

УДК 621.787:539.319

В. Ф. Павлов¹, д-р техн. наук, проф., **Ю. Н. Петрова**², канд. техн. наук, доц.,
В. С. Вакулюк¹, д-р техн. наук, доц., **В. П. Сазанов**¹, канд. техн. наук, доц.,
Ю. А. Катанаева², ст. преп.

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика
С. П. Королёва, Россия

²Донецкий национальный университет экономики и торговли имени
Михаила Туган-Барановского

Тел./Факс: 89862674526; 810380506486990;

E-mail: sopromat@ssau.ru; yunic2016@mail.ru

НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ УСТАЛОСТИ ВИДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Экспериментальные исследования проведены на болтах М6 из сплава ВТ16 с накатанной роликами резьбой по различным вариантам и на азотированных образцах с V-образным надрезом из сталей ВНС40 и 38Х2МЮА. Установлено, что наибольшее сопротивление усталости упрочнённых деталей и образцов наблюдается в том случае, когда распределение сжимающих остаточных напряжений является наиболее полным по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Ключевые слова: *поверхностное упрочнение, остаточные напряжения, сопротивление усталости.*

V. F. Pavlov, YU. N. Petrova, V. S. Vakulyuk, V.P. Sazanov, YU.A. Katanaeva

APPOINTMENT OF THE OPTIMAL FOR FATIGUE RESISTANCE TYPES OF SURFACE HARDENING OF DETAILS WITH THE USE OF RESIDUAL VOLTAGE DISTRIBUTION

Experimental studies on M6 bolts made of VT16 alloy with rolled threads according to various options and on nitrated samples with a V-notch made of VNS40 and 38X2MYOA steels. It was found that the greatest resistance of parts is within the extreme critical depth, when the distribution of compressive residual stresses is the most complete over the thickness of the surface layer of the section, equal to the critical depth.

Keywords: *surface hardening, residual stresses, fatigue resistance.*

1. Введение

В практике современного машиностроения с целью повышения работоспособности деталей широкое применение находят различные методы поверхностного упрочнения. В работе [1] было установлено, что ответственными за повышение предела выносливости за счёт упрочнения в условиях концентрации напряжений являются сжимающие остаточные напряжения, создаваемые в поверхностном слое детали. Поэтому, чтобы сократить длительные и дорогостоящие испытания на усталость, представляется возможным прогнозировать сопротивление усталости деталей с концентраторами при отработке технологии их упрочнения по остаточным напряжениям. Разработанные к настоящему времени методы определения остаточных напряжений в надрезах, галтелях, резьбе, впадинах шлиц и шестерён позволяют с достаточной точностью определять остаточные напряжения в наиболее опасном сечении детали, где происходит зарождение и развитие трещин усталости [2-4].

Зная остаточные напряжения, следует ещё выяснить, какие напряжения необходимо учитывать при вычислении приращения предела выносливости: на поверхности

концентратора, максимальные, если имеется спад напряжений к поверхности, или средние на некоторой глубине опасного сечения детали. Известные количественные оценки основаны на учёте остаточных напряжений на поверхности концентратора или наибольших, если наблюдается подповерхностный максимум.

Опыты, описанные в работах [5, 6], указывают на то, что сопротивление усталости зависит от характера распределения остаточных напряжений по сечению деталей, а в [7, 8] было высказано предположение о необходимости учёта остаточных напряжений по толщине, равной глубине нераспространяющихся трещин, которые всегда имеются в упрочнённых деталях с концентраторами напряжений. В статье [8] был указан и путь реализации этого предложения, основанный на введении в расчёт приращения предела выносливости за счёт поверхностного упрочнения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисляемого по следующей формуле:

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma_z(\vartheta) d\vartheta, \tag{1}$$

где $\sigma_z(\vartheta)$, $\sigma_\varphi(\vartheta)$, $(\sigma_z(\xi), \sigma_\varphi(\xi))$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором; $\bar{\sigma}_{ост}$ вычисляется по толщине опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$. Если в формуле (1) заменить переменную интегрирования, то она примет более удобный для использования на практике вид

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

где $\xi = y/t_{кр} = \cos \vartheta$ – расстояние от дна концентратора (рис. 1) до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$.

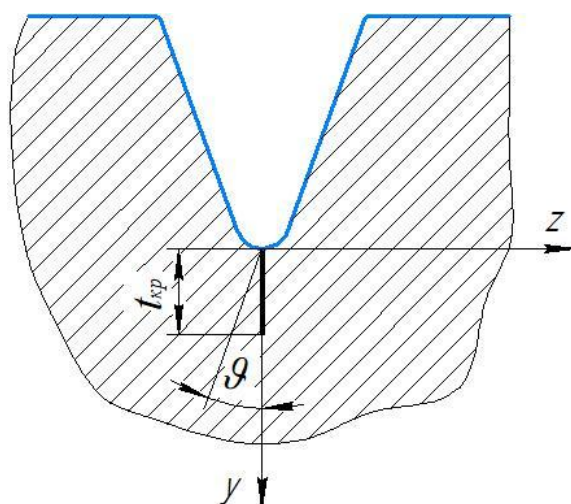


Рисунок 1. Нераспространяющаяся трещина усталости в детали с концентратором напряжений

В работе [8] для различных толщин слоя с остаточными напряжениями был введён коэффициент влияния остаточных напряжений $\bar{\psi}_\sigma$, используемый для определения приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ за счёт сжимающих остаточных напряжений по формуле

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ост}|. \quad (3)$$

Из (1) – (3) следует, что наибольший эффект от упрочнения будет получен, если назначать такие режимы обработки, чтобы значение $\bar{\sigma}_{ост}$ было наибольшим по толщине поверхностного слоя детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$.

2. Основное содержание и результаты исследования

Для экспериментального подтверждения высказанных выше положений были проведены опыты с четырьмя партиями болтов М6 из сплава ВТ16, накатанных одним комплектом роликов. Первая партия болтов была накатана с незаполненным контуром, вторая – с заполненным, третья – после накатывания с незаполненным контуром была отожжена в вакууме при температуре 550° с целью снятия остаточных напряжений, четвёртая – после отжига упрочнена микрочастицами на дробемётной установке.

Результаты определения меридиональных σ_φ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в резьбе болтов по методике работы [4] представлены на рис. 2, а данные испытаний на многоцикловую усталость на базе 10^7 циклов нагружения при среднем напряжении $\sigma_m = 330$ МПа – в таблице 1, где $\sigma_{ан}$ – предельная амплитуда переменных напряжений. Сопоставляя данные рис. 2 и таблицы 1, можно видеть, что связи между остаточными напряжениями на поверхности впадин резьбы или максимальными остаточными напряжениями и приращением предельной амплитуды $\Delta\sigma_{ан}$ не наблюдается. Так, в четвёртой партии болтов остаточные напряжения на поверхности впадин наибольшие, однако $\Delta\sigma_{ан}$ наименьшее по сравнению с первой и второй партиями, имеющими более полные эпюры остаточных напряжений. При практически одинаковых остаточных напряжениях на поверхности впадин резьбы приращение предельной амплитуды для первой партии болтов с наиболее полным распределением остаточных напряжений в 1,5 раза выше, чем для второй партии.

По формуле (2) были вычислены среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ по толщине поверхностного слоя впадин резьбы, равной 0,1 мм. Именно такую глубину составляли в среднем нераспространяющиеся трещины усталости, обнаруженные в выстоявших базу испытаний болтах. Величины $\bar{\sigma}_{ост}$ приведены в таблице 1, где даны также значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Видно, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ для всех партий болтов примерно одинаков, что указывает на правомерность введения интегральной оценки влияния остаточных напряжений, учитывающей полноту их распределения, на приращение предела выносливости.

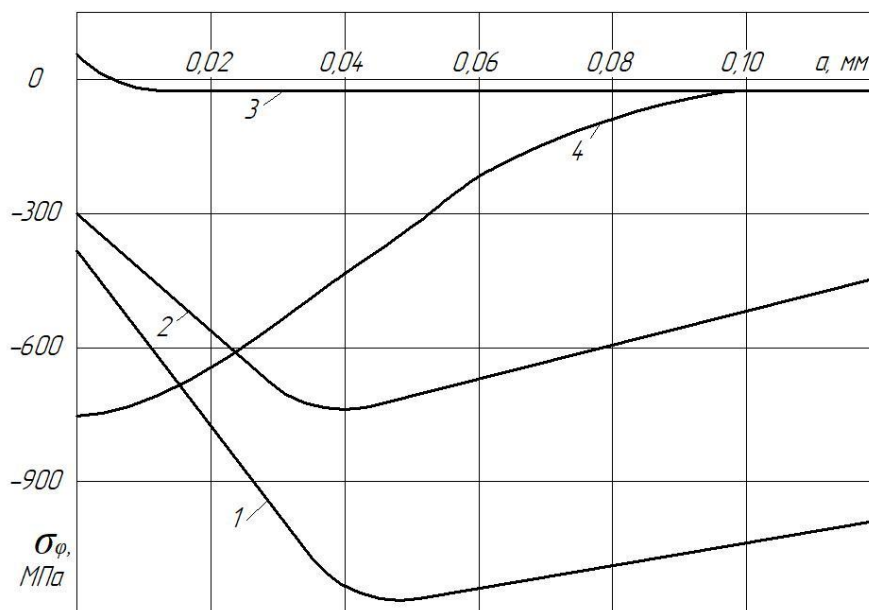


Рисунок 2. Остаточные напряжения в резьбе болтов М6 из сплава ВТ16:
 1 – с незаполненным контуром, 2 – с заполненным контуром, 3 – после отжига,
 4 – после отжига и упрочнения микрошариками

Таблица 1. – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений болтов М6 из сплава ВТ16

Партия болтов	Технология изготовления	σ_{an} , МПа	$\Delta\sigma_{an}$, МПа	$\bar{\sigma}_{ocm}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma} = \frac{\Delta\sigma_{an}}{ \bar{\sigma}_{ocm} }$
1	накатывание	97	59	-940	0,063
2	накатывание	78	40	-670	0,059
3	накатывание+отжиг 550°С, 1,5 часа	38	0	0	–
4	накатывание+отжиг 550°С, 1,5 часа+упрочнение микрошариками	62	24	-390	0,062

Были проведены также эксперименты на цилиндрических образцах с надрезами V-образного профиля диаметром 7,5 мм в наименьшем сечении (рис. 3) из сталей ВНС40 и 38Х2МЮА, подвергавшихся азотированию. Меридиональные σ_{ϕ} (осевые σ_z – в наименьшем сечении) остаточные напряжения определялись методом, изложенным в работе [3], и по глубине поверхностного слоя a опасного сечения образцов представлены на рис. 4.

Из представленных на рис. 4 данных видно, что после азотирования сжимающие остаточные напряжения в образцах из стали ВНС40 имеют второй подповерхностный максимум на глубине 0,18 мм. В опасном сечении образцов из стали ВНС40 толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями составляет 0,37 мм, из стали 38Х2МЮА – 0,31 мм. Следовательно, распределение сжимающих остаточных напряжений в образцах из стали ВНС40 после азотирования является более полным, чем в образцах из стали 38Х2МЮА.

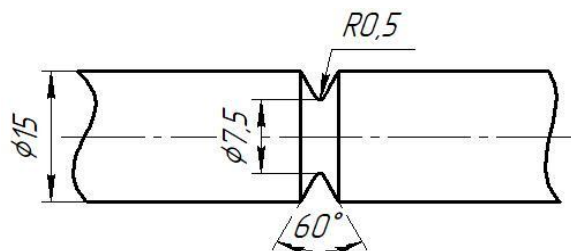


Рисунок 3. Рабочая часть образцов с V-образным надрезом из сталей ВНС40 и 38Х2МЮА

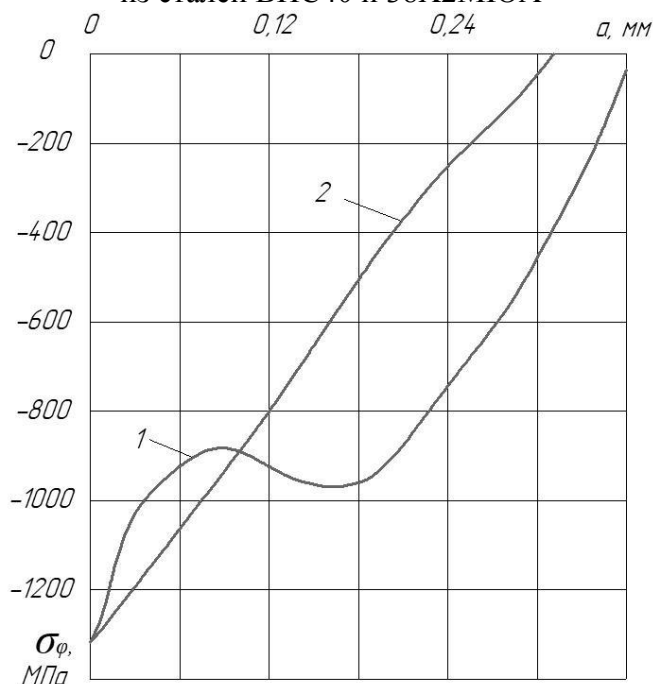


Рисунок 4. Остаточные напряжения в образцах с надрезами из сталей ВНС40 (1) и 38Х2МЮА (2)

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла образцов с V-образным надрезом проводились на машине МУИ-6000, база испытаний – $5 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения предела выносливости σ_{-1} приведены в таблице 2. Из данных таблицы 2 видно, что при практически одинаковых остаточных напряжениях на поверхности дна надреза (рис. 4), приращение предела выносливости после азотирования образцов из стали ВНС40 на 70 МПа больше, чем образцов из стали 38Х2МЮА. Это различие объясняется более полным распределением сжимающих остаточных напряжений в образцах из стали ВНС40, чем в образцах из стали 38Х2МЮА.

Таблица 2. – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов с V-образными надрезами

Материал	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы		
		σ_{-1} , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
ВНС40	200	560	-947	0,380
38Х2МЮА	165	455	-816	0,356

Из представленных в таблице 2 данных можно видеть, что среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ составляет 0,368 и незначительно отличается от $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленного экспериментально в работах [8-10] для образцов и деталей из других материалов с такой же степенью концентрации напряжений.

3. Заключение

Проведённые исследования показывают, что для назначения наиболее оптимальных по сопротивлению усталости видов и режимов упрочняющей обработки необходимо стремиться к тому, чтобы сжимающие остаточные напряжения в деталях с концентраторами напряжений были не только выше по максимуму, но и имели как можно более полное распределение по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Иванов, С. И. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
2. Павлов, В. Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В. Ф. Павлов, А. К. Столяров, В. С. Вакулюк, В. А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
3. 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.
4. 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.
5. Туровский, М. Л. Упрочняющая обработка роликами азотированных стальных деталей / М. Л. Туровский, Р. А. Новик // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39-42.
6. Смагленко, Ф. П. Влияние распределения остаточных напряжений на усталостную прочность твёрдого сплава ВК15 / Ф. П. Смагленко // Проблемы прочности. – 1980. – №8. – С. 35-38.
7. Рудницкий, Н. М. Некоторые закономерности усталостного разрушения деталей машин, упрочняемых остаточными напряжениями / Н. М. Рудницкий // Проблемы прочности. – 1980. – №1. – С. 29-34.
8. 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.
9. Сазанов, В. П. Оценка эффективности упрочняющей обработки цилиндрических деталей из конструкционных сталей / В. П. Сазанов, В. Ф. Павлов, О. Ю. Семёнова, А. А. Прохоров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т.17. – №2. – С. 164-173.
10. Павлов, В. Ф. Применение первоначальных деформаций в исследованиях остаточного напряжённо-деформированного состояния упрочнённых деталей / В. Ф. Павлов, В. П. Сазанов, В. С. Вакулюк, В. К. Шадрин // Насосы. Турбины. Системы. – 2019. – №1 (30). – С. 76-81.

Поступила в редколлегию 24.01.2021 г.