

УДК 621.9.048.6: 539.319

## ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2012 О. В. Ромашкина<sup>1</sup>, О. В. Каранаева<sup>2</sup><sup>1</sup>Самарский государственный технический университет<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрено влияние величины и направления ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы на величину и знак остаточных напряжений и на их распределение в поверхностном слое деталей из титановых сплавов. Полученные результаты подтверждают реальные перспективы повышения характеристик сопротивления усталости резьбовых деталей путём изменения различных технологических параметров ультразвуковой обработки.

*Радиальные, осевые, тангенциальные ультразвуковые колебания, остаточные напряжения, поверхностный слой, сопротивление усталости, резьбовые детали, титановые сплавы.*

Работоспособность деталей машин в значительной степени зависит от физико-механических характеристик материала и технологии изготовления. Титановые сплавы имеют малый вес и обладают высокими прочностными характеристиками, поэтому в ответственных узлах, например летательных аппаратов и их двигателей, широко применяются резьбовые детали из титановых сплавов. При этом ответственные резьбовые детали из титановых сплавов в эксплуатационных условиях подвержены воздействию значительных вибрационных нагрузок при достаточно высоком температурном режиме и эксплуатируются с растягивающими напряжениями. Проведённые исследования и производственный опыт показали, что виды механической обработки и параметры режимов резания оказывают существенное влияние на сопротивление усталости резьбовых деталей из титановых сплавов. При этом для повышения качественных характеристик поверхностного слоя желательно сформировать в поверхностном слое максимально возможные сжимающие остаточные напряжения. Практическое значение, с точки зрения сопротивления усталости, имеют остаточные на-

пряжения в поверхностном слое наименьшего сечения, а именно во впадинах резьбы.

Для определения остаточных напряжений в резьбовых деталях малого диаметра была использована специальная методика, разработанная С.И. Ивановым и В.Ф. Павловым [1], на основании которой были определены остаточные напряжения, формирующиеся во впадинах резьбы.

В соответствии с этой методикой удаляются слои материала с части поверхности нескольких впадин резьбы детали и измеряются возникающие при этом перемещения детали с удлинителем. Деформации возникают при удалении напряжённого поверхностного слоя некоторой толщины во впадинах резьбы, являющихся концентраторами напряжений.

При помощи специальных ультразвуковых резьбонарезных устройств осуществлялось нарезание наружных резьб М5, М6, М8 на образцах, изготовленных из титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ16.

Нарезание резьбы проводилось при сообщении резьбообразующему инструменту радиальных, осевых и тангенциальных ультразвуковых колебаний с амплитудой  $x = 5$  мкм и частотой  $f = 18 - 22$  кГц.

Режимы резания: скорость резания  $V = 0,8 - 1,2$  м/мин, глубина резания  $t = 0,2 - 0,34$  мм. Для сопоставления результатов исследования проводилось также нарезание резьбы без наложения на инструмент ультразвуковых колебаний.

Осевые ( $\sigma_z^{res}$ ) остаточные напряжения определялись по следующей формуле:

$$\sigma_z^{res}(h_j) = \frac{C}{X_p(h_j)} \left[ \frac{df(h)}{d(h)} \right]_j$$

Здесь  $X_p(h_j)$  – коэффициент, учитывающий масштабный фактор;  $f(h)$  – перемещение образца;  $h$  – глубина поверхностного слоя;  $C$  – коэффициент, зависящий от материала и длины образца, который определяется по зависимости:

$$C = \frac{E}{(1 + \mu) \times (1 - 2\mu) \times \left[ (L - l) \frac{1}{P} + \frac{l^2}{2P} \right]}$$

где  $E$  – модуль продольной упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $L$  – длина образца с удлинителем;  $l$  – длина образца;  $P$  – шаг резьбы.

По приведённой методике были определены осевые остаточные напряжения  $\sigma_z^{res}$ , формирующиеся в поверхностном слое впадины резьбы при введении в зону резания радиальных, осевых и тангенциальных ультразвуковых колебаний.

На рис. 1 – 3 приведены эпюры осевых остаточных напряжений  $\sigma_z^{res}$  по глубине поверхностного слоя  $h$  во впадинах резьбы.

Величина и направление ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы оказывают значительное влияние на величину и знак остаточных напряжений, а также на их распределение в поверхностном слое.

На рис. 1 приведены графики влияния направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М5х1 при обработке титанового сплава ВТ3-1 (режимы обработки: скорость резания  $V = 0,8$  м/мин,

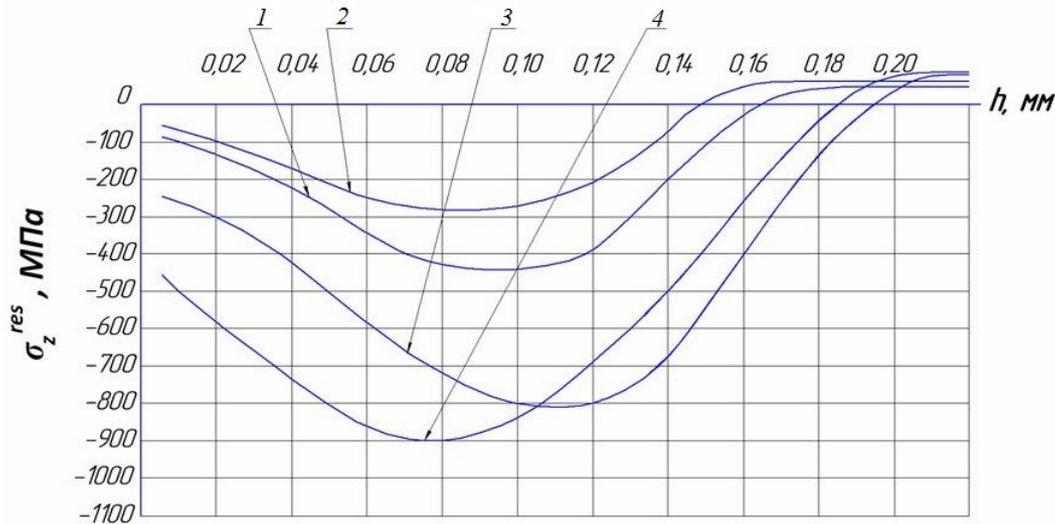


Рис. 1. Влияние направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М5 при обработке титанового сплава ВТ3-1:

1 – обычное резание; 2 – резание с тангенциальными колебаниями;

3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

частота ультразвуковых колебаний  $f = 20 \pm 1$  кГц, амплитуда ультразвуковых колебаний  $x = 5$  мкм, технологическая среда – сульфофрезол).

Из представленных графиков видно, что в поверхностном слое формиру-

ются сжимающие остаточные напряжения. Характер распределения сжимающих остаточных напряжений значительно отличается в зависимости от вида ультразвуковых колебаний. Так, при обработке с радиальными ультразвуковыми колеба-

ниями формируются максимальные по величине сжимающие остаточные напряжения, как около поверхности (- 400 МПа), так и в подповерхностном слое: на глубине 0,08 мм они достигают максимальных значений – около 900 МПа. Близкий характер распределения сжимающих остаточных напряжений получен при нарезании резьб с осевыми ультразвуковыми колебаниями. В этом случае около поверхности формируются сжимающие остаточные напряжения, равные - 230 МПа, а своего наибольшего значения – 800 МПа они достигают на глубине 0,10 – 0,12 мм.

При обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями около поверхности сжимающие остаточные напряжения близки к нулю и достигают наибольшего значения на глубине 0,08 мм: - 280 МПа; при достижении глубины 0,15 мм остаточные напряжения меняют свой знак на противоположный, т.е. становятся растягивающими напряжениями.

Для проведения сравнительного анализа осуществлялось нарезание резьб

без введения в зону резания ультразвуковых колебаний. В этом случае около поверхности формируются незначительные сжимающие остаточные напряжения, равные - 80 МПа, затем они достигают наибольшего значения на глубине 0,08 – 0,12 мм, равного - 420 МПа.

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что с точки зрения формирования в поверхностном слое благоприятных сжимающих остаточных напряжений наиболее предпочтительной является обработка с радиальными или осевыми ультразвуковыми колебаниями.

На рис. 2 приведены графики влияния направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М6х1 при обработке титанового сплава ВТ9 (режимы обработки: скорость резания  $V = 1,0$  м/мин, частота ультразвуковых колебаний  $f = 20 \pm 1$  кГц, амплитуда ультразвуковых колебаний  $x = 5$  мкм, технологическая среда – сульфозреол).

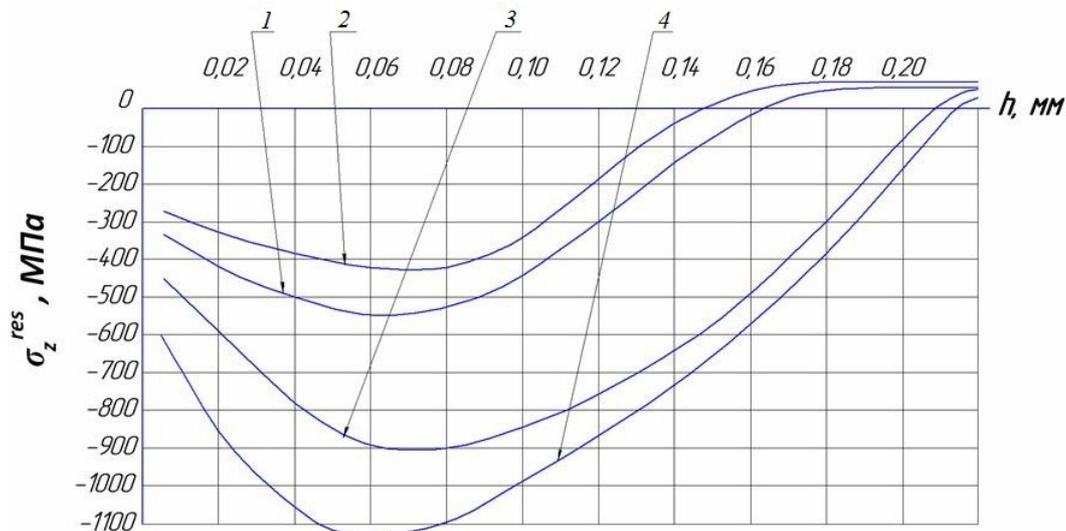


Рис. 2. Влияние направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М6 при обработке титанового сплава ВТ9:

- 1 – обычное резание; 2 – резание с тангенциальными колебаниями;  
3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

Анализируя представленные на рис. 2 результаты, можно сделать следующие выводы. Формируются значительные сжимающие остаточные напряжения уже на глубине 0,06 мм (от - 400 МПа до - 1100 МПа), причём смена знака на противоположный происходит на глубине от 0,14 мм до 0,22 мм. При этом наибольшие сжимающие остаточные напряжения также формируются при обработке с радиальными и осевыми ультразвуковыми колебаниями, а наложение на инструмент тангенциальных колебаний

приводит к их уменьшению до значений порядка - 400 МПа.

На рис. 3 приведены графики влияния направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М8х1,25 при обработке титанового сплава ВТ16 (режимы обработки: скорость резания  $V = 1,2$  м/мин, частота ультразвуковых колебаний  $f = 20 \pm 1$  кГц, амплитуда ультразвуковых колебаний  $x = 5$  мкм, технологическая среда – сульфозол).

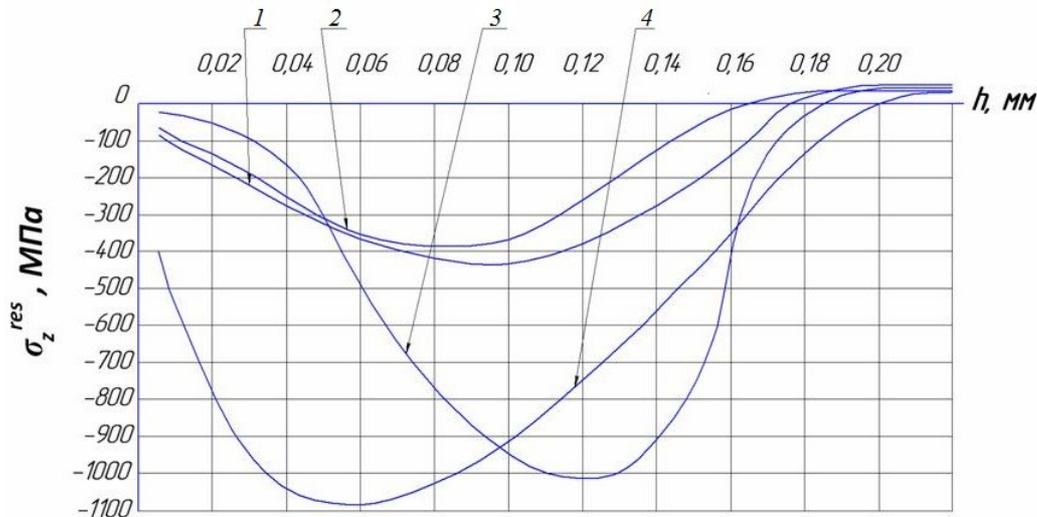


Рис. 3. Влияние направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М8 при обработке титанового сплава ВТ-16:

- 1 – обычное резание; 2 – резание с тангенциальными колебаниями;
- 3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

Из полученных данных видно, что при обычном резбонарезании и при нарезании резьбы с тангенциальными и осевыми колебаниями на поверхности сжимающие остаточные напряжения близки к нулю, а при введении в зону резания радиальных ультразвуковых колебаний достигают около поверхности величины - 200 МПа. Однако уже на глубине залегания 0,05 мм в случае обработки с радиальными ультразвуковыми колебаниями остаточные напряжения достигают значений около - 1100 МПа, т.е. наблюдается существенный рост сжимающих остаточных напряжений. При обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями также имеет место резкое увеличение сжимающих остаточных напряжений, однако это

происходит на глубине от 0,04 до 0,12 мм, а затем наблюдается их резкое уменьшение и на глубине 0,19 мм происходит смена на растягивающие остаточные напряжения. При обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями также имеет место незначительное уменьшение сжимающих остаточных напряжений по сравнению с обычной обработкой.

Можно сделать следующие выводы. Наложение на инструмент тангенциальных ультразвуковых колебаний приводит к снижению значений сжимающих остаточных напряжений. В первую очередь это связано с тем, что тангенциальные ультразвуковые колебания изменяют процесс стружкообразования, интенсифицируют дислокационные процессы и умень-

шают силы резания. Введение в зону резания осевых или радиальных ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы позволяет значительно увеличить сжимающие остаточные напряжения. В этом случае увеличение сжимающих остаточных напряжений связано с упрочняющим эффектом.

Таким образом, установлено, что для формирования в поверхностном слое благоприятных наибольших сжимающих остаточных напряжений при ультразвуковом резбонарезании следует производить

окончательную обработку с радиальными или осевыми ультразвуковыми колебаниями.

### Библиографический список

1. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей [Текст] / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов, Г. В. Коновалов и др. - М.: МАП Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1992. – 192 с.

## INFLUENCE OF THE DIRECTION OF ULTRASONIC VIBRATIONS ON THE FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN THREAD PIECES MADE OF TITANIUM ALLOYS

© 2012 O. V. Romashkina<sup>1</sup>, O. V. Karanaeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University

named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

The paper deals with the influence of magnitude and direction of ultrasound vibrations in the process of thread cutting on the magnitude and sign of residual stresses and their distribution in the surface layer of pieces made of titanium alloys. The results obtained confirm real prospects of improving the characteristics of fatigue resistance of thread pieces by changing various technological parameters of ultrasonic treatment.

*Radial, axial, tangential ultrasonic vibrations, residual pressure, surface layer, fatigue resistance thread pieces, titanium alloys.*

### Информация об авторах

**Ромашкина Оксана Викторовна**, старший преподаватель кафедры инструментальных систем и сервиса автомобилей, Самарский государственный технический университет. E-mail: [romashkina921@mail.ru](mailto:romashkina921@mail.ru). Область научных интересов: повышение эффективности механической обработки путём применения ультразвука.

**Каранаева Оксана Валериевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [karanaeva@mail.ru](mailto:karanaeva@mail.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Romashkina Oksana Viktorovna**, senior lecturer of the department of development systems and car service, Samara State Technical University. E-mail: [romashkina921@mail.ru](mailto:romashkina921@mail.ru). Area of research: increasing the efficiency of machining using ultrasound.

**Karanaeva Oksana Valerievna**, candidate of technical science, associate professor of the department of strength of materials, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [karanaeva@mail.ru](mailto:karanaeva@mail.ru). Area of research: residual stress mechanics.