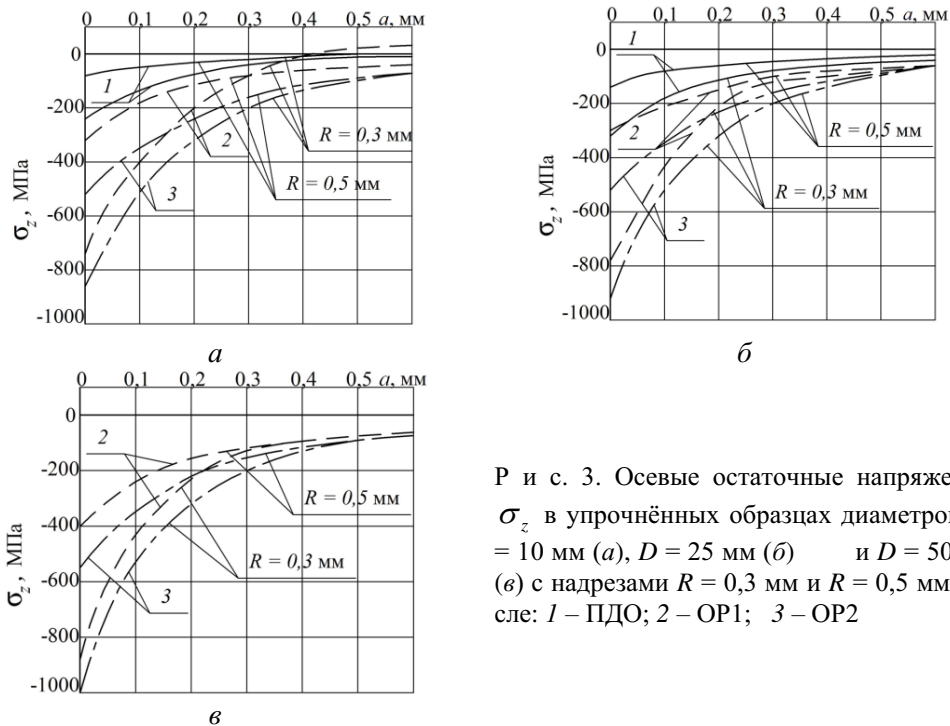
Рис. 2. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в упрочнённых образцах диаметром  $D = 10$  мм (а),  $D = 25$  мм (б) и  $D = 50$  мм (в): 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим [17], так и численным методом. Необходимо отметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение.

Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  в наименьшем сечении образцов с надрезами  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм приведено на рис. 3, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов  $\sigma_z^{\text{пов}}$  представлены в таблице.

Обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений, достигающих на дне надреза  $R = 0,3$  мм значения  $-1004$  МПа ( $D = 50$  мм; ОР2), что существенно выше не только предела текучести, но и предела прочности исследуемой стали 20. В работе [21] было показано, что остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву  $S_k$  материала детали на 15 %. В исследуемом случае этот предел не превышен, так как  $S_k = 1416$  МПа.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром  $D = 10$  мм в гладкой части проводились на машине МУИ-6000, диаметром  $D = 25$  мм – на машине УММ-01 [22], диаметром  $D = 50$  мм – на машине УМП-02 [22]; база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения.



Р и с. 3. Осьевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в упрочнённых образцах диаметром  $D = 10$  мм (а),  $D = 25$  мм (б) и  $D = 50$  мм (в) с надрезами  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм после: 1 – ПДО; 2 – ОП1; 3 – ОП2

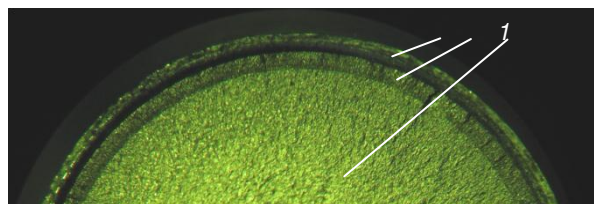
Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в таблице. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина  $t_{кр}$  которых соответствует зависимости (5) и приведена в таблице.

На рис. 4 представлена фотография излома одного из упрочнённых дробью образцов  $D = 10$  мм с надрезом  $R = 0,5$  мм, на рис. 5 – диаметром  $D = 25$  мм с надрезом  $R = 0,5$  мм. На фотографиях чётко видны нераспространяющиеся трещины усталости 2, причём для образцов диаметром  $D = 10$  мм нераспространяющаяся трещина имеет концентрическую форму (рис. 4), так как эти образцы испытывались на усталость при чистом изгибе с вращением. Для образцов диаметром  $D = 25$  мм трещина имеет серповидную форму, так как испытания на усталость этих образцов проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

Из представленных в таблице данных видно, что опережающее поверхностное пластическое деформирование образцов с надрезом пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом приводит к существенному повышению предела выносливости. Наиболее эффективна для исследованных образцов обкатка роликом, причём с увеличением усилия обкатки с  $P = 0,5$  кН до  $P = 1,0$  кН предел выносливости возрастает. Наблюдаемое явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при увеличении усилия обкатки (рис. 2), результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в наименьшем сечении образцов с надрезом.

**Результаты испытаний образцов на усталость и определения остаточных напряжений**

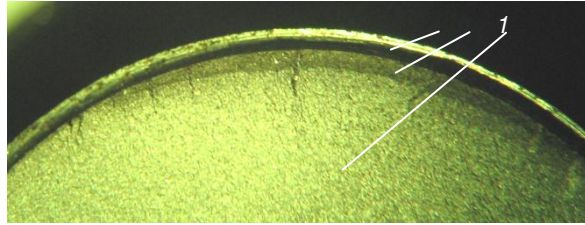
$D$ , мм	$R$ , мм	Неупроч. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы						
			обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{нов}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$l_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10	0,3	110	ПДО	155	-263	0,171	0,203	-126	0,357
			ОР1	230	-732	0,164	0,195	-337	0,356
			ОР2	267,5	-861	0,183	0,205	-454	0,347
	0,5	120	ПДО	137,5	-90	0,194	0,196	-48	0,365
			ОР1	187,5	-311	0,217	0,202	-178	0,379
			ОР2	250	-517	0,251	0,192	-333	0,390
25	0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
			ОР1	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
			ОР2	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
	0,5	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
			ОР1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
			ОР2	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
	1,0	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
			ОР1	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
			ОР2	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380
50	0,3	87,5	ОР1	117,5	-898	0,033	1,040	-94	0,322
			ОР2	130	-1004	0,042	1,110	-128	0,332
	0,5	92,5	ОР1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366
			ОР2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357
	1,0	92,5	ОР1	110	-126	0,139	1,073	-46	0,380
			ОР2	115	-166	0,136	1,035	-62	0,363



Р и с. 4. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром  $D = 10$  мм надрезом  $R = 0,5$  мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

С увеличением радиуса (глубины) надреза приращение предела выносливости образцов при одной и той же упрочняющей обработке уменьшается, что обусловлено уменьшением сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении.

Для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением глубины концентратора необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями.



Р и с. 5. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром  $D = 25$  мм с надрезом  $R = 0,5$  мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию  $\sigma_z^{\text{пов}}$  – остаточным напряжениям на поверхности надреза – приводит к значительному рассеянию коэффициента  $\psi_\sigma$ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,033 до 0,251 (см. таблицу), то есть в 7,6 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ . Коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  в проведённом исследовании изменяется от 0,321 до 0,390, составляя в среднем 0,356, и незначительно отличается от значения  $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ , установленного в [18] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, проведённое исследование показывает, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов и деталей различного диаметра с концентраторами напряжений наиболее оправдано применение критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ . Для определения приращения предела выносливости при изгибе поверхностно упрочнённых деталей различного диаметра следует воспользоваться формулой (4). Критерий  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  при этом вычисляется по зависимости (3) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине  $t_{\text{кр}}$  нераспространяющейся трещины усталости и определяемой формулой (5). Коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  влияния упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  для упрочнённых деталей и образцов с надрезами полукруглого профиля можно принять равным 0,36.

## Выводы

1. Проведённое исследование показало, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей различного



диаметра (10 – 50 мм) в условиях концентрации напряжений наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

2. Для прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами использование в качестве критерия остаточных напряжений на поверхности концентратора  $\sigma_z^{пов}$  не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент, учитывающий влияние этого критерия на предел выносливости, имеет существенное рассеяние.

3. Для исследованных образцов из стали 20 диаметром 10 – 50 мм экспериментально подтверждена установленная ранее зависимость (5) критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  от размеров опасного поперечного сечения поверхностно упрочнённых образцов и деталей.

4. Для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением диаметра необходимо увеличить толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями пропорционально размерам поперечного сечения упрочняемой детали.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов С.И., Павлов В.Ф.* Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
2. *Кравченко Б.А., Митряев К.Ф.* Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.
3. *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.
4. *Туровский М.Л., Шифрин Н.М.* Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.
5. *Иванов С.И., Павлов В.Ф.* Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклёпанного материала // Вопросы прикладной механики в авиационной технике. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – Вып. 66. – С. 70-73.
6. *Школьник Л.М., Десяткин В.П.* Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 7-12.
7. *Туровский М.Л., Новик Р.А.* Упрочняющая обкатка роликами азотированных стальных деталей // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39-42.
8. *Радченко В.П., Саушкин М.Н.* Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. – М.: Машиностроение-1. – 2005. – 226 с.
9. *Радченко В.П., Саушкин М.Н., Павлов В.Ф.* Метод расчёта остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учётом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52. – № 2. – С. 173-182.
10. *Радченко В.П., Павлов В.Ф., Саушкин М.Н.* Определение параметра анизотропии упрочнения и остаточных напряжений в цилиндрическом образце из стали после обкатки роликом // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2011. – № 4. – С. 93-100.
11. *Радченко В.П., Кирпичёв В.А., Лукин В.А.* Влияние термоэкспозиции на остаточные напряжения образцов из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. – 2012. – № 3(35). – С. 147-154.
12. *Радченко В.П., Саушкин М.Н.* Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических элементов конструкций при ползучести // Изв. вузов. Машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 3-17.
13. *Радченко В.П., Саушкин М.Н.* Прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочнённом изделии цилиндрической формы при ползучести // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 6. – С. 90-99.
14. *Кудрявцев П.И.* Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
15. *Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М.* Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение. – 1975. – 488 с.

16. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.
17. 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. 1. – С. 88-95.
18. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
19. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.
20. 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.
21. Радченко В.П., Павлов В.Ф. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 354-357.
22. Филатов Э.Я., Павловский В.Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.

*Статья поступила в редакцию 14 января 2015 г.*

## **THE ESTIMATION OF SURFACE HARDENING INFLUENCE ON THE ENDURANCE LIMIT OF CYLINDRICAL PARTS OF VARIOUS DIAMETERS UNDER STRESS CONCENTRATION CONDITIONS**

***V.P. Radchenko<sup>1</sup>, V.A. Kirpichev<sup>2</sup>, V.V. Lunin<sup>1</sup>***

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

<sup>2</sup> S.P. Korolyov Samara State Aerospace University  
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086, Russian Federation

*The influence of surface plastic hardening on the endurance limit of cylindrical parts of various diameters (10 - 50 mm) made of steel 20 with stress concentrators under bending is investigated experimentally. We consider the semicircular notches with radii of 0.3; 0.5 and 1 mm. The distribution of residual stresses in smooth specimens is determined experimentally by the rings and strips method. For the notched specimens it is determined numerically by calculation the sum of additional residual stresses due to the redistribution of residual loadings, after advancing hardening and residual stresses of smooth specimens. The distributions of axial residual stresses in smooth specimens and in the smallest cross section of specimens with concentrators are given. It was found that for predicting the endurance limit of the surface-hardened cylindrical parts under the stress concentration it is preferable to use the mean integral criterion of residual stresses. It is shown that after treatment of surface by microbeads and running roller in specimens with stress concentrators the endurance limit value increased by 30 ÷ 100% compared to the non hardened specimens. The experimental and calculated values of the endurance limits are given.*

**Keywords:** *surface hardening, cylindrical specimen, stress concentrator, residual stresses, endurance limit.*

---

*Vladimir P. Radchenko (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Professor.  
Viktor A. Kirpichev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Valentin V. Lunin, Postgraduate Student.*