

Заключение. Из данных рис. 3 следует, что для повышения сопротивления усталости среднее напряжение цикла при нагружении исследуемых болтов М6 из материала 16ХСН не должно превышать величины 0,4 от условного предела текучести материала, что необходимо учитывать при назначении момента предварительной затяжки болта. Полученный результат достаточно точно сходится с рекомендациями по затяжке резьбовых соединений, приведённых в работе [2].

Список использованных источников

1. 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.
2. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / Биргер И.А. – М.: Машгиз, 1963. – 232 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.

УДК 621.787:539.319

В.П. Сазанов, В.В. Лунин, А.А. Декань, Е.А. Огурцов, М.В. Юронин

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА СЕЧЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ

В результате поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Результаты испытаний показывают [1,2], что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей играют осевые сжимающие остаточные напряжения. При этом наиболее эффективным упрочнение поверхности является для деталей с концентраторами напряжений.

В данной работе проведено исследование влияния наружного диаметра гладких цилиндрических деталей на параметры упрочнённого слоя

и на величину и распределение осевых остаточных напряжений. Для этого были изучены результаты экспериментов на сплошных цилиндрических упрочнённых образцах различного диаметра из стали 20. Используемая для изготовления сталь 20 в состоянии поставки имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_g = 522$ МПа, $\delta = 26,1$ %, $\psi = 65,9$ %, $S_k = 1416$ МПа.

Цилиндрические образцы с наружными диаметрами $D = 10$ мм и $D = 25$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), а также обкатке роликом при усилиях на инструмент $P = 0,5$ кН (ОР1) и $P = 1,0$ кН (ОР2). Образцы диаметром $D = 50$ мм подвергались обкатке роликом при усилиях на инструмент $P = 0,5$ кН (ОР1) и $P = 1,0$ кН (ОР2). Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром $D = 10$ мм определялись экспериментально методом колец и полосок [3], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [4]. Остаточные напряжения в цилиндрических образцах диаметрами $D = 25$ мм и $D = 50$ мм определялись методом колец и полосок [3]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких цилиндрических образцов для различных видов поверхностного упрочнения представлено на рис. 1.

Толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями. Из данных рис. 1 можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания при одной и той же упрочняющей обработке с увеличением диаметра образца возрастают. Эта закономерность объясняется повышением жёсткости образцов с увеличением размеров их поперечного сечения. Подобные результаты по распределениям остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки образцов из стали 45 и сплава Д16Т представлены в работе [2] при изменении диаметра образцов от 10 мм до 50 мм.

Также при одном и том же упрочнении следует, что чем больше диаметр сечения детали, тем ниже проходит эпюра сжимающих остаточных напряжений. Как показано на рис. 1, при пневмодробеструйной обработке и обкатке роликом наблюдается подповерхностный максимум сжимающих осевых остаточных напряжений σ_z и их снижение к поверхности детали. Это объясняется структурными процессами в кристаллической решётке металла из-за высокой температуры в месте контакта инст-

румент-деталь и последующего процесса теплообмена. Необходимо отметить, что при гидродробеструйной обработке из-за более интенсивного теплоотвода жидкостью разница между остаточными напряжениями на поверхности и подповерхностным максимумом значительно ниже.

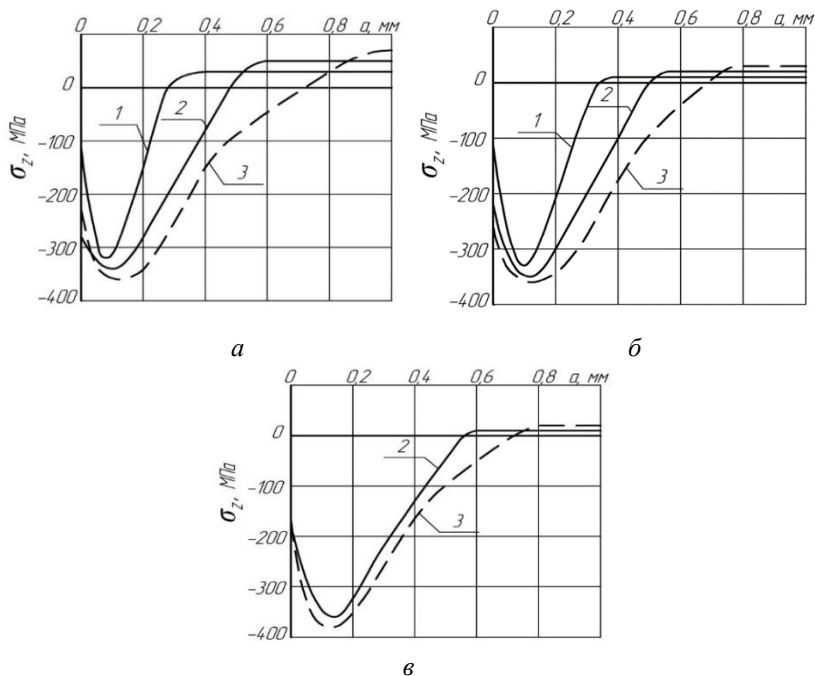


Рис. 1. Распределение осевых остаточных напряжений σ_z в упрочнённых цилиндрических образцах диаметром 10 мм (а), 25 мм (б) и 50 мм (в) после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Осевые растягивающие (реактивные) остаточные напряжения. В соответствии с условием сплошности Сен-Венана и условием статического равновесия во внутренней части цилиндра возникают положительные деформации и растягивающие напряжения. Из рис. 1 следует, что растягивающие напряжения по модулю значительно ниже сжимающих и при увеличении диаметра цилиндра при одной и той же упрочняющей обработке уменьшаются по величине. Это также объясняется разностью жёсткостей слоя со сжимающими напряжениями и части сечения цилиндра

дра с растягивающими напряжениями. Учитывая небольшую толщину слоя со сжимающими напряжениями по сравнению с диаметром цилиндра, соотношение осевых жёсткостей можно оценить следующим образом:

$$\frac{\pi D a}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4a}{D}, \quad (1)$$

где a – толщина упрочнённого слоя; D – наружный диаметр цилиндра.

Согласно формуле (1), при увеличении диаметра цилиндра растягивающие напряжения уменьшаются пропорционально ему.

Толщина слоя с первоначальными остаточными деформациями. Данный параметр представляет собой слой с остаточными пластическими деформациями, полученными от инструмента после обработки. Физически в чистом виде он не существует и определить его экспериментально не представляется возможным, так как процесс образования сжимающих остаточных напряжений и уравнивающих их растягивающих напряжений происходит непрерывно. Поэтому из-за наличия растягивающих деформаций толщина слоя с первоначальными деформациями всегда меньше толщины слоя со сжимающими остаточными напряжениями. В принципе эти две величины будут равны только при бесконечно большом диаметре цилиндра. Поэтому толщину слоя с первоначальными деформациями можно определить только расчётным путём.

В чём же возникает необходимость определения толщины слоя с первоначальными деформациями и их распределения по глубине упрочнённого слоя? Современные требования по определению прочностных характеристик выдвигают на первый план насущную необходимость по разработке научно обоснованных методов прогнозирования сопротивления усталости резбовых деталей с концентраторами напряжений с учётом остаточных напряжений. При этом такие методы должны позволять, минуя экспериментальное проведение испытаний на усталость, осуществлять оценку предела выносливости деталей при наличии механических характеристик материала и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое.

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 ис-

пользуется аналогия задачи термоупругости и первоначальных деформаций [5]. Определение первоначальных деформаций является статически неопределимой задачей, и поэтому данная задача решается методом последовательных приближений (итераций) при принятых определённых допущениях. Соотношение компонент первоначальных деформаций принимается в зависимости от вида упрочняющих технологий, которое затем определяется значениями линейных коэффициентов температурного расширения по направлениям системы координат. Представленный выше метод расчёта с использованием первоначальных деформаций позволяет решать задачи прогнозирования предела выносливости деталей и выбора оптимальных технологических режимов упрочнения на высоком научном и инженерном уровне.

Исследованные закономерности изменения параметров слоя с остаточными напряжениями в цилиндрических деталях в зависимости от их размеров, являются характерными практически для всех видов упрочняющих обработок.

Список использованных источников

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
2. 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.
3. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.
4. 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.
5. 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.