

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЗА СЧЁТ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАРЕЗАНИИ РЕЗЬБЫ СУЛЬТРАЗВУКОМ

© 2016 В.В. Головкин

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

Представлены результаты исследования влияния ультразвука на повышение сопротивления усталости резьбовых деталей.

Ключевые слова: усталостная прочность, ультразвук, нарезание резьбы, остаточные напряжения

Ресурс работы резьбовых деталей, у которых впадина резьбы является концентратором напряжений, в значительной степени зависит от различных характеристик сопротивления усталости, на которые, в свою очередь, оказывают существенное влияние величина и характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. На основании проведенных исследований формирования остаточных напряжений в поверхностном слое резьбовых деталей можно установить взаимосвязь с сопротивлением усталости и провести исследования влияния остаточных напряжений на изменение предельной амплитуды цикла нагружения резьбовых деталей, изготовленных с различными по направлению ультразвуковыми колебаниями.

Резьбовые детали, как правило, эксплуатируются при асимметричных циклах со средними растягивающими напряжениями. Выявление связи между средним напряжением от усилия затяжки и предельной амплитудой цикла для резьбовых деталей представляется весьма важным, так как позволяет в значительной мере сократить испытания на усталость.

Благоприятное влияние сжимающих остаточных напряжений проявляется следующим образом. При асимметричном цикле со средними сжимающими напряжениями предельная амплитуда σ_a увеличивается с ростом среднего сжимающего напряжения, а если напряжения от внешних нагрузок в детали меняются по симметричному циклу и в поверхностном слое детали действуют постоянные сжимающие остаточные напряжения, то результирующие суммарные напряжения изменяются по асимметричному циклу со средним сжимающим напряжением (рис. 1).

С помощью специальной методики [1] были проведены исследования влияния остаточных напряжений, сформированных во впадинах резьбы при её формообразовании с наложением различ-

ных по направлению вынужденных ультразвуковых колебаний, на предельную амплитуду цикла.

Экспериментальные результаты могут быть обработаны по этому методу с использованием соотношения вида:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi(\sigma_{ост} + \sigma_m),$$

где ψ – феноменологический параметр; σ_a – предельная амплитуда цикла; σ_m – среднее растягивающее напряжение; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения.

Однако для установления связи между остаточными напряжениями и сопротивлением усталости необходимо учесть следующие факторы:

- диаграмму предельных амплитуд σ_a - σ_m для материала и реальной детали с учетом концентрации напряжений и масштабного фактора;

- коэффициент ψ для различных случаев нагружения;

- остаточные напряжения, которые следует принимать в расчетах (максимальные, на поверхности, средние или др.).

В данной работе использована методика построения диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений резьбовых деталей с учетом остаточных напряжений, действующих в наиболее нагруженном сечении детали, в которой за основу принята видоизмененная диаграмма Ганна. В осях σ_m - σ_a строится диаграмма предельных амплитуд цикла для материала резьбового образца (рис. 2). По оси σ_a откладывается предел выносливости материала при симметричном цикле в случае растяжения-сжатия $\sigma_{-1} = OA$, по оси σ_m – сопротивление разрыву материала $SK = OB$. Для ограничения работы материала по текучести по оси абсцисс откладывается предел текучести $\sigma_T = OD$ и проводится прямая DC под углом 45° к оси абсцисс. Тогда ACD – диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений материала резьбового образца, учитывающая как усталость, так и текучесть.

Затем строится диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений для резьбовой детали без учета остаточных напряжений во впадинах резьбы.

Во впадине концентратора действует переменное напряжение от внешних сил (рис. 3).

Головкин Валерий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные процессы и технологические комплексы».

E-mail: valerigorlovkin1962@mail.ru

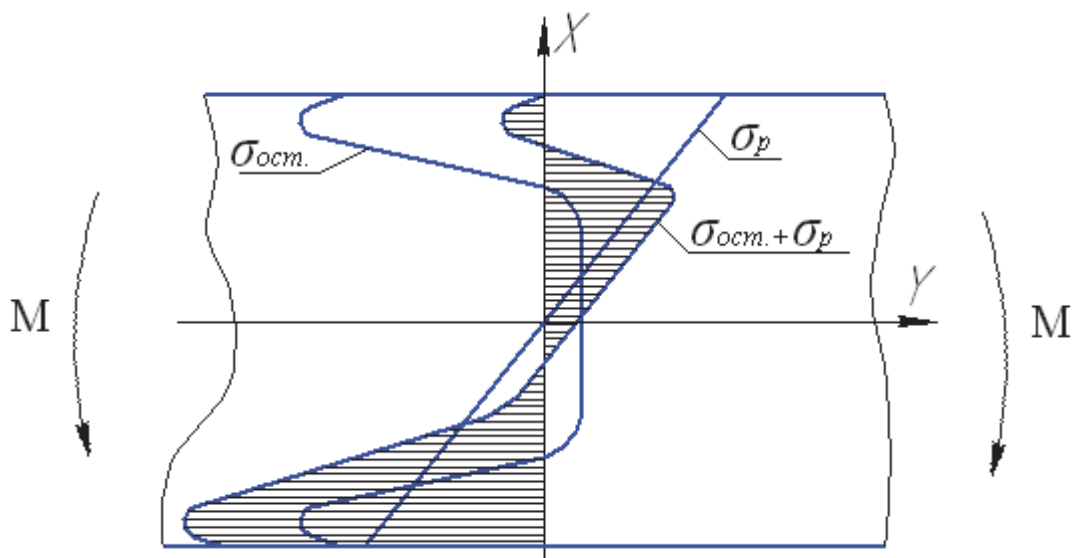


Рис. 1. Сложение остаточных напряжений и рабочих напряжений

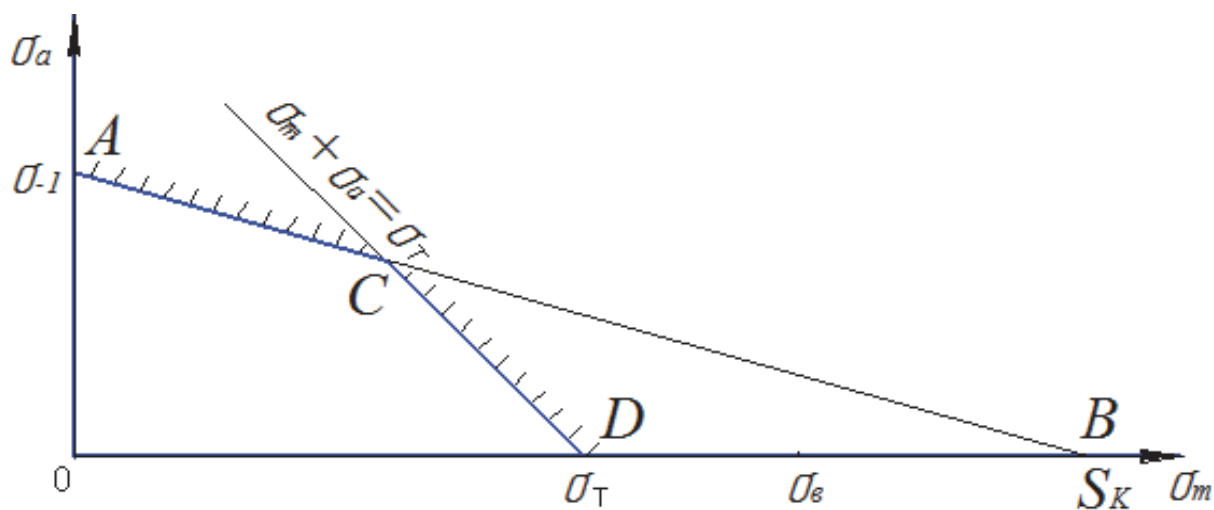


Рис. 2. Диаграмма предельных амплитуд цикла

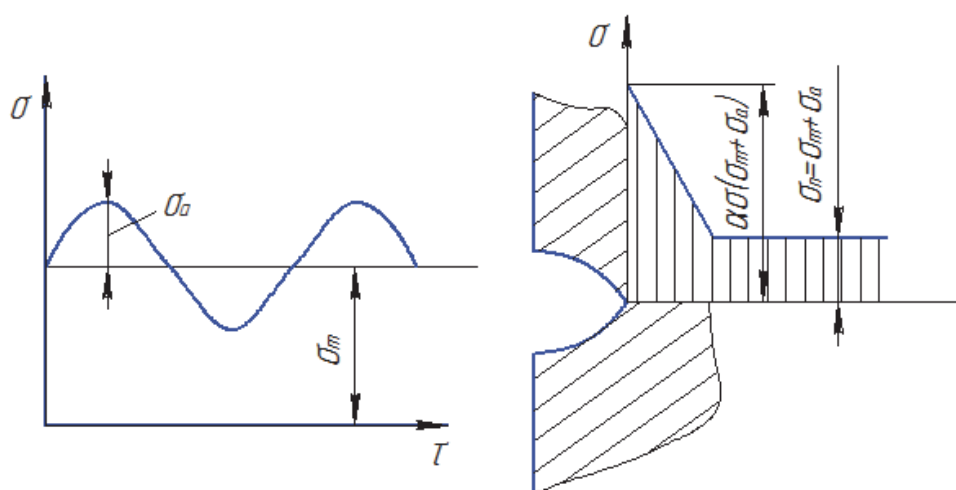


Рис. 3. Напряжения, действующие во впадине концентратора

Наличие концентратора уменьшает предел выносливости материала при симметричном цикле σ_{-1} в K_σ раз, где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений.

При этом считается, что шероховатость поверхности и размеры поперечного сечения резьбовой детали такие же, как и образца, на котором определяли σ_{-1} , и эффективный коэффициент

концентрации не зависит от асимметрии цикла. По оси ординат откладываются $\sigma_{-1}/K_{\sigma} = OA_1$, и из точки А проводится прямая A_1C_1 параллельно АВ до пересечения с прямой D_1C_1 , ограничивающей работу резбовой детали по текучести. Здесь $OD_1 = \sigma_T/\alpha_{\sigma}$, где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений. Для прямых A_1C_1 и D_1C_1 можно записать уравнения через известные механические характеристики материала в виде

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} K_{\sigma} + \frac{\sigma_m}{S_K} K_{\sigma} = 1,$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_T} \alpha_{\sigma} + \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \alpha_{\sigma} = 1.$$

Точка C_1 характеризует начало локальной текучести в наиболее нагруженном сечении резбовой детали, то есть в области впадины резьбы. Решая совместно уравнения, можно определить среднее напряжение σ_m^T , при котором начинается локальная текучесть:

$$\sigma_m^T = \frac{S_K (\sigma_T - \sigma_{-1} \frac{\alpha_{\sigma}}{K_{\sigma}})}{\alpha_{\sigma} (S_K - \sigma_{-1})}.$$

До тех пор, пока напряжения во впадине резьбы не достигнут предела текучести материала σ_T по всему опасному сечению детали (рис. 4, точка К), предельная амплитуда σ_{Ra} не будет зависеть от среднего напряжения σ_m , поэтому диаграмма предельных амплитуд цикла резбовой детали без остаточных напряжений опишется ломаной A_1C_1KD .

Далее строится диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений для резбовой детали с остаточными напряжениями, действующими в ее опасном сечении. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости детали отождествляется с влиянием средних напряжений цикла. Тогда для учета действия сжимающих остаточных напряжений, увеличивающих предельную амплитуду, левую часть диаграммы следует перемещать параллельно вверх до поло-

жения A_2C_2 , а для учета действия растягивающих остаточных напряжений – вниз до положения A_3C_3 . Следовательно, для резбовой детали с сжимающими остаточными напряжениями диаграмма предельных амплитуд цикла будет представлена ломаной A_2C_2KD , с растягивающими – ломаной A_3C_3KD .

Для построения диаграммы предельных амплитуд цикла детали с учетом остаточных напряжений необходимо решить вопрос о том, на какую величину следует переместить прямую A_1C_1 . Простой перенос точки C_1 по оси абсцисс на величину максимальных остаточных напряжений неправомерен, так как не учитывает характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя впадин резьбы и масштабный фактор. Поэтому было предложено перемещать точку A_1 по оси ординат на величину приращения предела выносливости детали с концентратором при симметричном цикле $\Delta\sigma_{-1} = A_1A_2(A_1A_3)$, используя критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma_{ocm}}$. Таким образом, приращение предела выносливости можно определить по формуле

$$\Delta\sigma_{-1} = \overline{\Psi_{\sigma}} |\overline{\sigma_{ocm}}|,$$

где $\overline{\Psi_{\sigma}}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости при симметричном цикле, $\overline{\sigma_{ocm}}$ – среднеинтегральные остаточные напряжения, определяемые по формуле

$$\overline{\sigma_{ocm}} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\beta)}{\sqrt{1-\beta^2}} d\beta,$$

где $\sigma_z(\beta)$ – осевые остаточные напряжения резбовой детали в опасном сечении, $\beta = y/t_{кр}$ – относительное расстояние от поверхности впадин резьбы до текущего слоя (рис. 5), выраженное в долях $t_{кр}$ ($t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости). Следует отметить, что критерий $\overline{\sigma_{ocm}}$ учитывает влияние на предельную амплитуду цикла как характера распределения остаточных напряжений

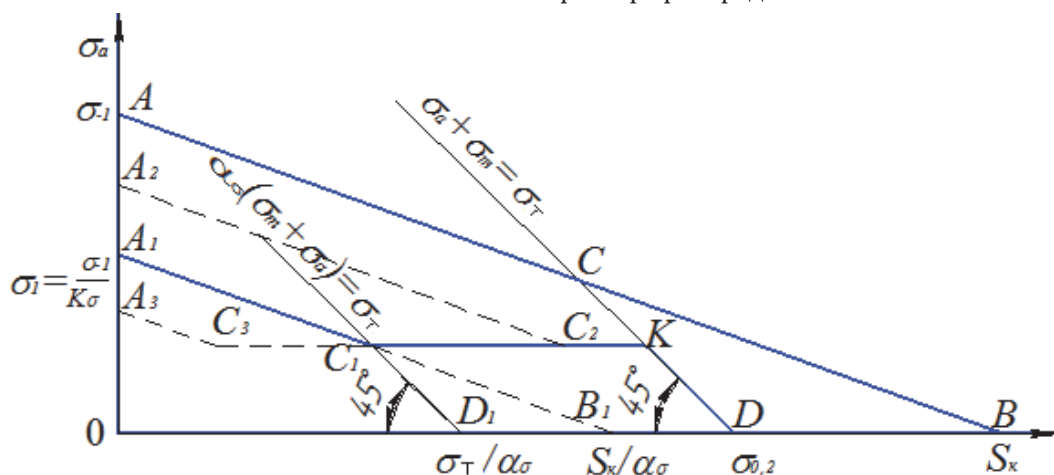


Рис. 4. Диаграмма предельных амплитуд цикла

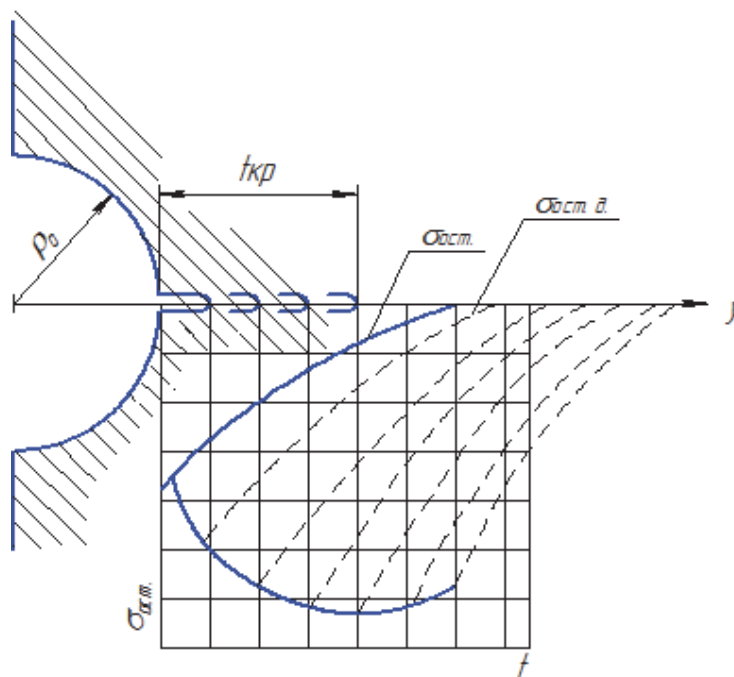


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений на дне трещины

в опасном сечении, так и размеров поперечного сечения детали.

Приращение предельной амплитуды $\Delta\sigma_{Ra}$ за счет остаточных напряжений во впадинах резьбы в резьбовой детали при любом среднем напряжении σ_T определяется зависимостью:

$$\Delta\sigma_{Ra} = \overline{\psi}_\sigma^{(m)} |\overline{\sigma}_{ocm}|,$$

где $\overline{\psi}_\sigma^{(m)}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду при среднем напряжении σ_T . Коэффициент $\overline{\psi}_\sigma^{(m)}$ при $\sigma_T > \sigma_m^T$ можно вычислить по формуле

$$\overline{\psi}_\sigma^{(m)} = \overline{\psi}_\sigma \frac{\sigma_{-1}(\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k |\overline{\sigma}_{ocm}|}.$$

При $\sigma_T \leq \sigma_m^T$ коэффициент $\overline{\psi}_\sigma^{(m)}$ необходимо положить равным $\overline{\psi}_\sigma$, что следует из диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений резьбовой детали без остаточных напряжений и с остаточными напряжениями (см. рис. 4).

По результатам исследования остаточных напряжений, полученных при нарезании резьбы с различными по направлению УЗ колебаниями (рис. 6), с помощью методики [1], была проведена оценка усталостных характеристик резьбовых деталей из титанового сплава ВТ16.

По данной методике была получена, представленная на рис. 7, диаграмма предельных амплитуд цикла болтов из сплава ВТ16, изготовленных при наложении различных ультразвуковых колебаний. При этом использовались следующие механиче-

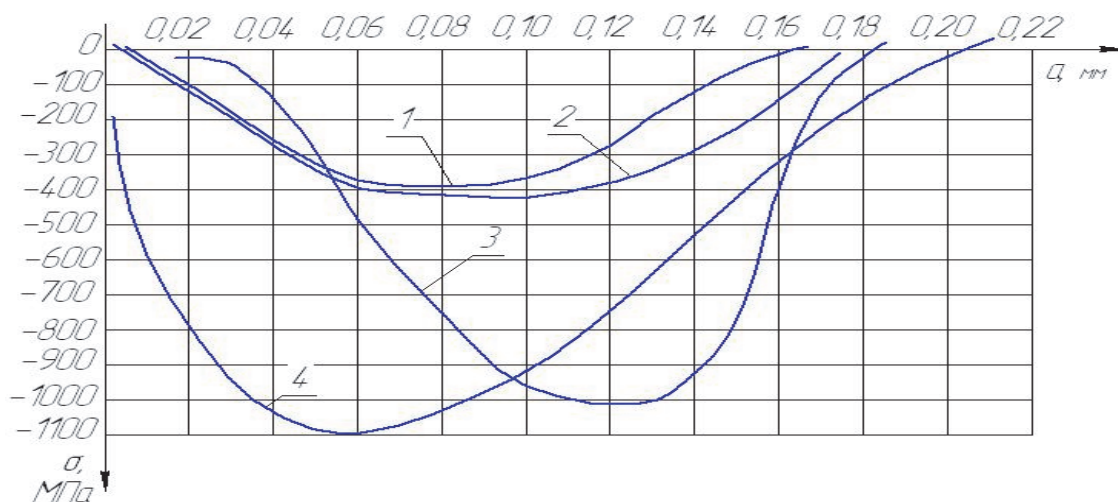


Рис. 6. Влияние направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М6х1, ВТ-16:
1 – резание с тангенциальными колебаниями; 2 – обычное резание;
3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

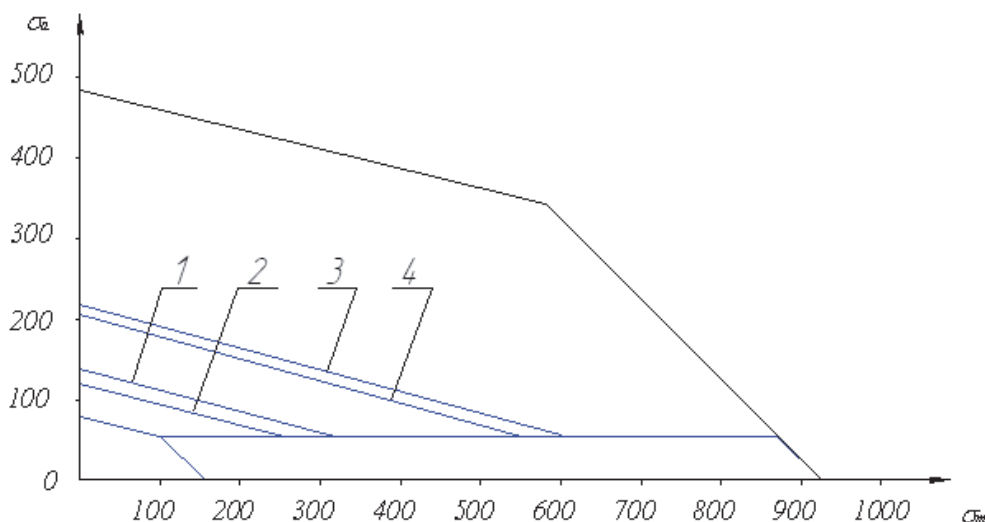


Рис. 7. Диаграмма предельных амплитудцикла болтов из сплава ВТ 16:
 1 – обычное резание; 2 – с тангенциальными колебаниями;
 3 – с радиальными колебаниями; 4 – с осевыми колебаниями

ские характеристики сплава ВТ 16: $\sigma_B = 1180$ МПа, $\sigma_{0,2} = 920$ МПа, $\delta = 19\%$, $\psi = 67\%$, $S_K = 1900$ МПа, $\sigma_{-1} = 480$ МПа. Для нагруженной резьбы М6 при радиусе впадин $\rho = 0,17$ мм теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 6,2$, а эффективный коэффициент концентрации K_σ был принят $K_\sigma = 6$. Следует отметить, что значения α_σ и K_σ близки, и поэтому можно принять $K_\sigma = \alpha_\sigma$, что приведет к расчету в запас прочности с несущественным отклонением. Диаметр опасного сечения детали $d = 4,7$ мм, что соответствует диаметру впадин резьбы М6, а коэффициент ψ_σ для болтов из сплава ВТ 16 составляет $\psi_\sigma = 0,11$.

Из представленных данных видно, что при нарезании резьбы на образцах из титанового сплава ВТ16 имеет место увеличение предельной амплитуды цикла в случае обработки с радиальными и осевыми вынужденными ультразвуковыми колебаниями по сравнению с обработкой без использования ультразвука. Введение в зону резания тангенциальных колебаний привело к уменьшению предельной амплитуды цикла. При $\sigma_m = 0$ предельная амплитуда цикла σ_a в зависимости от условий обработки распределяется следующим образом:

$\sigma_a = 130$ МПа – обычное резание;

$\sigma_a = 100$ МПа – резание с тангенциальными колебаниями;

$\sigma_a = 200$ МПа – резание с осевыми колебаниями;
 $\sigma_a = 220$ МПа – резание с радиальными колебаниями.

Из приведённых на рис. 7 данных видно, что при нарезании резьбы с осевыми или радиальными УЗ колебаниями значения предельной амплитуды цикла напряжений в 1,5- 2.2 раза больше, чем при обработке с тангенциальными УЗ колебаниями или без ультразвуковых колебаний.

Таким образом, предел выносливости изменяется прямо пропорционально величине остаточных напряжений, и, следовательно, изменяя технологию изготовления резьбы можно влиять на предел выносливости, который может изменяться в широких пределах, в данном случае от 100 до 220 МПа, т.е. почти в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений: Моногр. Самара: Изд-во СНЦ, 2008. 64 с.
2. Головкин В.В., Ромашкина О.В. Влияние ультразвука на процесс нарезания резьбы и работоспособность резьбовых деталей: Моногр. Самара: Изд-во СНЦ, 2012. 112 с.

IMPROVEMENT OF FATIGUE RESISTANCE DUE TO FORMATION OF RESIDUAL STRESSES WHEN THREADING WITH ULTRASOUND

© 2016 V.V. Golovkin

Samara State Technical University

The results of studies of the effect of ultrasound on the increase in the fatigue resistance of reared parts.

Key words: fatigue strength, ultrasound, threading, residual stress.

Valery Golovkin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Transport Processes and Technological Complexes Department. E-mail: valeriigolovkin1962@mail.ru