

ку развития трещины усталости и, следовательно, на сопротивление усталости цилиндрических деталей с концентраторами напряжений.

### **Вывод**

Анализируя графики изменения КИН при увеличении глубины трещины усталости в деталях, подверженных различным режимам пневмодробеструйной обработки, можно выбрать наиболее оптимальный по сопротивлению усталости режим упрочнения деталей, работающих при циклическом нагружении.

### **Библиографический список**

1. Вакулюк, В.С. Применение метода термоупругости при конечно-элементом моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях / В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, А.С. Злобин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. – Т.16. – № 4. – С. 168-174.
2. Сазанов, В.П. Математическое моделирование первоначальных деформаций в поверхностно упрочнённых деталях при выборе образца-свидетеля / В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – № 3(63). – С. 1-7.
3. Сургутанов, Н.А. Моделирование и определение закономерностей развития трещины усталости в поверхностном слое упрочнённых деталей: дисс. канд. техн. наук: 01.02.06. защищена 13.12.2019: утв. 21.10.2020/Сургутанов Николай Андреевич. – Самара, 2019 – 128 с. – 9 19-5/1700.

УДК 621.787:539.319

**Сазанов В.П., Письмаров А.В., Семёнова О.Ю., Михалкина С.А.,  
Остапенко В.В.**

### **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЯХ**

Наличие обоснованных методов измерения остаточных напряжений в резьбе позволяет изучать их влияние на сопротивление усталости. Наблюдаемые изменения циклической долговечности и предела выносливости резьбовых деталей за счёт изменения конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, как правило, связано с остаточными напряжениями во впадинах резьбы. Также известно, что влияние, прежде всего, технологии изготовления на сопротивление усталости деталей с концентраторами напряжений

проявляется в основном, через остаточные напряжения. Поэтому для высокопрочных резьбовых деталей, имеющих значительную концентрацию напряжений, влияние этого параметра качества поверхностного слоя должно быть определяющим.

Практика исследования остаточных напряжений показывает, что наибольшее распространение получили механические методы определения остаточных напряжений, как наиболее надёжные и доступные [1]. Физические методы измерения остаточных напряжений (рентгеновский, магнитный, ультразвуковой и т.д.) практического распространения не получили, так как имеют значительно меньшую точность, сложны, неприемлемы для исследования подповерхностных слоёв деталей, а также в местах большой кривизны и в зонах малых размеров.

Для определения остаточных напряжений в резьбовых деталях подходят два метода: метод колец и полосок и метод удаления части поверхности впадин резьбы. Метод колец и полосок [2], нашедший широкое применение при исследовании остаточных напряжений в гладких цилиндрических деталях, рекомендуется использовать для деталей с резьбой М10 и выше. Преимущество этого метода заключается в возможности определения двух компонент напряжённого состояния: осевые и окружные остаточные напряжения. Метод удаления части поверхности, также широко используемый для определения остаточных напряжений гладких деталей, наиболее удобен для измерения остаточных напряжений во впадинах резьбы малого диаметра [3]. Он позволяет определить только окружные остаточные напряжения, которые оказывают наибольшее влияние на сопротивление усталости. Следует заметить, что этот метод является менее трудоёмким, чем метод колец и полосок.

Практическое значение, с точки зрения сопротивления усталости, имеют остаточные напряжения в поверхностном слое наименьшего сечения впадин резьбы. Касательными напряжениями в наименьшем сечении можно пренебречь, их можно считать равными нулю. Считается, что остаточные напряжения осесимметричны и одинаковы во всех впадинах резьбы. В силу того, что все методы позволяют определить остаточные напряжения лишь в конечной по размерам области, остаточные напряжения вдоль меридиана принимаются однородными. Таким образом, остаточные напряжения зависят только от расстояния до текущего слоя, измеренного от поверхности впадин резьбы.

Современные требования по определению прочностных характеристик выдвигают на первый план насущную необходимость по разработке научно

обоснованных методов прогнозирования сопротивления усталости резьбовых деталей с учётом остаточных напряжений. При этом такие методы должны позволять, минуя экспериментальное проведение испытаний на усталость, осуществлять оценку предельной амплитуды цикла упрочнённых резьбовых деталей при наличии механических характеристик материала, распределения остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы и средних напряжений, вызванных усилием затяжки.

Решение выше упомянутой задачи связано в первую очередь с широким использованием современных расчётных комплексов типа PATRAN/NASTRAN, ANSYS, в которых реализован метод конечно-элементного моделирования в форме перемещений. В данных расчётных системах для моделирования остаточного напряжённого состояния используется аналогия задачи термоупругости и первоначальных деформаций [4]. Определение первоначальных деформаций является статически неопределимой задачей, и поэтому данная задача решается методом последовательных приближений (итераций). Соотношение компонент первоначальных деформаций принимается в зависимости от вида упрочняющих технологий, которое определяется значениями линейных коэффициентов температурного расширения по направлениям системы координат.

Особенностью моделирования остаточных напряжений в резьбе является тот факт, что экспериментально они определяются только в криволинейной части профиля резьбы. Следовательно, не учитывается влияние остаточных напряжений на боковых прямолинейных участках профиля резьбы. В рамках данной работы было изучено влияние остаточных напряжений на боковых поверхностях профиля на их распределение в наименьшем сечении впадины резьбы.

В данном исследовании использованы эпюры осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадины резьбы размером от М4 до М12 в деталях из титанового сплава ВТ16 [1]. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по глубине  $a$  поверхностного слоя приведено на рис. 1. Решение выполнено методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса ANSYS.

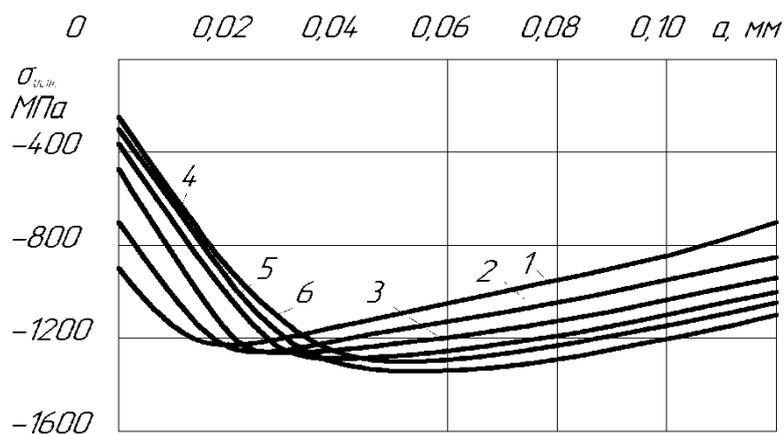


Рис. 1. Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  во впадинах поверхностного слоя болтов из сплава ВТ16: 1 – М4; 2 – М5; 3 – М6; 4 – М8; 5 – М10; 6 – М12

Результаты расчёта для резьбы М6 и М8 приведены на рис. 2,3. Из представленных на них графиков следует, что остаточные напряжения на профилях резьбы не оказывают существенного влияния на распределение осевых остаточных напряжений по глубине детали в наименьшем сечении впадины.

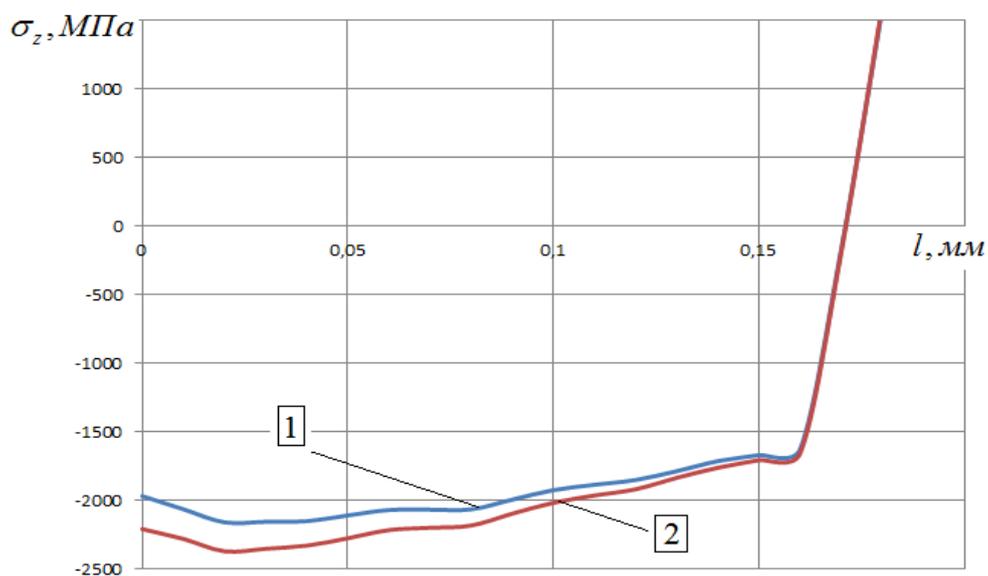


Рис. 2. Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  по глубине детали в зоне впадины М6 (1 – без учёта профиля, 2 – с учётом профиля)

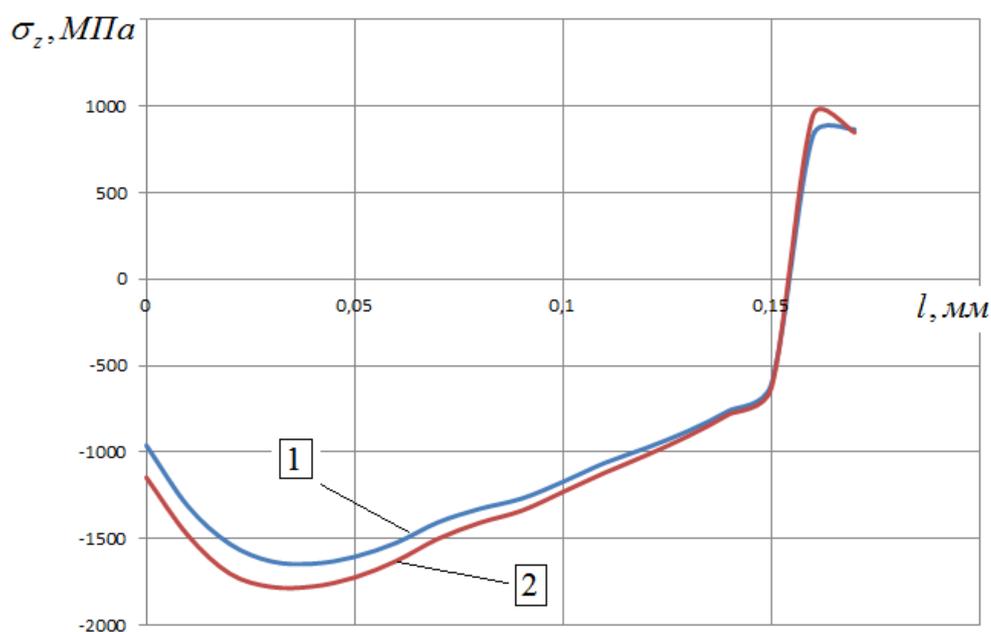


Рис. 3. Распределение осевых напряжений по глубине детали в зоне впадины М8  
(1 – без учёта профиля, 2 – с учётом профиля)

Из проведённого исследования следует, что для расчёта остаточного напряжённого состояния впадин резьбы вполне достаточно задавать первоначальные деформации, действующие только во впадине профиля резьбы, тем более что это является расчётом в запас прочности.

### Библиографический список

1. Иванов, С.И. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов, Г. В. Коновалов, Б. В. Минин. – М.: Машиностроение, 1991. – 204 с.
2. Иванов, С.И. Определение остаточных напряжений в резьбе болтов методом колец и полосок / С.И. Иванов, Н.Г. Трофимов, Э.И. Фрейдин, В.Г. Фокин, М.П. Шатунов // Вестник машиностроения. – 1980. – №5. – С. 37-38.
3. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности / С.И. Иванов, И.В. Григорьева // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.
4. 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.