

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 –

при отнулевом положительном цикле в случае растяжения. База испытаний принималась $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения.

Исследование влияния ОППД на сопротивление усталости резьбовых деталей выполнено расчётно-экспериментальным методом, который основывается на использовании результатов лабораторного определения остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое и расчётах напряжённо-деформированного состояния методом конечно-элементного моделирования.

Остаточные напряжения в поверхностном слое гладких упрочнённых заготовок определялись методом колец и полосок [3]. Для этого образцы диаметром 16 мм предварительно растачивались до толщины стенки 2 мм. Дополнительные остаточные напряжения измерялись по методике работы [4] с помощью тензорезисторов. Остаточные напряжения сплошных образцов определялись как разность напряжений, вычисленных по результатам исследований колец и полосок, и дополнительных остаточных напряжений за счёт расточки. Распределение осевых остаточных напряжений σ_z гладких образцов из сталей 40Х и 30ХГСА приведено на рис. 1, на котором отсчёт координаты y выполнялся от поверхности к оси цилиндра. Из данных рис. 1 следует, что при одном и том же усилии обкатки роликом (10,75 кН) сжимающие остаточные напряжения в заготовках из стали 40Х ниже, чем в заготовках из стали 30ХГСА, что объясняется меньшими значениями предела текучести и предела прочности (табл. 1).

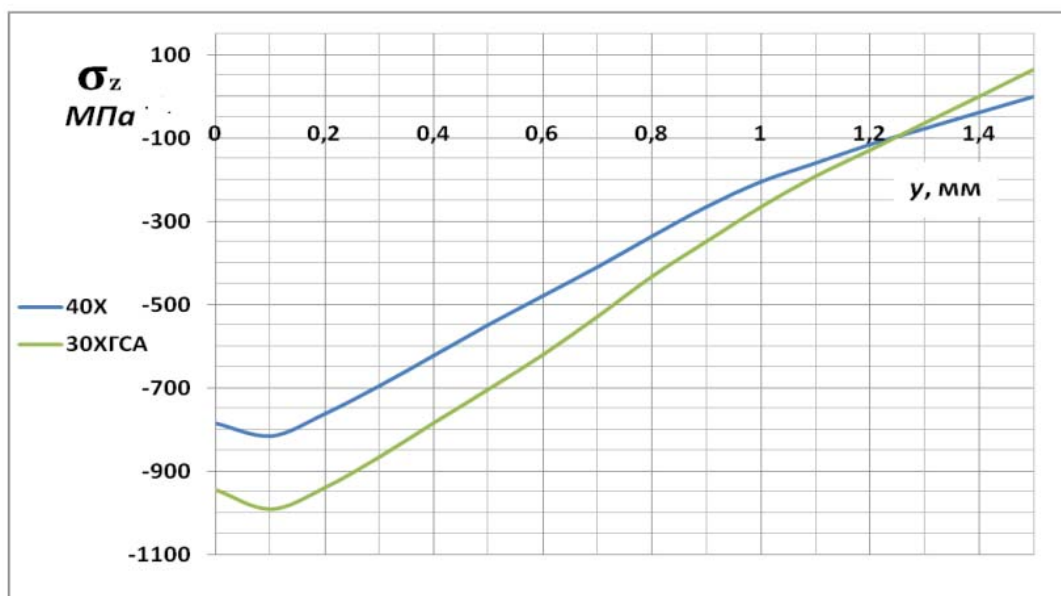


Рис. 1. Распределение осевых остаточных напряжений σ_z по толщине упрочнённого слоя в гладких заготовках после обкатки роликом

Таблица 1. Механические характеристики материалов образцов

Марка материала	σ_e , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ ,%	ψ ,%
30ХГСА	1040	940	11	46
40Х	750	440	18	61

Для воссоздания остаточного напряжённо-деформированного состояния был использован расчётный комплекс PATRAN/NASTRAN. Моделирование остаточных напряжений выполнено методом термоупругости, при котором распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя заменяется соответствующим температурным полем [5, 6]. Конечно-элементная модель гладкой заготовки в осесимметричной постановке представляет собой четверть сечения цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. Принятая длина расчётной области заготовки исключала влияние краевых зон для сечения, в котором величина осевых остаточных напряжений сравнивались с их экспериментальными значениями. При моделировании был использован треугольный шестиузловой осесимметричный конечный элемент типа 2D-Solid. На конечно-элементных моделях гладких заготовок из сталей 40Х и 30ХГСА были определены распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого слоя, которые обеспечивают соответствующие им экспериментальные зависимости остаточных напряжений (рис. 1). Данный расчёт был выполнен методом последовательных приближений за пять пошаговых приближений.

Конечно-элементные модели деталей с гладкими и резьбовыми частями были выполнены также в осесимметричной постановке, учитывая, что наклон витков резьбы весьма мал. Первоначальные деформации в виде соответствующих им температурных полей по толщине упрочнённого поверхностного слоя принимались из результатов их определения на моделях гладких заготовок.

Результаты расчёта распределений осевых σ_z остаточных напряжений по толщине наименьшего (опасного) поперечного сечения пяти впадин резьбы в виде графиков для образцов из сталей 40Х и 30ХГСА приведены на рис. 2 и 3. Нумерация впадин выполнена от гладкой части образцов в сторону резьбовой.

Из данных рис. 2 и 3 следует, что наибольшие сжимающие остаточные напряжения формируются во впадине первого витка резьбы. В последующих впа-

динах их уровень значительно ниже, причём начиная с третьей впадины распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения практически остаётся неизменным.

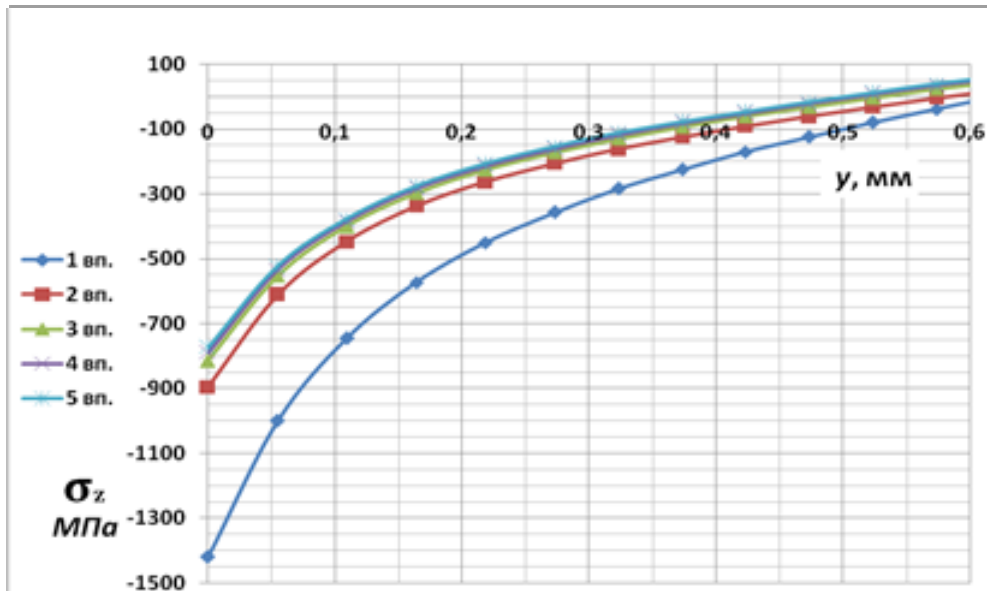


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения в наименьших сечениях впадин резьбы для образцов из стали 40X

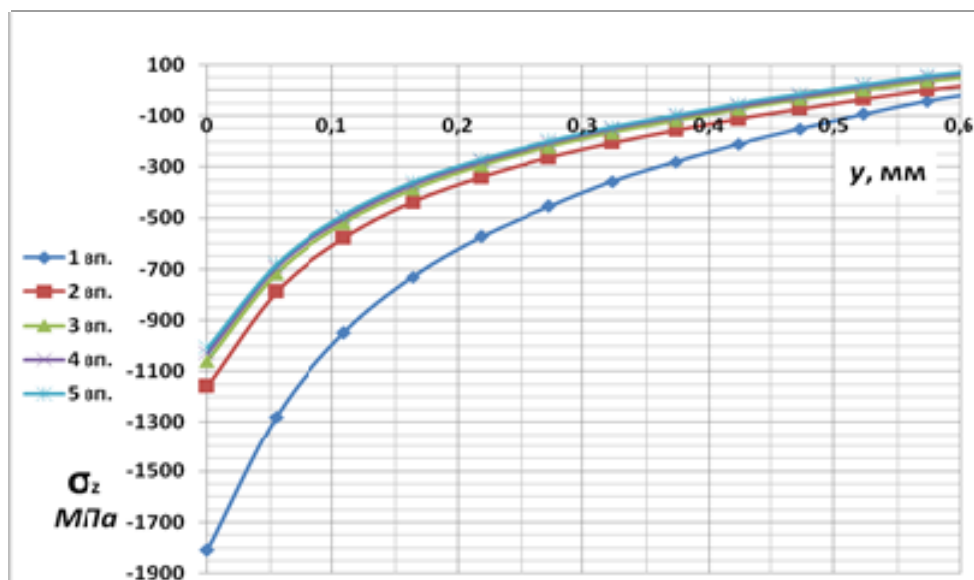


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения в наименьших сечениях впадин резьбы для образцов из стали 30XГСА

Оценка влияния обкатки роликом на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{Ra}$ резьбовых образцов с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [7, 8] проводилась по следующей зависимости:

$$\Delta\sigma_{Ra} = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (1)$$

где $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$.

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ вычислялись по толщине поверхностного слоя наименьшего (опасного) сечения впадины, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости [8, 9]. При расчёте критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ использовались распределения осевых σ_z остаточных напряжений в наименьших сечениях впадин резьбы, приведённые на рис. 2 и 3 и соответствующие зоне излома образцов.

В табл. 2 представлены значения средних напряжений σ_m при испытаниях на усталость образцов, предельные амплитуды циклов σ_{Ra} значения среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$, опытные $\Delta\sigma_{Ra}^{on}$ и расчётные $\Delta\sigma_{Ra}^{pac}$, значения приращений амплитуд.

При вычислении приращений $\Delta\sigma_{Ra}^{pac}$ для образцов без гайки из стали 30ХГСА коэффициент влияния $\bar{\psi}_\sigma$ принимался равным значению 0,36, а для образцов с гайкой из стали 40Х–0,11 [2, 10]. Приращение предела выносливости образцов из стали 30ХГСА составило 44%. Предельная амплитуда цикла напряжений образцов из стали 40Х за счёт упрочнения, предшествующего нарезанию резьбы, увеличилась на 41%.

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость резьбовых образцов М16х2

Материал	Усилие обкатки, кН	σ_m , МПа	σ_{Ra} , МПа	$\bar{\sigma}_{ocm}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$	$\Delta\sigma_{Ra}^{on}$, МПа	$\Delta\sigma_{Ra}^{pac}$, МПа
30ХГСА	0	0	284	0	-	0	0
	10,75	0	409	-372	0,36	125	134
40Х	0	93	93	0	-	0	0
	10,75	131	131	-363	0,11	38	40

Таким образом, опережающее поверхностное пластическое деформирование является эффективным способом повышения сопротивления усталости резьбовых деталей, причём во впадинах резьбы при таком упрочнении практически отсутствует наклёп. Следует отметить, что упрочнение без наклёпа дна впадин резьбы имеет преимущество для деталей, работающих при повышенных температурах, так как наклёп в опасном сечении детали в этом случае снижает сопротивление усталости [11].

Выводы

1) Близкие значения приращений предельной амплитуды цикла напряжений подтверждают возможность замены растяжения на изгиб при проведении испытаний на усталость [12].

2) Расчётные значения приращений предельных амплитуд достаточно близки к их опытным значениям, что указывает на возможность расчёта предела выносливости резьбовых деталей, изготовленных с использованием опережающего поверхностного пластического деформирования, без проведения испытаний на усталость.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости резьбовых деталей из сталей 30ХГСА и 40Х / В.Ф. Павлов, А.П. Филатов, Г.Ф. Мальков // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. – №3. – С. 15–20.

2. Иванов, С.И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Б.В. Минин, В.А. Кирпичёв, Е.П. Кочеров, В.В. Головкин. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2015. – 170 с.

3. 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.

4. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

5. 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.

6. Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторах напряжений по первоначальным деформациям / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15. – №4 (44). – С. 81–85.

11. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышевское книжное изд-во, 1968. – 131 с.

12. Кудрявцев, И.В. Повышение сопротивления усталости резьбовых деталей / И.В. Кудрявцев, В.Н. Чижик // Вестник машиностроения. – 1963. – №1. – С. 51–55.

УДК 621.787:4

*Сургутанов Н.А., Сургутанова Ю.Н., Чуриков Д.С.,
Салтанов С.А., Матвеев П.А.*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАЗМАХА
Порогового Коэффициента Интенсивности Напряжений
в Упрочнённых Деталях с Надрезами**

В процессе эксплуатации в деталях, работающих при переменных нагрузках, накапливаются дефекты, которые приводят к образованию трещин и последующему нарушению работоспособности деталей. Необходимо анализировать рост трещины и не допускать достижения ею критического размера, при котором