

УДК 621.787:539.319

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

© 2014 В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, А.С. Букатый, О.В. Каранаева, В.В. Лунин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 21.11.2014

В проведенном исследовании установлено, что образцы-свидетели могут быть использованы для расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых образцах с галтелями и шлицевых валах.

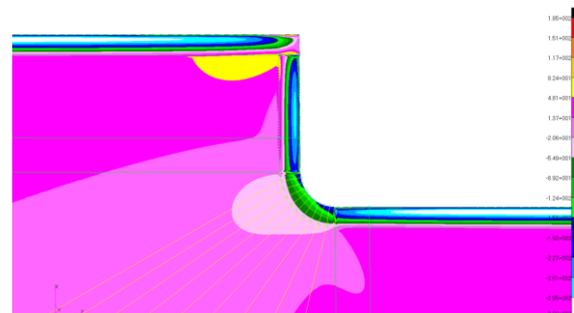
Ключевые слова: *образец-свидетель, упрочняющая обработка, остаточные напряжения, галтель, шлицевой вал*

Для оценки влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей по различным критериям необходимо знать распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали [1, 2]. В настоящем исследовании методом конечно-элементного моделирования с применением расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN выполнен расчёт остаточного напряжённого состояния в цилиндрических образцах с галтелями различного радиуса и в шлицевых валах. Моделирование упрочнённого поверхностного слоя выполнено методом термоупругости, теоретическое обоснование которого приведено в работах [3-5]. Методические основы использования расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN при решении подобных задач подробно рассмотрены в работе [6].

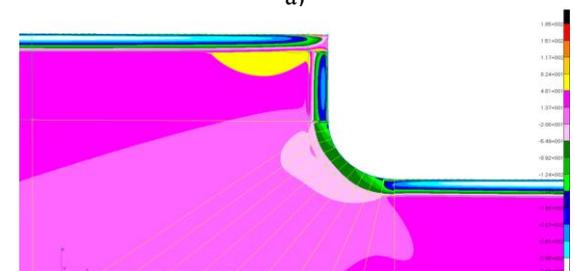
Изучались остаточные напряжения в цилиндрических образцах из стали 20 диаметром 12 мм с галтельными переходами радиусом $r=0,5$ мм, $r=1$ мм, $r=3$ мм, $r=5$ мм, а также шлицевые детали из стали 12Х2Н4А, которые имели эвольвентный профиль со следующими параметрами: количеством зубьев $z=24$ и модулем $m=1$ мм. Образцы с галтелями упрочнялись пневмодробеструйной обработкой (ПДО) стальными шариками диаметром 1,5-2,5 мм, а шлицевые детали подвергались химико-термической обработке.

Цилиндрические образцы с галтельными переходами. Анализ технологического процесса ПДО образцов с галтелями из стали 20 показал, что размеры стальной дроби (1,5-2,5 мм) не позволяют

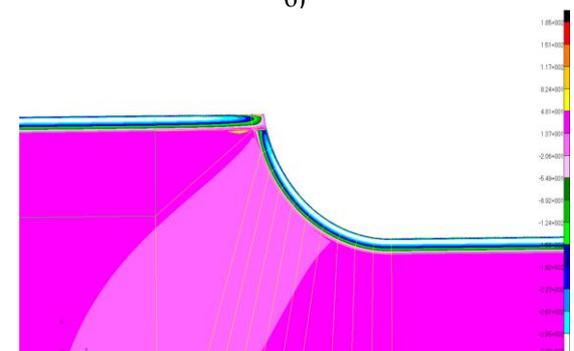
проводить обработку поверхности галтели при $r=0,5$ мм, позволяют проводить частичную обработку галтели при $r=1$ мм и полную обработку галтели при $r=3$ мм и $r=5$ мм. Поэтому разработка конечно-элементных моделей упрочнённых образцов велась с учётом особенностей технологического процесса. Расчёты выполнялись на конечно-элементных моделях с использованием комплекса NASTRAN/PATRAN при моделировании упрочнённого слоя по методу термоупругости [6].



а)



б)



в)

Кирпичев Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета летательных аппаратов. E-mail: dean_fa@ssau.ru

Вакулюк Владимир Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов. E-mail: sorganat@ssau.ru

Букатый Алексей Станиславович, кандидат технических наук, докторант кафедры сопротивления материалов

Каранаева Оксана Валериевна, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов

Лунин Валентин Валериевич, аспирант

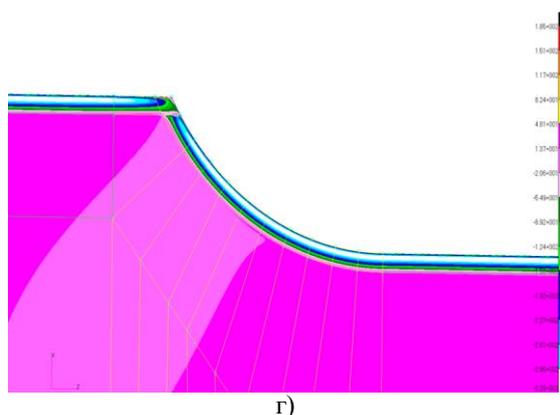


Рис. 1. Распределение осевых остаточных напряжений σ_z в продольной сечении образцов после ПДО:

а) $r=0,5$ мм, неупрочнённая поверхность галтели; б) $r=1$ мм, частично упрочнённая поверхность галтели; в) $r=3$ мм, полное упрочнение всех поверхностей; г) $r=5$ мм, полное упрочнение всех поверхностей

В качестве исходных данных по нагружению были использованы результаты распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя, которые определялись методом колец и полосок для гладких цилиндрических образцов-свидетелей. Распределения осевых σ_z остаточных напряжений в продольном сечении образцов в окрестности галтельного перехода приведены на рис. 1, размерность напряжений в МПа.

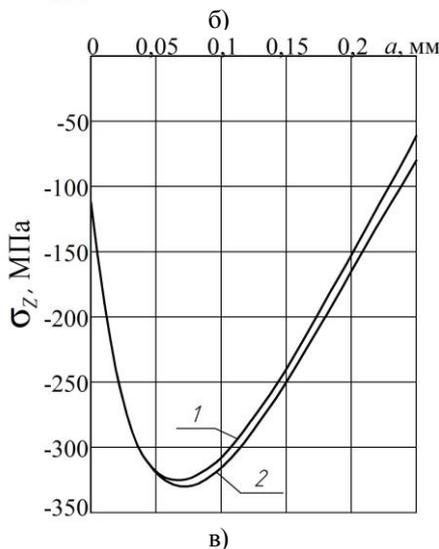
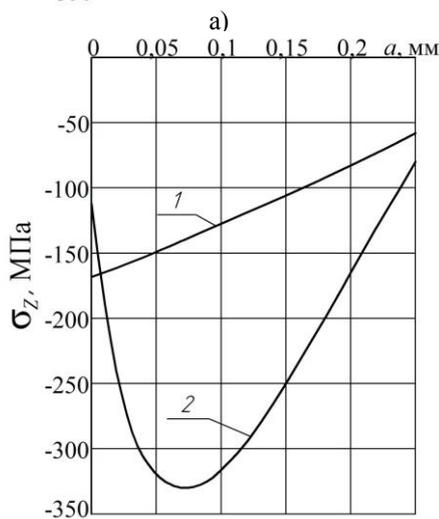
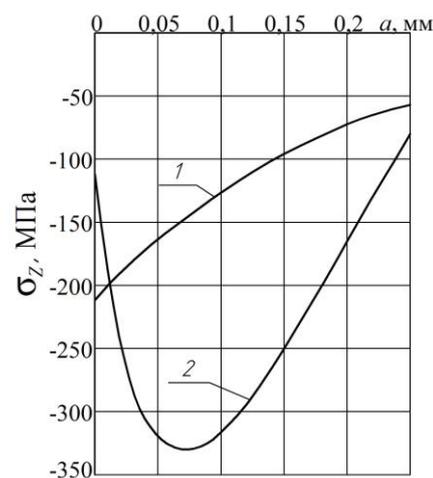
Распределения осевых остаточных напряжений σ_z по толщине a поверхностного слоя опасного сечения образцов с галтелями представлены на рис. 2. Из приведенных на рис. 1 и рис. 2 данных видно, что при радиусе галтели $r=0,5$ мм даже без непосредственного упрочнения галтельного перехода в опасном сечении образца за счёт концентрации напряжений [5] при упрочнении прилегающих зон наводятся сжимающие остаточные напряжения, наибольшая величина которых на поверхности достигает -210 МПа. При радиусе галтели $r=1$ мм с частичным упрочнением поверхности галтельного перехода наибольшие сжимающие остаточные напряжения достигают меньшей, чем при $r=0,5$ мм, величины (-167 МПа), что объясняется меньшей концентрацией остаточных напряжений [5].

Распределения остаточных напряжений в опасном сечении образцов при радиусе галтели $r=3$ мм и $r=5$ мм незначительно отличаются от распределения остаточных напряжений в гладких образцах. Установленные закономерности распределения остаточных напряжений в галтельных переходах различного радиуса после пневмодробеструйной обработки следует учитывать при прогнозировании предела выносливости деталей с галтелями по методике работы [1].

Шлицевые детали. Согласно ранее проведенному исследованию было установлено, что для зуба шлицевого вала опасным является сечение, находящееся на галтельном переходе (в неконтактирующей зоне) в диапазоне углов θ от 20 до 30 градусов. Угол θ отсчитывался от точки перехода эвольвентной поверхности зуба в поверхность

галтели радиуса $R=0,4$ мм в направлении поверхности впадины.

Для определения распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения были проведены расчёты методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN. Моделирование остаточных напряжений в поверхностном слое шлицевых деталей из стали 12Х2Н4А выполнено методом термоупругости по первоначальным деформациям образца-свидетеля [5, 6].



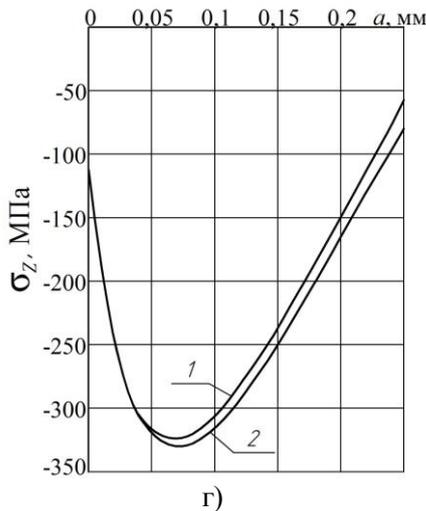


Рис. 2. Распределение осевых остаточных напряжений σ_z в образце-свидетеле (2) и в опасном сечении галтельного перехода (1) после ПДО: а) $r = 0,5$ мм, неупрочнённая поверхность галтели; б) $r = 1$ мм, частично упрочнённая поверхность галтели; в) $r = 3$ мм, полное упрочнение всех поверхностей; г) $r = 5$ мм, полное упрочнение всех поверхностей

Конечно-элементная модель представляла собой плоское сечение зуба шлицевой детали с наложением соответствующих граничных условий симметрии по перемещениям. При моделировании использовался плоский шестиузловой треугольный конечный элемент типа Shell. На рис. 3 приведено распределение окружных остаточных напряжений σ_φ по толщине a поверхностного слоя образца-свидетеля из стали 12Х2Н4А после фрезерования, которое необходимо для расчёта остаточных напряжений в шлицевых деталях. С использованием этого распределения по разработанной программе были получены распределения окружных остаточных напряжений σ_φ по толщине a поверхностного слоя зуба шлицевого вала при углах θ , равных 0, 10, 20 и 30 градусов для случая изготовления шлиц фрезерованием.

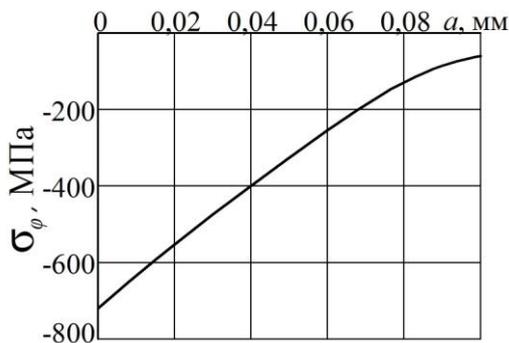


Рис. 3. Распределение окружных остаточных напряжений σ_φ в образце-свидетеле из стали 12Х2Н4А после фрезерования

Распределения окружных остаточных напряжений σ_φ по толщине a поверхностного слоя после фрезерования для различных значений угла θ галтельного перехода шлиц и исходная эпюра (образец-свидетель) приведены на рис. 4. Можно видеть, что остаточные напряжения в различных

сечениях зуба шлиц незначительно отличаются от остаточных напряжений образца-свидетеля.

Далее было проанализировано распределение окружных остаточных напряжений σ_φ по толщине поверхностного слоя в шлицевых деталях из стали 12Х2Н4А после цементации. На рис. 5 представлено распределение остаточных напряжений в образце-свидетеле после цементации.

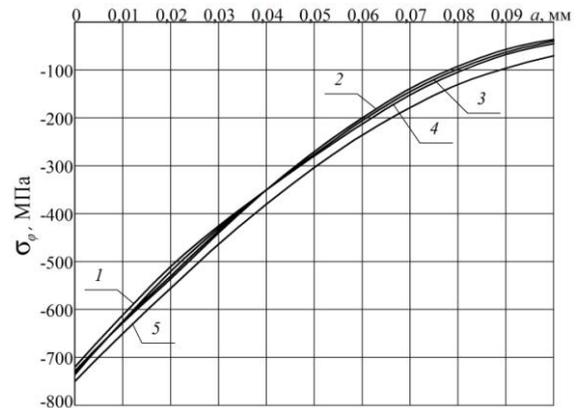


Рис. 4. Распределения окружных остаточных напряжений σ_φ по толщине поверхностного слоя зуба шлицевого вала из стали 12Х2Н4А после фрезерования: 1 – $\theta = 0^\circ$, 2 – $\theta = 10^\circ$, 3 – $\theta = 20^\circ$, 4 – $\theta = 30^\circ$, 5 – образец-свидетель

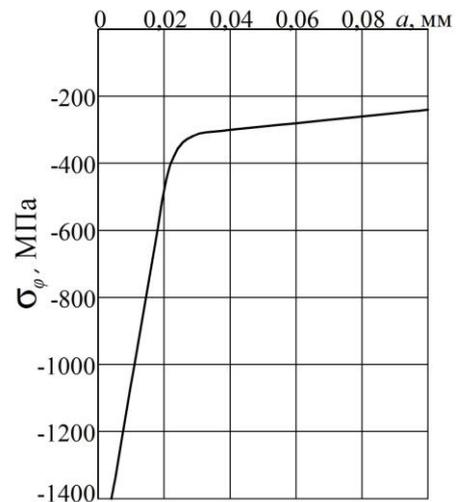


Рис. 5. Распределение окружных остаточных напряжений σ_φ в образце-свидетеле из стали 12Х2Н4А после цементации

Приведенное на рис. 5 распределение использовалось для расчёта остаточных напряжений в шлицевых деталях. Распределения окружных остаточных напряжений σ_φ по толщине a поверхностного слоя для различных значений угла θ галтельного перехода шлиц и исходная эпюра (образец-свидетель) приведены на рис. 6. Анализ результатов расчёта, представленных на рис. 6, показывает, что распределение окружных остаточных напряжений σ_φ по толщине поверхностного слоя галтельного перехода шлицевой детали после цементации практически одинаково для всех углов θ опасной зоны. При этом распределения остаточных

напряжений отличаются от исходного распределения для гладкого образца-свидетеля не более, чем на 5% (в меньшую сторону).

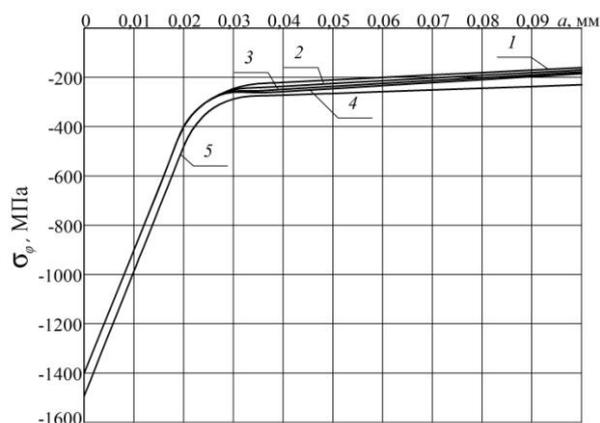


Рис. 6. Распределения окружных остаточных напряжений σ_{φ} по толщине поверхностного слоя зуба шлицевого вала из стали 12Х2Н4А после цементации: 1 – $\theta=0^{\circ}$, 2 – $\theta=10^{\circ}$, 3 – $\theta=20^{\circ}$, 4 – $\theta=30^{\circ}$, 5 – образец-свидетель

Выводы:

1. Использование образцов-свидетелей при расчёте остаточного напряжённо-деформированного состояния позволило определить распределение остаточных напряжений в образцах из стали 20 с галтельными переходами различного радиуса после пневмодробеструйной обработки. Полученное распределение остаточных напряжений необходимо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов с галтелями различного радиуса.

2. Установлено, что даже без непосредственной обработки дробью галтельных переходов малого радиуса в них возникают сжимающие остаточные

напряжения значительной величины за счёт концентрации напряжений.

3. Установлено, что для исследованных шлицевых деталей из стали 12Х2Н4А после фрезерования и цементации сжимающие остаточные напряжения в различных сечениях зуба шлиц незначительно (до 5%) отличаются от остаточных напряжений гладкого образца-свидетеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям: монография / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
2. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.
3. Биргер, И.А. Остаточные напряжения: монография. – М.: Машгиз, 1963. 232 с.
4. Стружанов, В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. 2010. №5 (21). С. 55-63.
5. Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям: монография / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. 124 с.
6. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. №3 (27). Ч. 3. С. 171-174.

MODELING OF THE RESIDUAL STRAINED STATE OF HARDENED PARTS BY RESIDUAL STRESSES OF REFERENCE SPECIMEN

© 2014 V.A. Kirpichev, V.S. Vakulyuk, A.S. Bukatiy, O.V. Karanaeva, V.V. Lunin

Samara State Aerospace University

In the research it is established that the reference specimens can be used for the calculation of residual stresses in surface hardened specimens with fillets and splined shafts.

Key words: reference specimen, strengthening processing, residual stresses, fillet, splined shaft

Viktor Kirpichev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Aircraft Faculty. E-mail: dean_fla@ssau.ru; Vladimir Vakulyuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Materials Resistance Department. E-mail: sopromat@ssau.ru; Aleksey Bukatiy, Candidate of Technical Sciences, Doctor Candidate at the Materials Resistance Department; Olsana Karanaeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Materials Resistance Department; Valentin Lunin, Post-graduate Student