

УДК 621.787:539.319

СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ТРУБНЫХ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1953Т1

**В.А. Кирпичёв¹, А.В. Иванова¹, А.П. Филатов¹, О.С. Афанасьева²,
И.А. Мазуренко²**

¹Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34,

E-mail: sopromat@ssau.ru

²Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: afa@pm.samgtu.ru

Проведенные исследования влияния различных режимов опережающего поверхностного пластического деформирования трубных резьбовых образцов из высокопрочного алюминиевого сплава 1953Т1 на многоцикловую усталость показали, что оптимальным вариантом упрочнения является режим обкатки роликами, при котором толщина стенки трубной заготовки уменьшается на 1,5 мм. Установлено, что между приращением предела выносливости упрочненных резьбовых образцов и характером распределения сжимающих остаточных напряжений наблюдается прямая корреляция, которая хорошо описывается с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. На основании проведенного исследования предложена методика прогнозирования приращения предела выносливости поверхностно упрочненных резьбовых деталей из алюминиевого сплава 1953Т1 по распределению остаточных напряжений.

Ключевые слова: трубные резьбовые образцы, поверхностное упрочнение, предел выносливости, среднеинтегральные остаточные напряжения.

Во многих отраслях промышленности успешно применяются различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Процесс пластического деформирования поверхностного слоя может быть выполнен по схемам качения, скольжения или внедрения и зависит от многих факторов, таких как механические характеристики материала, форма, усилие и скорость перемещения деформирующего элемента. После такого процесса в поверхностном слое происходят структурные изменения, возникает наклеп и формируются сжимающие остаточные напряжения.

В соответствии с ГОСТ 18296-72 поверхностное деформирование при качении инструмента по поверхности детали называется накатыванием. В свою оче-

Виктор Алексеевич Кирпичёв (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Сопротивление материалов».

Алина Всеволодовна Иванова, аспирант кафедры «Сопротивление материалов».

Анатолий Петрович Филатов (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Сопротивление материалов».

Ольга Сергеевна Афанасьева (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Прикладная механика и информатика».

Ирина Александровна Мазуренко, аспирант кафедры «Прикладная механика и информатика».

редь, накатывание подразделяется на обкатывание и раскатывание в зависимости от того, какая поверхность обрабатывается. В зоне контакта деформирующего элемента и обрабатываемой поверхности возникает локальный очаг пластической деформации, который перемещается вместе с инструментом, благодаря чему поверхностный слой последовательно деформируется на определенную глубину. Определяющей задачей процесса упрочнения поверхностного слоя является подбор и оптимизация режимов обкатывания с целью получения наилучших эксплуатационных характеристик деталей.

Необходимо подчеркнуть, что обработка, основанная на пластическом деформировании тонкого поверхностного слоя, имеет по сравнению с механической обработкой со снятием стружки (точение, шлифование) ряд преимуществ: сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура поверхностного слоя; плавно и стабильно повышается микротвердость поверхности; уменьшается шероховатость поверхности в несколько раз за один рабочий ход; создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое. Указанные и другие преимущества методов ППД обеспечивают повышение сопротивления усталости, износостойкости, контактной выносливости и других эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей.

Традиционными областями применения алюминия считаются авиация, атомная энергетика и автомобилестроение. Между тем из сплавов на основе «крылатого металла» уже несколько десятилетий изготавливаются трубы для нефтегазовой отрасли. Сравнительно небольшая плотность алюминиевых сплавов, высокая удельная прочность в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью в агрессивных средах обеспечили применение алюминиевых труб при добыче нефти и газа. Усложнение конструкции и компоновки, повышение требований к надежности, долговечности и материалоемкости конструкций бурильного оборудования приводят к появлению все большего числа деталей сложной формы с резкими концентраторами напряжений. Прочностные расчеты резьбовых соединений бурильных труб принято вести для сечения по впадине первого витка резьбы, находящегося в зацеплении с резьбой, навинчиваемой на трубу детали.

Конструктивные методы повышения прочности приводят к увеличению массы трубы, поэтому основным резервом повышения эксплуатационных характеристик бурильных труб является использование высокопрочных алюминиевых сплавов и применение современных видов и средств поверхностного упрочнения резьбовых соединений. Прочностные свойства стальных бурильных труб выше, чем алюминиевых, но если учесть, что основной запас прочности уходит на нагрузки, формируемые собственным весом колонны, то применение алюминиевых труб становится более эффективным.

Для повышения эксплуатационных характеристик резьбовых конструкций, изготовленных из высокопрочных алюминиевых сплавов, представляет интерес технологическая операция опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) с последующим изготовлением резьбы в пределах толщины упрочненного слоя. Во многих работах [1-7] упрочнение ОППД выполнялось на деталях, изготовленных из стали и титана. В указанных работах отмечено существенное увеличение сопротивления усталости после опережающего поверхностного пластического деформирования поверхностного слоя, что объясняется созданием благоприятных сжимающих остаточных напряжений в концентраторах за счет перераспределения остаточных усилий гладкой упрочненной заготовки.

В настоящем исследовании при упрочнении ОППД (рис. 1) трубных заготовок из алюминиевого сплава 1953Т1 ($\sigma_T = 470$ МПа, $\sigma_b = 520$ МПа, $\delta = 6,5\%$, $\psi = 12,5\%$, $S_K = 610$ МПа) в качестве основного контролирующего параметра настроек технологического процесса была использована толщина стенки, то есть режимы обкатывания (варианты) определялись конечной толщиной стенки трубной заготовки с наружным диаметром 70 мм и внутренним 50 мм. Такой подход к выполнению операции упрочнения опережающим поверхностным пластическим деформированием можно достаточно легко внедрить в серийное производство бурильных труб, что оправдано стабильностью технологического процесса формирования толщины упрочненного поверхностного слоя, в пределах которого в дальнейшем наносится резьба.



Рис. 1. Обкатывание трубной заготовки роликами

Были выбраны следующие варианты режимов обкатывания трубных заготовок:

- режим 0,5 – стенка трубной заготовки после обкатки роликами уменьшалась на 0,5 мм;
- режим 1,0 – стенка трубной заготовки после обкатки роликами уменьшалась на 1,0 мм;
- режим 1,5 – стенка трубной заготовки после обкатки роликами уменьшалась на 1,5 мм;
- режим 2,0 – стенка трубной заготовки после обкатки роликами уменьшалась на 2,0 мм.

Для определения остаточных напряжений, наведенных в поверхностном слое различными режимами упрочнения, гладкие трубные заготовки (рис. 2) разрезались на кольца и полоски, которые использовались затем для определения остаточных напряжений известным методом колец и полосок [8].



Рис. 2. Трубная заготовка после обкатывания роликами

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких заготовок приведено на рис. 3. Исследования показали, что заготовки из высокопрочного алюминиевого сплава 1953Т1 из-за ограниченного запаса пластичности материала после обкатки роликами на режиме 2,0 имели на поверхности видимые дефекты – микротрещины, сквозные трещины и отслоения. Поэтому заготовки, прошедшие упрочнение на режиме 2,0, из дальнейших исследований были исключены.

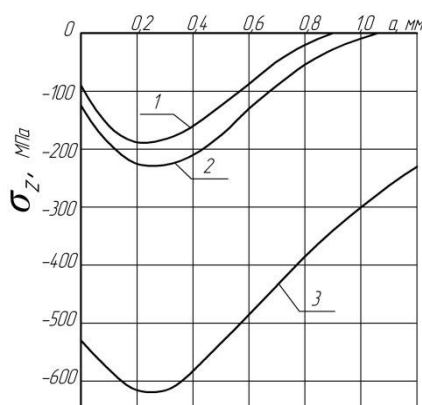


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в трубных заготовках после различных режимов упрочнения: 1 – режим 0,5; 2 – режим 1,0; 3 – режим 1,5

Наибольшие сжимающие остаточные напряжения величиной -625 МПа наблюдались в заготовках, упрочненных по режиму 1,5. Кроме этого, глубина залегания сжимающих напряжений в этом случае упрочнения также наибольшая, составляющая 2,1 мм. Такой характер распределения сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое дает основание считать режим 1,5 оптимальным из исследованных по сопротивлению усталости.

Следует обратить внимание на то, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в трубных заготовках превышает не только предел текучести, но и предел прочности материала 1953Т1. Наблюдаемому явлению дано объяснение в работе [10], в которой показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое деталей мо-

жет превышать даже сопротивление разрыву S_K материала на 15 %. Этот предел в исследуемом случае не превышен.

Остаточные напряжения в упрочненных ОППД резьбовых образцах определялись численным методом с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [11].

После нарезания резьбы на неупрочненных и упрочненных роликами трубных заготовках резьбовые образцы подвергались испытаниям на усталость с целью определения предела выносливости σ_{-1} при изгибе в случае симметричного цикла; база испытаний – $5 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Определение предела выносливости проводилось методом ступенчатого изменения нагрузки (метод «вверх-вниз») [9]. Этот метод является простым и надежным при определении среднего значения предела выносливости и его среднего квадратического отклонения. Результаты испытаний на усталость приведены в таблице.

Резьбовые образцы, прошедшие базу испытаний без разрушения при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при напряжении, большем предела выносливости. Во всех образцах со сжимающими остаточными напряжениями были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, значения $t_{кр}$ которых приведены в таблице. Необходимо отметить, что измеренные в данном исследовании величины критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости соответствуют установленной в работах [6, 12] для деталей с отверстием зависимости

$$t_{кр} = 0,0216D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (1)$$

где D – диаметр опасного сечения детали; d – диаметр отверстия.

Результаты испытаний на усталость резьбовых образцов из сплава 1953Т1

Режим упрочнения	σ_{-1} , МПа	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
Без упрочнения	98	–	–	–
0,5	105	1,14	-63	0,103
1,0	110	1,18	-107	0,112
1,5	135	1,17	-336	0,110
2,0	85	–	–	–

Были также проведены сравнительные испытания на усталость при одинаковом напряжении 100 МПа резьбовых образцов, изготовленных из материала 1953Т1 в состоянии поставки (неупрочненные образцы), и упрочненных по режиму 1,5 (упрочненные образцы). Результаты испытаний на усталость показали значительное (более 200 %) увеличение количества циклов до разрушения у резьбовых образцов, упрочненных по режиму 1,5, в сравнении с неупрочненными образцами в состоянии поставки.

Оценка влияния ОППД на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ резьбовых образцов проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [6, 13, 14]:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (2)$$

где $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$;

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали с концентратором по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости (см. таблицу).

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента влияния поверхностного упрочнения $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленные по формулам (2) и (3), приведены в таблице. Величина коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ сравнивалась со значением этого коэффициента, определенным по зависимости работ [15, 16], полученной на основании обработки большого количества экспериментальных данных:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (4)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Методом конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [11, 17, 19] было установлено, что для изгиба исследуемого резьбового соединения коэффициент $\alpha_\sigma = 6,45$. При таком значении α_σ коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленный по зависимости (4), составляет 0,096. Из данных таблицы следует, что полученная расчетным методом величина коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ отличается от экспериментально определенной не более чем на 14 %.

Выводы

1. На основании проведенных исследований на усталость установлено, что оптимальным вариантом упрочнения роликами при опережающем поверхностном пластическом деформировании резьбовых образцов из высокопрочного алюминиевого сплава 1953T1 является режим 1,5.

2. Результаты испытаний на усталость резьбовых образцов соответствуют характеру распределения остаточных напряжений в упрочненных гладких заготовках, причем при режиме 1,5 наблюдается наиболее полное распределение сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя.

3. Оценка влияния поверхностного упрочнения резьбовых образцов на многоцикловую усталость по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ показала, что прогнозируемое приращение предела выносливости при изгибе отличается от экспериментального не более чем на 14 %.

4. Для прогнозирования приращения предела выносливости трубных резьбовых образцов после ОППД вначале определяются остаточные напряжения в образцах после нанесения резьбы. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости вычисляется по формуле (1), критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ – по формуле (3), коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния упрочнения на предел выносливости – по зависимости (4). После определения

значений $\bar{\sigma}_{ост}$ и $\bar{\psi}_{\sigma}$ по формуле (2) рассчитывается приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ упрочненной трубной резьбовой детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцев И.В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. – М.: Машгиз, 1951. – 278 с.
2. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 3. – С. 88-95.
3. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Прохоров А.А. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1988. – № 5. – С. 31-33.
4. Кирпичёв В.А., Семёнова О.Ю., Павлов В.Ф., Чирков А.В. Закономерности распределения дополнительных остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических деталях с кольцевыми надрезами полукруглого профиля // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2010. – № 1(20). – С. 121-126.
5. Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А., Павлов В.Ф., Чирков А.В. Влияние радиуса надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании на предел выносливости деталей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – №3(27). Ч. 4. – С. 44-49.
6. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
7. Радченко В.П., Кирпичёв В.А., Павлов В.Ф., Чирков А.В. Влияние радиуса надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании на предел выносливости деталей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3(27). – Ч. 4. – С. 44-49.
8. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
9. Стеннов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
10. 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 НАНУ, 2011. – С. 354-357.
11. Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3(27). Ч. 3. – С. 171-174.
12. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37-40.
13. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.
14. Павлов В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – № 7. – С. 3-6.
15. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 678-685.
16. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 4(44). – С. 81-85.
17. Сазанов В.П. Исследование распределения компонентов остаточного напряженного состояния в области наименьшего сечения поверхностно упрочненной детали с кольцевым надрезом // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3(34). – С. 162-165.
18. Сазанов В.П., Ларионова Ю.С., Колычев С.А. Закономерности распределения компонентов остаточного напряженного состояния в окрестности наименьшего сечения упрочненной по-

- лой цилиндрической детали с кольцевым надрезом // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3(34). – С. 162-165.
19. Сазанов В.П., Чирков А.В., Семёнова О.Ю., Иванова А.В. Моделирование остаточного напряженного состояния деталей в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса NASTRAN/PATRAN // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 1(33). – С. 106-114.

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2014 г.

SURFACE HARDENED THREADED PIPE PARTS MADE OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOY 1953T1 FATIGUE RESISTANCE

**V.A. Kirpichev¹, A.V. Ivanova¹, A.P. Filatov¹, O.S. Afanacieva²,
I.A. Mazurenko²**

¹Samara State Aerospace University
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: sopromat@ssau.ru

²Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: afa@pm.samgtu.ru

Outstripping superficial plastic deforming various regimes influence on polycyclic fatigue of threaded pipe specimens made of high-strength aluminum alloy 1953T1 has been examined. It's been shown that the most optimal type of hardening is rolling regime when pipe piece wall depth decrease by 1,5 mm. It's established that there's a direct correlation between hardened threaded specimens endurance limit increase and compressive residual stresses distribution character. This fact is well characterized using the average integral residual stresses criterion. Endurance limit increase prediction method for surface hardened threaded parts made of aluminum alloy 1953T1 using residual stresses distribution has been proposed.

Keywords: threaded specimens, surface hardening, endurance limit, average integral residual stresses.

Victor A. Kirpichev, Doctor of Technical Sciences, professor of the Strength of Materials Department.

Alina V. Ivanova, post-graduate student of the Strength of Materials Department.

Anatoly P. Filatov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Strength of Materials Department.

Olga S. Afanacieva, Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Applied Mathematics and Informatics Department.

Irina A. Mazurenko, post-graduate student of the Applied Mathematics and Informatics Department.