

8. Кудрявцев, П.И. Развитие усталостных трещин в сталях в связи с поверхностным наклёпом / П.И. Кудрявцев, Т.И. Морозова // Исследования по упрочнению деталей машин. – М.: Машиностроение. – 1972. – С. 194-200.

9. Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 256 с.

УДК 621.787:539.319

*Сазанов В.П., Пилипив О.М., Вакулюк В.С.,  
Денискина Е.А., Коныхова А.С.*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ «ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ»**

Дробеструйная обработка поверхности деталей в машиностроении является одним из наиболее распространённых и эффективных способов повышения сопротивления усталости при их работе в условиях действия переменных напряжений. Вместе с тем при прогнозировании предела выносливости за счёт упрочнения, а также выбора оптимальных режимов технологического процесса разработчикам требуется комплексно решить ряд следующих задач:

– экспериментальное определение распределений остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя (в лабораторных условиях);

– моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния в гладких деталях и деталях с концентраторами напряжений с применением современных САЕ– систем;

– выбор критерия влияния поверхностного упрочнения с последующей разработкой методики прогнозирования предела выносливости за счёт упрочнения.

При экспериментальном определении остаточных напряжений с применением метода «образца-свидетеля» разрушению подвергается только «образец-свидетель». Такой образец, имеющий определённые размеры и форму, проходит весь технологический цикл упрочняющей обработки вместе со штатной деталью.

Как известно, связь между приращением предела выносливости упрочнённых деталей и остаточными напряжениями наиболее точно отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  [1–3]. Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости детали при изгибе  $\Delta\sigma_{-1}$  с использованием критерия  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  производится по следующей зависимости [1]:

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

где  $\bar{\psi}_{\sigma}$  – феноменологический коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ ;  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  – среднеинтегральные остаточные напряжения, определяемые на критической глубине нераспространяющейся трещины усталости  $t_{\text{кр}}$ , возникающей в опасном сечении упрочнённой детали при работе на пределе выносливости.

Коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  зависит от степени концентрации напряжений и вычисляется, например, для случая изгиба по следующей формуле:

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081 \alpha_{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\sigma}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости определяется только размерами опасного поперечного сечения. Для цилиндрических образцов и деталей зависимость для определения  $t_{\text{кр}}$  имеет вид [1–3]:

– для сплошного цилиндра  $t_{\text{кр}} = 0,0216 D_1$ ; (3)

– для полого цилиндра  $t_{\text{кр}} = 0,0216 D_1 \left[ 1 - 0,04 (d / D_1)^2 - 0,54 (d / D_1)^3 \right]$ , (4)

где  $D_1$  – диаметр опасного сечения образца или детали,  $d$  – диаметр отверстия образца или детали.

В данной работе приводятся результаты исследований по апробации расчётно-экспериментального метода с использованием «образцов-свидетелей» для распространённых в машиностроении следующих конструкционных материалов: сталь 20, сталь 45, сталь 12X18H10T, алюминиевый сплав Д16Т. Из указанных материалов были изготовлены детали в виде сплошных и полых цилиндрических образцов с наружным диаметром  $D$  в гладкой части, диаметром отверстия  $d$ , диаметром наименьшего сечения надреза  $D_1$ .

Гладкие образцы из стали 20 подвергались пневмодробеструйной обработке, а из сталей 45 и 12Х18Н10Т, сплава Д16Т – гидродробеструйной обработке. После упрочнения на образцы наносились концентраторы в виде полукруглого надреза радиусом  $R = 0,3$  мм. В качестве «образцов-свидетелей» использовались втулки с наружным диаметром  $D = 51,5$  мм и внутренним  $d = 45$  мм из тех же материалов.

Расчётная часть исследований выполнялась с помощью метода конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Первоначальные остаточные деформации по толщине упрочнённого поверхностного слоя образцов моделировались методом термоупругости [4, 5].

При определении первоначальных деформаций в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  упрочнённого поверхностного слоя втулки (рис. 1, 2), которое было получено методом колец и полосок [6].

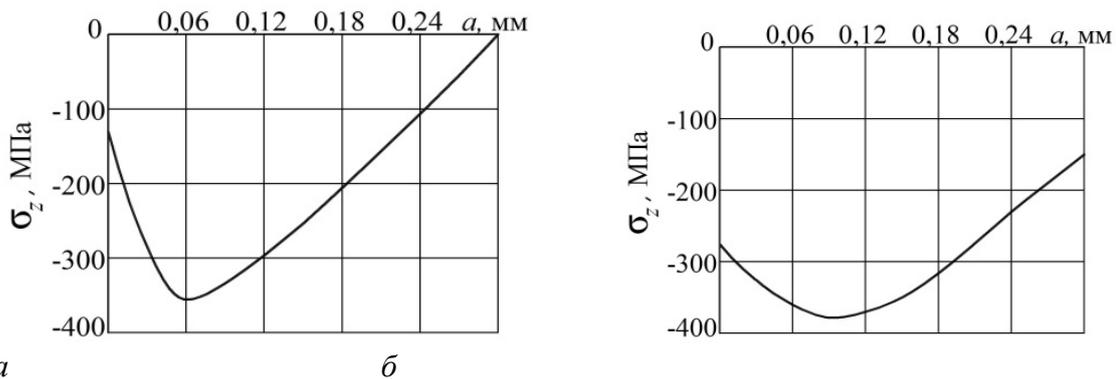


Рис. 1. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в «образцах-свидетелях» (втулки с  $D = 51,5$  мм,  $d = 45$  мм) из стали 20 (а) и стали 45 (б) после пневмодробеструйной обработки (а) и гидродробеструйной обработки (б)

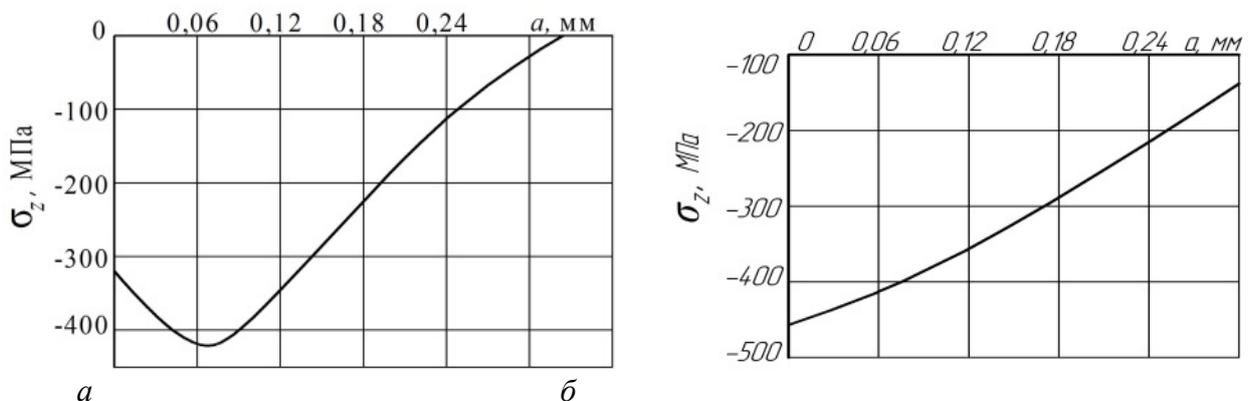


Рис. 2. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в «образцах-свидетелях» (втулки с  $D = 51,5$  мм,  $d = 45$  мм) из стали 12Х18Н10Т (а) и алюминиевого сплава Д16Т (б) после гидродробеструйной обработки

Распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в опасных сечениях образцов с надрезами рассчитывались аналитическим методом [1] и численным методом с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [4, 5]. Результаты представлены на рис. 3–6.

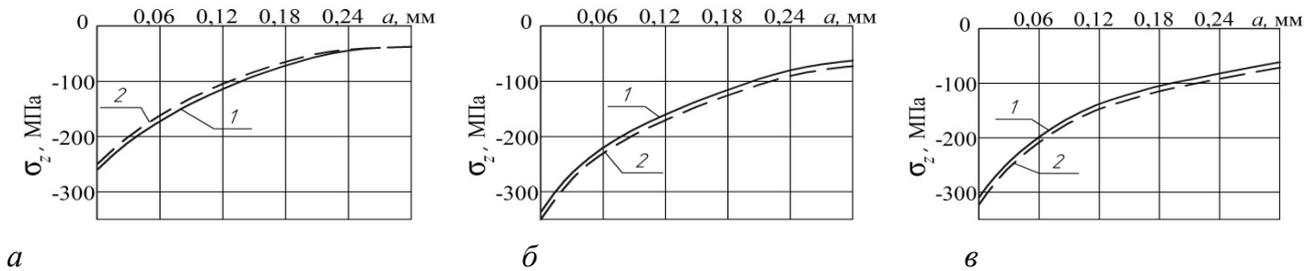


Рис. 3. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образцах из стали 20 с надрезом  $R = 0,3$  мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: (а) –  $D = 10$  мм,  $d = 0$ ; (б) –  $D = 25$  мм,  $d = 0$ ; (в) –  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм

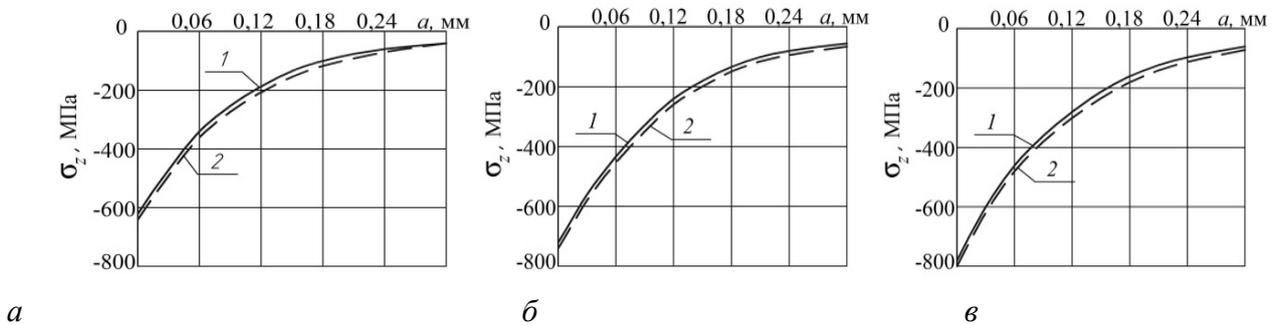


Рис. 4. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образцах из стали 45 с надрезом  $R = 0,3$  мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: (а) –  $D = 15$  мм,  $d = 5$  мм; (б) –  $D = 25$  мм,  $d = 15$  мм; (в) –  $D = 50$  мм,  $d = 40$  мм

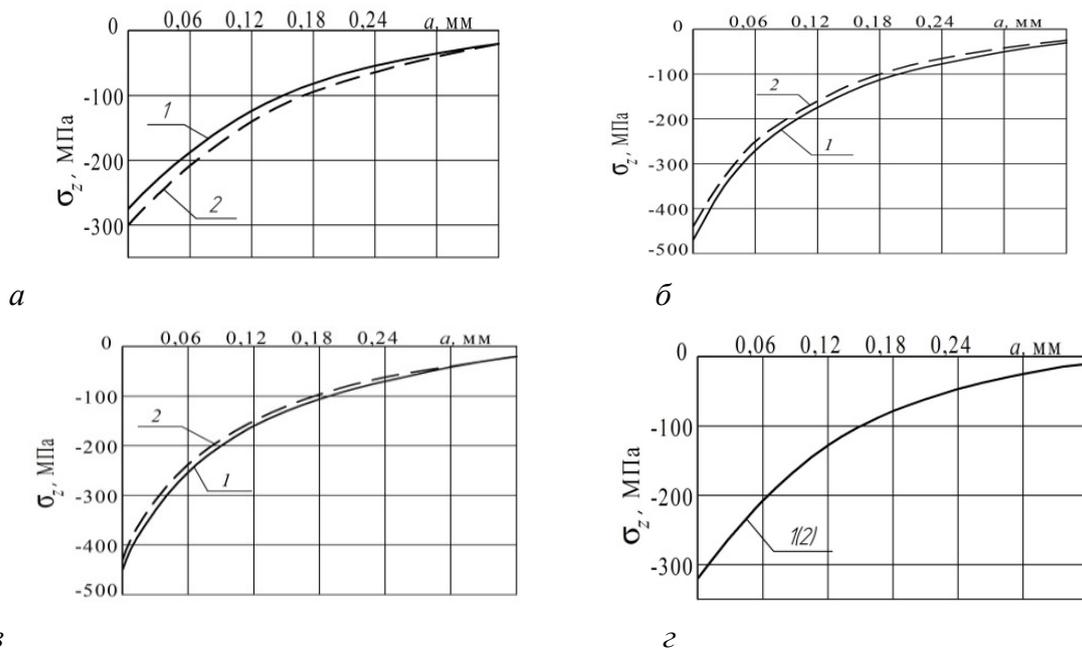


Рис. 5. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образцах из стали 12X18H10T с надрезом  $R = 0,3$  мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: (а) –  $D = 10$  мм,  $d = 0$  мм; (б) –  $D = 15$  мм,  $d = 0$  мм; (в) –  $D = 15$  мм,  $d = 5$  мм; (з) –  $D = 15$  мм,  $d = 10$  мм

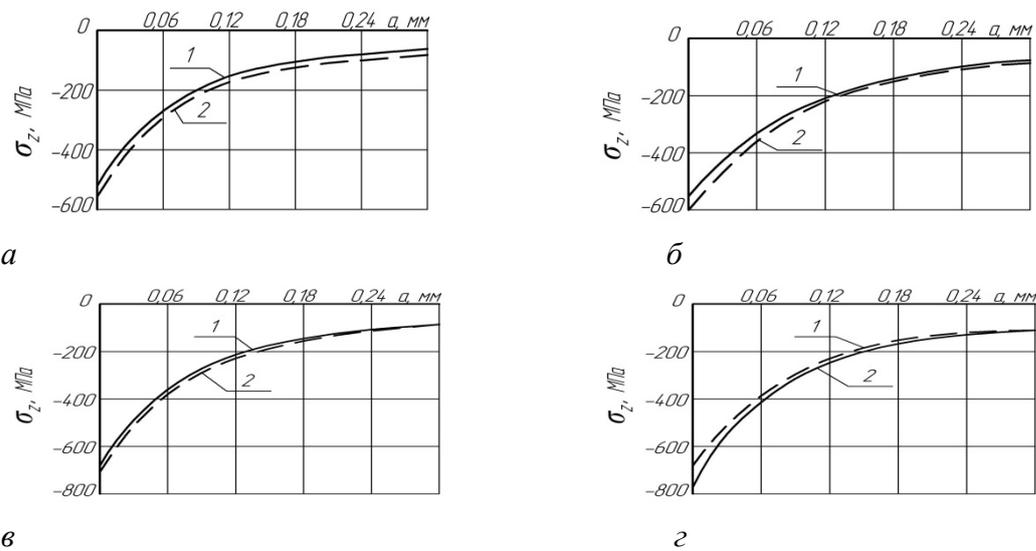


Рис. 6. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в деталях из сплава Д16Т с надрезом  $R = 0,3$  мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным:  
 $a - D = 10$  мм,  $б - D = 15$  мм,  $в - D = 25$  мм,  $г - D = 40$  мм

Результаты расчётов приращений пределов выносливости  $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$  и приращений  $(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$  по результатам испытаний на усталость (при изгибе с вращением в случае симметричного цикла) представлены в табл. 1–4.

Таблица 1. Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 20

$D$ , мм	$d$ , мм	$D_1$ , мм	$t_{\text{кр}}$ , мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , МПа	$\alpha_\sigma$	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$ , МПа	Расхождение, %
10	0	9.4	0.203	-122	2.7	0.393	48.0	45.0	6
25	0	24.4	0.527	-89	2.9	0.377	33.6	30.0	11
25	15	24.4	0.453	-91	3.0	0.369	33.5	32.5	3

Таблица 2. Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 45

$D$ , мм	$d$ , мм	$D_1$ , мм	$t_{\text{кр}}$ , мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , МПа	$\alpha_\sigma$	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$ , МПа	Расхождение, %
15	5	14.4	0.303	-159	2.8	0.385	61.2	57.5	6
25	15	24.4	0.453	-131	3.0	0.369	48.3	45.0	7
50	40	49.4	0.733	-87	3.1	0.361	31.4	30.0	4

Таблица 3. Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из стали 12Х18Н10Т

$D$ , мм	$d$ , мм	$D_1$ , мм	$t_{\text{кр}}$ , мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , МПа	$\alpha_\sigma$	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{расч}}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{\text{эксп}}$ , МПа	Расхождение, %
10	0	9.4	0.203	-129	2.54	0.406	52.4	45	16
15	0	14.4	0.311	-117	2.70	0.393	46	42.5	8
15	5	14.4	0.303	-119	2.63	0.399	47.5	42.5	12
15	10	14.4	0.249	-115	2.29	0.427	49.1	42.5	15

Таблица 4. Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами из алюминиевого сплава Д16Т

$D$ , мм	$D_1$ , мм	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\alpha_\sigma$	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{он}$ , МПа	Расхождение, %
10	9,4	0,203	-208	2,7	0,393	81,6	70	17
15	14,4	0,311	-166	2,8	0,385	63,8	57,5	11
25	24,4	0,527	-123	2,9	0,377	46,4	45	3
40	39,4	0,851	-78	3,1	0,361	28,2	30	6

Из представленных в табл. 1–4 данных видно, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости не превышает 11 % для стали 20, 7 % для стали 45, 16% для стали 12Х18Н10Т и 17% для алюминиевого сплава Д16Т. Следовательно, используя метод «образцов-свидетелей», можно с приемлемой для многоциклового усталости точностью прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей из различных конструкционных материалов в достаточно широком диапазоне изменения диаметров (10÷50 мм).

### Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
2. 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.
3. 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.
4. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN / В.П. Сазанов,

В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – №2(68). – С. 35–40.

5. Сазанов, В.П. Моделирование остаточного напряжённого состояния деталей в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса MSC.NASTRAN\MSC.PATRAN / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, О.Ю. Семёнова, А.В. Иванова // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. – 2012. – №1(33). – С. 106-113.

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

УДК 621.787:539.319

*Сазанов В.П., Письмаров А.В., Лунин В.В.,  
Анисимов С.А., Коваль И.Ю.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

При опережающем поверхностном пластическом деформировании (ОППД) технологическая операция изготовления концентратора с небольшой по размерам геометрической формой производится на предварительно упрочнённой заготовке. В этом случае сжимающие остаточные напряжения в области концентратора образуются за счёт перераспределения остаточных усилий гладкой упрочнённой поверхности детали. Влияние ОППД при обкатке роликом было изучено на партиях образцов с метрической резьбой М16х2, изготовленных из сталей 40Х и 30ХГСА [1, 2]. При этом половина заготовок диаметром 16 мм из каждой стали подвергалась обкатке на приспособлении с тремя роликами диаметром 50 мм и с профильным радиусом 13 мм при частоте вращения заготовки 400 об/мин и подаче 0,43 мм/об. Усилие обкатки составляло 10,75 кН. Затем на упрочнённых и неупрочнённых заготовках нарезалась резьба М16х2.

Испытания упрочнённых и неупрочнённых образцов на усталость было выполнено следующим образом. Образцы из стали 30ХГСА без гайки испытывались при симметричном цикле по схеме чистого изгиба, из стали 40Х с гайкой –