

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ГЛАДКИХ ДЕТАЛЕЙ<sup>1</sup>

*Аннотация.* Изучено влияние пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения, предел выносливости и микротвердость плоских образцов из сплава ЭИ698ВД. Установлено, что предел выносливости коррелирует с критерием среднеинтегральных остаточных напряжений поверхностного слоя упрочненных образцов, а микротвердость – с величиной сжимающих остаточных напряжений упрочненной поверхности.

*Ключевые слова:* поверхностное упрочнение, гладкие образцы, критерий влияния остаточных напряжений, предел выносливости, микротвердость.

*Abstract.* The article studies the influence of the shotblasting on residual stresses, limit of endurance and micro-hardness of flat specimens made of ЭИ698ВД alloy. It is established that the limit of endurance correlates with the average residual stresses criterion of the surface layer of hardened specimens; micro-hardness correlates with compressing residual stresses of hardened surface as well.

*Key words:* surface hardening, flat specimens, residual stresses influence criterion, limit of endurance, micro-hardness.

После поверхностного пластического деформирования в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклеп и сжимающие остаточные напряжения. Экспериментально установлено [1], что основную роль в повышении сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости таких деталей по остаточным напряжениям применяются два критерия. Первым критерием, используемым в работах [1–4], являются остаточные напряжения на поверхности опасного сечения упрочненной детали. Зависимость для определения предела выносливости при изгибе  $\sigma_{-1}^y$  в упрочненной детали в этом случае имеет вид

$$\sigma_{-1}^y = \sigma_{-1}^0 + \psi_{\sigma} \cdot \left| \sigma_z^{\text{пов}} \right|, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}^0$  – предел выносливости неупрочненной детали;  $\psi_{\sigma}$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости;  $\sigma_z^{\text{пов}}$  – осевые остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали.

Другие компоненты остаточного напряженного состояния в соответствии с третьей теорией предельных напряженных состояний в зависимости (1) не участвуют, так как радиальные остаточные напряжения на поверхности детали равны нулю, а окружные являются промежуточными главными напряжениями [5].

Критерий  $\sigma_z^{\text{пов}}$ , учитывающий влияние остаточных напряжений на поверхности упрочненной детали, может быть использован для прогнозирования

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

ния предела выносливости по трещинообразованию. Однако, как следует из литературных данных и наших исследований, при расчете предела выносливости по разрушению зависимость (1) непригодна из-за значительного рассеяния коэффициента  $\Psi_{\sigma}$ , так как в этом случае не учитывается влияние характера распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

В работе [6] для оценки влияния сжимающих остаточных напряжений, возникающих при поверхностном упрочнении, на предел выносливости деталей был предложен второй критерий – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  в виде

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

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали (образца) по толщине поверхностного слоя  $a$ ;  $\xi = a/t_{\text{кр}}$  – расстояние от поверхности опасного сечения до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{\text{кр}}$ ;  $t_{\text{кр}}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости [7, 8].

Критерий  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  учитывает влияние на предел выносливости не только величины, но и характера распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя детали. Используя этот критерий, представляется возможным прогнозировать предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла детали  $\sigma_{-1}^y$  за счет поверхностного упрочнения по формуле

$$\sigma_{-1}^y = \sigma_{-1}^0 + \bar{\Psi}_{\sigma} \cdot |\bar{\sigma}_{\text{ост}}|, \quad (3)$$

где  $\bar{\Psi}_{\sigma}$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ .

Возможность использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных образцов и деталей с концентраторами напряжений изучена в работах [7–9]. В настоящем исследовании предпринята попытка использовать критерий  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  для прогнозирования предела выносливости при изгибе гладких плоских образцов из сплава ЭИ698ВД, упрочненных пневмодробеструйной обработкой на различных режимах. В работе исследовалась также микротвердость упрочненных образцов и ее связь с остаточными напряжениями.

Образцы для определения остаточных напряжений (рис. 1) и испытаний на усталость (рис. 2) после шлифования подвергались упрочнению стеклянными и стальными шариками при различном давлении воздуха  $P$  (табл. 1).

Ускоренные испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на вибростенде, база испытаний –  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в табл. 1. В упрочненных 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 рис. 3 приведена фотография излома упрочненного образца, на которой видна нераспространяющаяся усталостная трещина 1.

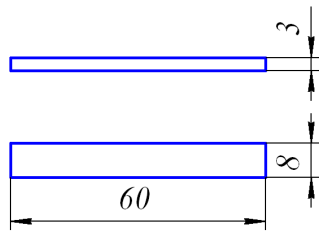


Рис. 1. Образец для определения остаточных напряжений

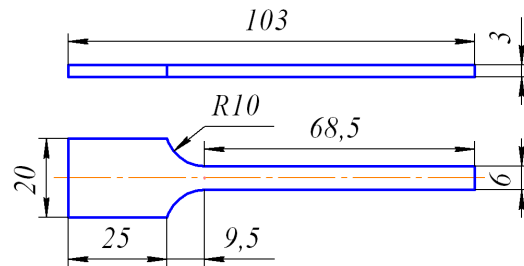


Рис. 2. Образец для испытаний на усталость

Таблица 1

Режимы упрочнения, результаты испытаний на усталость и измерения остаточных напряжений

Вариант упрочнения	Тип шариков	$P$ , МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{пов}$ , МПа	$\Psi_\sigma$	$\bar{\sigma}_{ост}$ , 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	—	—	—	—

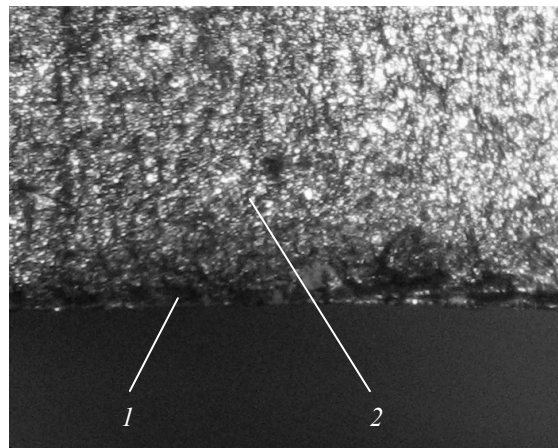


Рис. 3. Усталостный излом плоского упрочненного дробью образца:  
1 – нераспространяющаяся трещина, 2 – зона долома

Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в образцах по толщине поверхностного слоя  $a$  определялись по методике работы [10] и приведены на

рис. 4. 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.

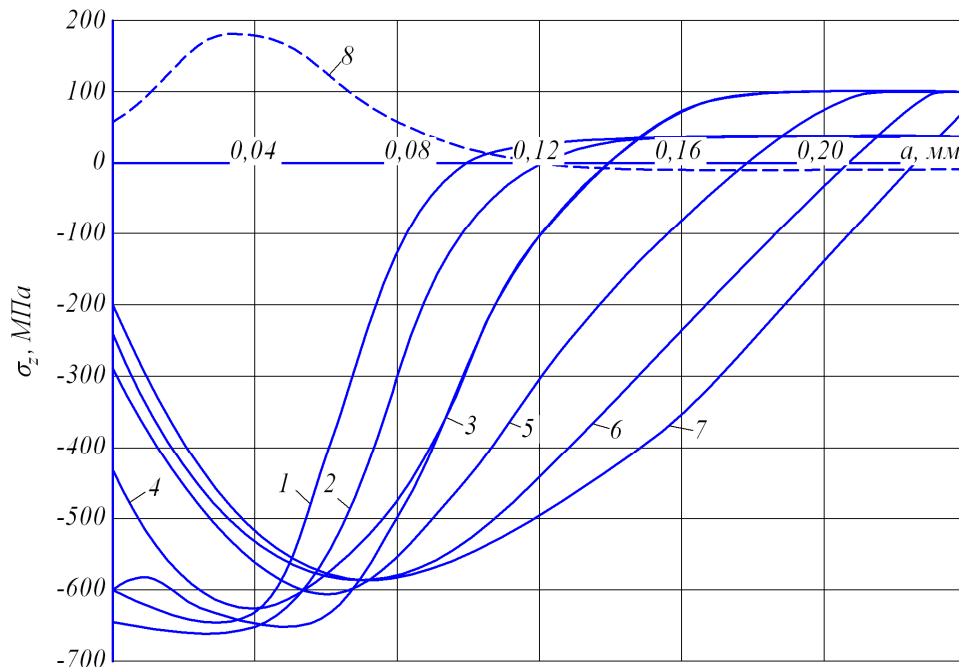


Рис. 4. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в образцах после упрочнения (1–7) и в исходном состоянии (8) (номера эпюр соответствуют номерам вариантов упрочнения в табл. 1)

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 в глубь образца. В табл. 1 приведены значения остаточных напряжений  $\sigma_z^{\text{пов}}$  на поверхности упрочненных образцов, а также значения коэффициента  $\psi_\sigma$  влияния поверхностного упрочнения по критерию  $\sigma_z^{\text{пов}}$ . Можно видеть, что коэффициент  $\psi_\sigma$  изменяется для всех вариантов упрочнения образцов в 11 раз, а для случаев упрочнения стальными шариками – в 2,3 раза. Изменение коэффициента  $\psi_\sigma$  в таких широких пределах не позволяет использовать критерий  $\sigma_z^{\text{пов}}$  для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных гладких деталей.

По методике работы [6] были вычислены среднеинтегральные остаточные напряжения  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  по толщине поверхностного слоя образца, равной кри-

тической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости. Значения  $\bar{\sigma}_{ост}$  приведены в табл. 1. Здесь же представлены значения коэффициента влияния поверхностного упрочнения  $\bar{\psi}_{\sigma}$  на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

Из данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 4, 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 со значением  $\bar{\psi}_{\sigma}$ , вычисленным по формулам работ [11–13] для случая гладкой детали, т.е. без концентратора напряжений. Приняв для случая гладкой детали теоретический  $\alpha_{\sigma}$  и эффективный  $K_{\sigma}$  коэффициенты концентрации напряжений равными единице, получим среднее значение коэффициента  $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,490$ . Такое совпадение коэффициента  $\bar{\psi}_{\sigma}$  объясняется устойчивостью остаточных напряжений в образцах, упрочненных стальными шариками [1]. Коэффициент  $\psi_{\sigma}$ , учитывающий влияние остаточных напряжений  $\sigma_z^{пов}$  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 упрочненных стеклянными шариками образцах под действием переменных напряжений при испытаниях на усталость, что было установлено в работе [14] на основании измерения микротвердости поверхности усталостных образцов до и после испытаний на усталость. Кроме того, из данных табл. 1 и рис. 4 видно, что на предел выносливости образцов основное влияние оказывает не величина сжимающих остаточных напряжений на поверхности, а полнота распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя.

На образцах для определения остаточных напряжений (рис. 1) была измерена микротвердость упрочненной поверхности  $H_{\mu}^{пов}$ , а также микротвердость образцов после удаления стравленного слоя  $a_{стр}$ . В табл. 2 представлены средние значения микротвердости по 12 отпечаткам в каждом случае. Из данных табл. 2 следует, что толщина стравленного слоя при определении остаточных напряжений во всех случаях превышает глубину смены знака остаточных напряжений. В связи с этим можно предположить, что микротвердость – это микротвердость ненаклепанного материала, составляющая в среднем 5505 МПа.

Следует обратить внимание на то, что микротвердость  $H_{\mu}^{пов}$  упрочненной стеклянными шариками поверхности выше по сравнению с микротвердостью поверхности, упрочненной стальными шариками. Из данных

табл. 1 и 2 видно, что величина микротвердости  $H_{\mu}^{\text{пов}}$  следует за значениями остаточных напряжений на поверхности: чем выше сжимающие остаточные напряжения на поверхности, тем выше микротвердость. Из анализа данных табл. 1 и 2 также видно, что микротвердость поверхности после обработки стеклянными шариками выше, чем после обработки стальными шариками, а предел выносливости, наоборот, выше после обработки стальными, чем стеклянными, шариками. Поэтому микротвердость упрочненной поверхности, в отличие от остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, не может служить объективным критерием оценки влияния упрочнения на предел выносливости детали.

Таблица 2

## Результаты измерения микротвердости

Вариант упрочнения	Тип шариков	$P$ , МПа	$H_{\mu}^{\text{пов}}$ , МПа	$a_{\text{стр}}$ , мм	$H_{\mu}^{\text{подсл}}$ , МПа	$a_{\text{ОН}}$ , 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	–

Таким образом, проведенное исследование показало, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  можно использовать и для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных гладких деталей, но лишь в том случае, если сжимающие остаточные напряжения не изменяются под действием переменных нагрузок.

**Список литературы**

1. **Иванов, С. И.** Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25–27.
2. **Кравченко, Б. А.** Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б. А. Кравченко, К. Ф. Митряев. – Куйбышев : Куйбышев. книж. изд-во, 1968. – 131 с.
3. **Серенсен, С. В.** К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочненных образцов с учетом кинетики остаточной напряженности / С. В. Серенсен, С. П. Борисов, Н. А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – № 2. – С. 3–7.
4. **Туровский, М. Л.** Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали / М. Л. Туровский, Н. М. Шифрин // Вестник машиностроения. – 1970. – № 11. – С. 37–40.
5. **Иванов, С. И.** Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклепанного материала / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Вопросы прикладной механики в авиационной технике. – Куйбышев : КуАИ, 1973. – Вып. 66. – С. 70–73.
6. **Павлов, В. Ф.** О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29–32.

7. **Павлов, В. Ф.** Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 8. – С. 22–26.
8. **Павлов, В. Ф.** Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37–40.
9. **Павлов, В. Ф.** Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичев, В. Б. Иванов – Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
10. **Биргер, И. А.** Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
11. **Кирпичев, В. А.** Сопротивление усталости упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений / В. А. Кирпичев, А. П. Филатов, Ю. Н. Сургутанова, В. Б. Иванов // Математическое моделирование и краевые задачи : тр. Шестой Всерос. науч. конф. с международным участием. – Ч. 1. Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. – Самара : Изд-во СамГТУ, 2009. – С. 126–131.
12. **Кирпичев, В. А.** Влияние остаточных напряжений на предел выносливости детали при различной степени концентрации / В. А. Кирпичев, А. П. Филатов, О. В. Каранаева, Д. В. Иванов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : материалы докладов МНТК 24–26 июня 2009 г. – Ч. 2. – Самара : СГАУ, 2009. – С. 178–179.
13. **Кирпичев, В. А.** Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений / В. А. Кирпичев, А. С. Букатый, А. П. Филатов, А. В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 81–85.
14. **Радченко, В. П.** Влияние поверхностного упрочнения и усталостных испытаний на металлофизические характеристики плоских образцов из сплава ЭИ698ВД / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Математическое моделирование и краевые задачи : тр. Седьмой Всерос. науч. конф. с международным участием. Ч. 1. Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. – Самара : Изд-во СамГТУ, 2010. – С. 287–294.

---

***Кирпичев Виктор Алексеевич***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра сопротивления материалов,  
Самарский государственный  
аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева

E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru)

***Kirpichyov Viktor Alekseevich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of strength of materials,  
Samara State Aerospace University  
named after S. P. Korolyov

***Букатый Алексей Станиславович***

кандидат технических наук, старший  
преподаватель, кафедра технологии  
машиностроения, Ярославский  
государственный технический  
университет

E-mail: [bukaty@inbox.ru](mailto:bukaty@inbox.ru)

***Bukaty Aleksey Stanislavovich***

Candidate of engineering sciences, senior  
lecturer, sub-department of machine  
building technology, Yaroslavl State  
Technical University

**Чирков Алексей Викторович**

кандидат технических наук, ассистент,  
кафедра сопротивления материалов,  
Самарский государственный  
аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева

E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru)

**Chirkov Aleksey Viktorovich**

Candidate of engineering sciences, assistant,  
sub-department of strength of materials,  
Samara State Aerospace University  
named after S. P. Korolyov

---

УДК 621.787: 539.319

**Кирпичев, В. А.**

**Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упроч-  
ненных гладких деталей** / В. А. Кирпичев, А. С. Букатый, А. В. Чирков //  
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические  
науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 102–109.