

ВЫБОР ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЗОТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

© 2017

В. В. Сазанов аспирант кафедры сопротивления материалов;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
sopromat@ssau.ru

Для оценки эффективности азотирования деталей (химико-термическая обработка) обосновано применение корсетных образцов-свидетелей для проведения испытаний на усталость и гладких образцов-свидетелей – для определения остаточных напряжений в поверхностном слое. Расчётная часть исследования выполнена методом конечно-элементного моделирования с использованием комплексов ANSYS и PATRAN/NASTRAN. Расчётный комплекс ANSYS применён при определении коэффициента концентрации напряжений при изгибе корсетного образца. Используемые модели с гармоническими осесимметричными конечными элементами позволяют определять коэффициенты концентрации напряжений при растяжении-сжатии и изгибе деталей, представляющих собой тела вращения. Полученное значение коэффициента влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости достаточно точно согласуется с его экспериментальными значениями для азотирования и других видов химико-термической обработки корсетных образцов. Комплекс PATRAN/NASTRAN использован при расчёте напряжённо-деформированного состояния в корсетных образцах от действия остаточных напряжений, возникающих при азотировании поверхностей детали. Моделирование выполнено методом термоупругости, при этом в качестве исходных данных использованы экспериментальные эпюры распределения остаточных напряжений в гладких образцах. Установлено, что распределение осевых остаточных напряжений в опасном (наименьшем) сечении корсетного образца практически не отличается от распределения в гладких образцах. Полученные результаты являются основанием определять среднеинтегральные остаточные напряжения по распределениям остаточных напряжений в гладких образцах и использовать их при расчёте предела выносливости упрочнённых корсетных образцов. Результаты исследования позволяют считать, что оптимальными будут режимы азотирования, при которых среднеинтегральные остаточные напряжения являются наибольшими.

Поверхностное упрочнение; химико-термическая обработка; критерий среднеинтегральных остаточных напряжений; первоначальные деформации; конечно-элементное моделирование; корсетный образец-свидетель; предел выносливости.

Цитирование: Сазанов В.В. Выбор образцов-свидетелей для оценки эффективности азотирования поверхности деталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 1. С. 142-151. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-1-142-151

Введение

Повышение ресурса и надёжности работы деталей машин являются важнейшими задачами при их проектировании, производстве и эксплуатации. Для получения большой твёрдости в поверхностном слое детали с сохранением вязкой сердцевины, что обеспечивает высокую износостойкость и одновременно высокую динамическую прочность, применяют химико-термическую обработку. Химико-термическая обработка отличается от других видов термической обработки тем, что при этой обработке кроме структурных изменений происходит изменение состава поверхностного слоя путём диффузии в металл различных элементов. Наиболее широко распространёнными её видами являются цементация, азотирование, цианирование, борирование. Азотирование конструкционных сталей для повышения сопротивления усталости в настоящее время

стало достаточно широко применяться в ряде отраслей отечественного машиностроения. Так как образование азотосодержащих фаз в поверхностном слое идёт с увеличением объёма, то поверхность азотированной детали испытывает напряжения сжатия. Напряжения сжатия на поверхности вызывают повышение предела выносливости, поскольку усталостные трещины возникают в результате действия растягивающих напряжений.

Азотирование является весьма дорогим видом химико-термической обработки, так как требует наличия специального оборудования, расходных материалов, а сам процесс является весьма длительным по времени. Контроль качества азотирования поверхности деталей достаточно строго регламентирован нормативными документами, и с точки зрения износостойкости рабочих (трущихся) поверхностей наиболее важными контролируемыми параметрами являются твёрдость и толщина упрочнённого слоя. Проверки выполняются как на самой детали, так и на образцах-свидетелях, которые вместе с ней проходят полный цикл технологического процесса химико-термической обработки. Однако изучение вопроса повышения предела выносливости за счёт создания при азотировании сжимающих остаточных напряжений [1 – 4] свидетельствует о том, что этих параметров недостаточно. Для разработанных расчётно-экспериментальных методов прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей в качестве исходных данных необходимо иметь зависимость остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. Определение данной зависимости, как правило, выполняется на специальных образцах-свидетелях и реже – на вырезанных из самой детали. Экспериментально правильность выбора режимов технологического процесса химико-термической обработки, в том числе и азотирования, подтверждается испытаниями на усталость на специальных образцах и, что очень важно, до натуральных испытаний изделия или механизма в целом.

Постановка задачи

Применение методов поверхностного упрочнения деталей машин, при условии правильного выбора технологического процесса, приводит к значительному повышению их сопротивления усталости. Задачей данного исследования является обоснование возможности использования для оценки эффективности азотирования и других видов химико-термической обработки деталей определённых типов образцов-свидетелей. Известно, что для испытаний на усталость применяются две формы рабочей части гладких образцов: с постоянным сечением и с переменным сечением (корсетные образцы). Недостатком первой формы образцов является концентрация напряжений в месте перехода цилиндрической части к галтели, что приводит к разрушению преимущественно вблизи галтели, и поэтому результаты испытаний не могут характеризовать истинное сопротивление материала усталости. Поэтому для испытаний на усталость в качестве образцов-свидетелей предлагается использовать корсетные образцы, лишённые отмеченного недостатка. Для замера остаточных напряжений в поверхностном слое лабораторными методами предлагается применять в качестве образцов-свидетелей гладкие образцы (плоские пластины, цилиндрические втулки), так как данный вариант является более точным, хорошо отработанным и простым в исполнении.

Метод решения

Поставленная задача выбора образцов-свидетелей для оценки эффективности азотирования поверхности деталей с позиций повышения сопротивления усталости решалась путём анализа и сравнения экспериментальных данных при изучении корсетных и гладких образцов с результатами расчётов остаточного напряжённого состояния, кото-

рые, в свою очередь, были получены методом конечно-элементного моделирования [5]. Влияние остаточных напряжений на повышение предела выносливости после упрочнения поверхности детали оценивалось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений, определяемых на глубине нераспространяющейся трещины усталости [1].

Результаты расчётно-экспериментальных исследований

В проведённом исследовании были использованы экспериментальные результаты изучения влияния азотирования корсетных образцов круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм (рис. 1) из сплава ВНС-17 на предел выносливости через величину и распределение остаточных напряжений поверхностного слоя [1]. Образцы после шлифования подвергались азотированию на различных режимах. После азотирования шлифованием обрабатывалась только коническая часть образцов и поэтому в рабочей (корсетной) части остаточное напряжённое состояние оставалось неизменным.

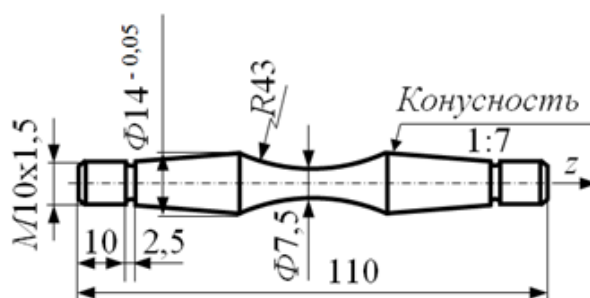


Рис. 1. Корсетный образец для испытаний на усталость

Известно, что прогнозирование влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости деталей с концентраторами напряжений при растяжении-сжатии и изгибе в случае симметричного цикла $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ производится по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1–3]:

$$(\Delta\sigma_{-1})_{расч} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (1)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$.

Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ определяется по зависимости, установленной в работе [4]:

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081\alpha_{\sigma}, \quad (2)$$

где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Для решения поставленной задачи об использовании корсетных образцов при оценке эффективности азотирования поверхности деталей необходимо:

- через теоретический коэффициент концентрации напряжений в опасном (наименьшем) сечении определить по формуле (2) коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ и сравнить его со средними значениями по результатам испытаний на усталость;

- методом конечно-элементного моделирования определить распределение остаточных напряжений по глубине опасного сечения и сравнить его с экспериментальным распределением в гладком образце-свидетеле.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ в классическом варианте определяется по графикам справочника [6]. Однако это приводит, как правило, к существенным погрешностям, особенно на границах графиков. Поэтому для определения α_σ требуется разработка более точных и универсальных методов. В данной работе расчёты выполнялись методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса ANSYS. При моделировании был применён гармонический осесимметричный конечный элемент типа PLANE 83 объёмного напряжённо-деформированного состояния с восемью узлами, который позволяет на одной и той же модели определить коэффициент концентрации напряжений при растяжении и изгибе. На рис. 2 представлены осевые σ_z напряжения в конечно-элементной модели корсетного образца при изгибе (в МПа). Величина изгибающего момента на правом торце модели выбиралась таким образом, чтобы номинальные осевые напряжения в наименьшем сечении образца равнялись 100 МПа.

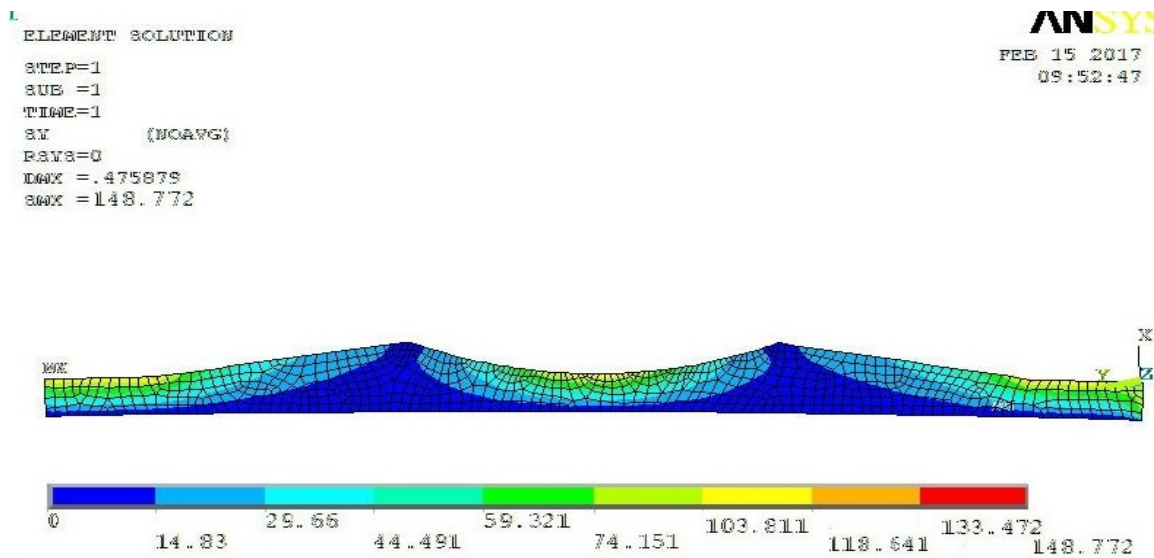


Рис. 2. Осевые σ_z напряжения в конечно-элементной модели корсетного образца при изгибе

По результатам расчёта при изгибе получено значение $\alpha_\sigma = 1,038$. Вычисленное с использованием этой величины по формуле (2) значение коэффициента влияния $\bar{\psi}_\sigma = 0,528$ достаточно хорошо согласуется со средними значениями $\bar{\psi}_\sigma$ по результатам испытаний для различных видов химико-термической обработки [1], которые изменяются в пределах от 0,513 до 0,553. Это означает, что расчёт приращения предела выносливости за счёт упрочнения поверхности, выполняемый по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений по формуле (1), справедлив и для корсетных образцов, которые относятся к деталям с малой концентрацией напряжений.

Для определения распределения остаточных напряжений по толщине опасного сечения корсетных образцов методом конечно-элементного моделирования были проведены расчёты с использованием комплекса NASTRAN/PATRAN. Моделирование остаточных напряжений в упрочнённом слое выполнено методом термоупругости по первоначальным деформациям [6], которые определялись на моделях гладких образцов. Конечно-элементная модель представляет собой четвертую часть осевого сечения образца с наложением соответствующих граничных условий симметрии по перемеще-

ниям. При моделировании использован плоский шестиузловой треугольный конечный элемент типа 2D-solid, решение выполнялось в осесимметричной постановке.

Распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов, полученные экспериментальным методом с использованием расчётных зависимостей работы [7], приведены на рис. 3. Соответствующие эпюрам остаточных напряжений (рис. 3) режимы термической и химико-термической обработки корсетных и гладких образцов приведены в табл. 1.

На рис. 4 представлен фрагмент остаточного напряжённого состояния конечно-элементной модели корсетного образца для одного из режимов азотирования.

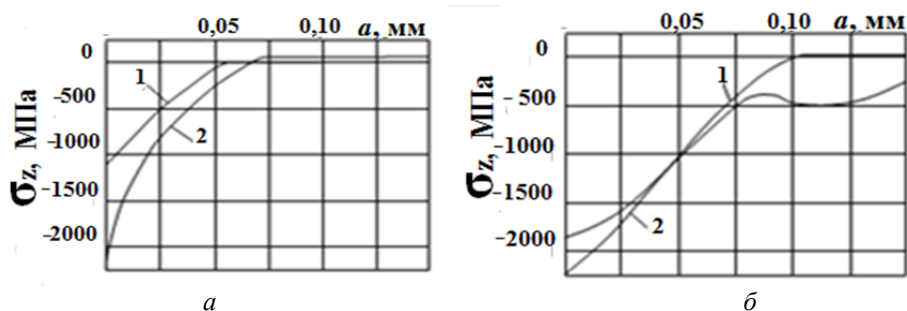


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах из сплава ВНС-17

Таблица 1. Режимы термической и химико-термической обработки корсетных и гладких образцов

№ п/п	Обозначение на рис. 3	Режимы термической и химико-термической обработки
1	$a - 1$	Закалка 860 °С; отпуск 580 °С – 10 часов
2	$a - 2$	Закалка 860 °С; отпуск 580 °С – 10 часов; азотирование 630 °С – 20 часов; отпуск 600 °С – 2 часа
3	$b - 1$	Закалка 860 °С; отпуск 580°С – 30 часов, азотирование 630°С – 20 часов
4	$b - 1$	Закалка 860°С; отпуск 580°С – 10 часов; азотирование 630°С – 20 часов; отпуск 600°С – 2 часа

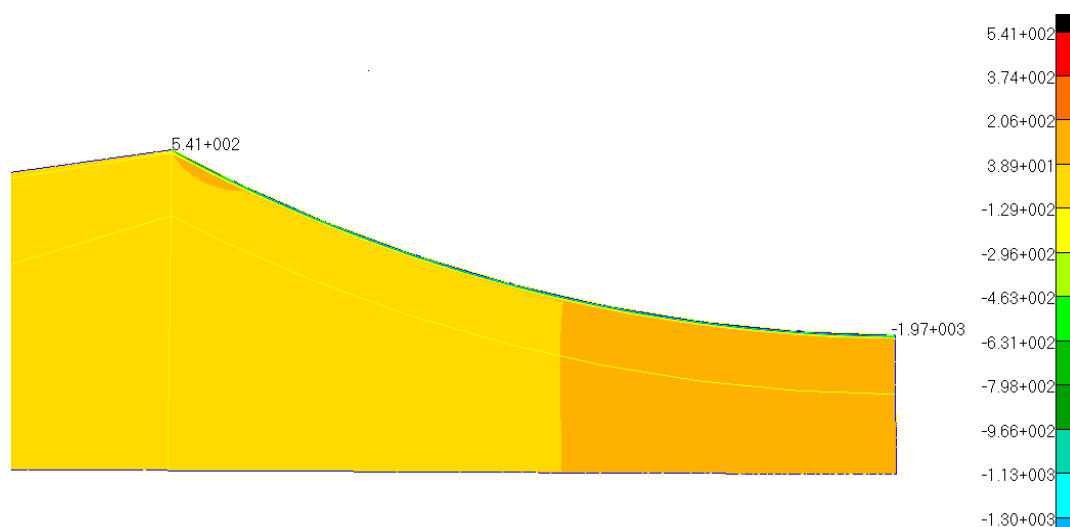


Рис. 4. Напряжённое состояние конечно-элементной модели корсетного образца; осевые σ_z остаточные напряжения (режим 3, табл. 1)

На рис. 5–8 приведены результаты расчётов распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного (наименьшего) сечения корсетных образцов и для сравнения и ними приведены экспериментальные эпюры гладких образцов для соответствующих режимов термической и химико-термической обработок.

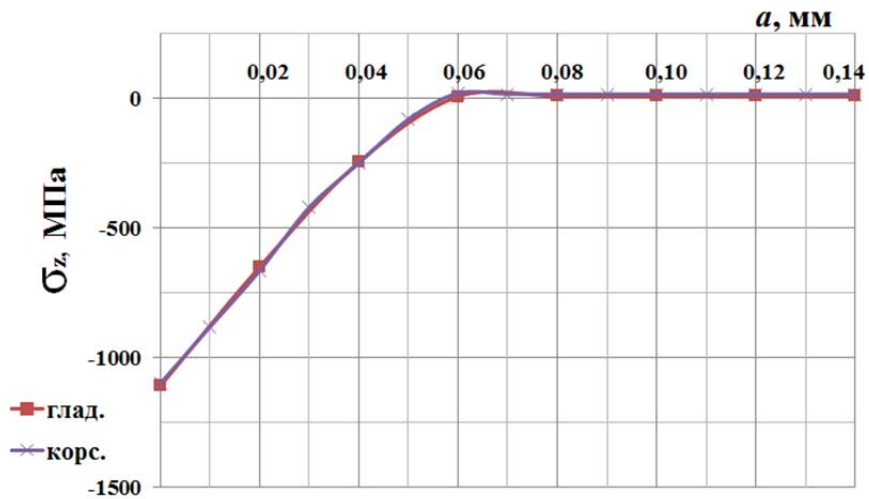


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (режим 1, табл. 1)

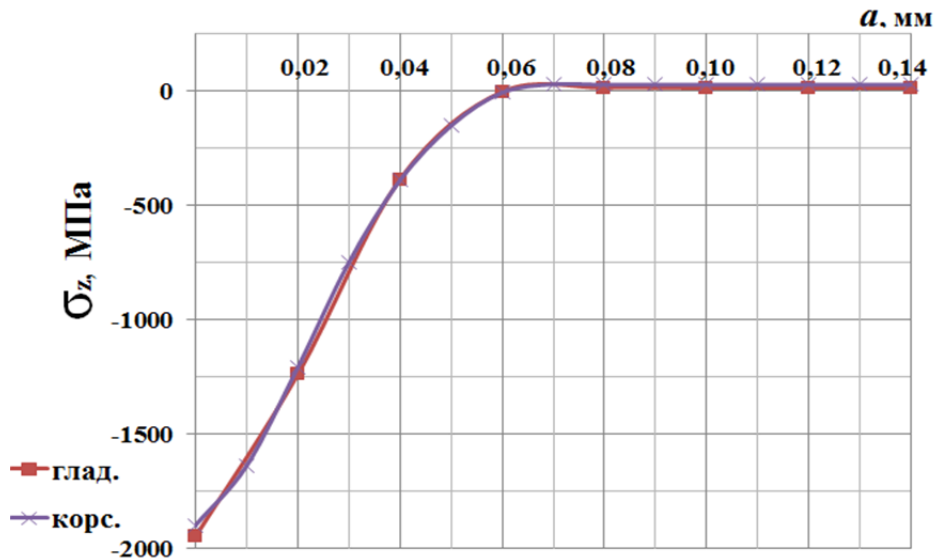


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (режим 2, табл. 1)

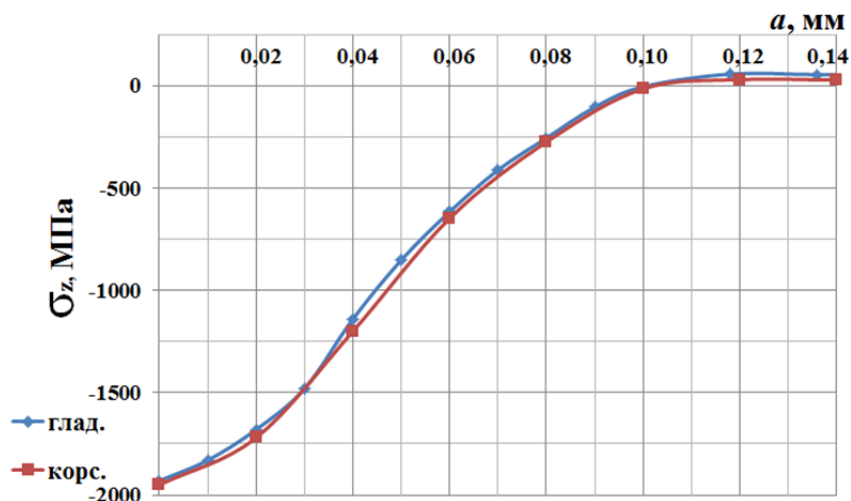


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (режим 3, табл. 1)

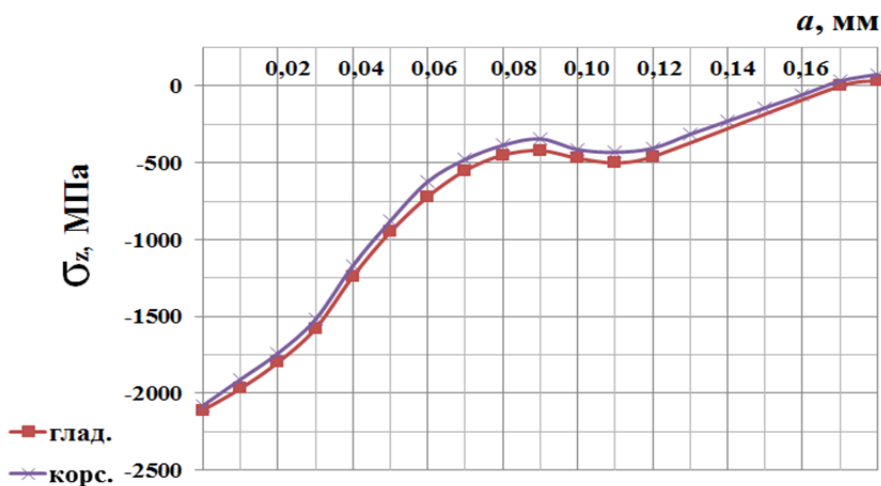


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (режим 4, табл. 1)

Анализ результатов расчётов, представленных на графиках рис. 5–8, показал, что распределения осевых остаточных напряжений σ_z по толщине a поверхностного слоя наименьшего сечения корсетных образцов для всех рассмотренных вариантов состояния упрочнённой поверхности практически совпадают с аналогичными распределениями для гладких образцов и отличие от исходной эпюры для гладкого образца не превышает 3%. Из полученных в исследовании результатов следует, что с достаточной точностью критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ можно определять по экспериментальной эпюре остаточных напряжений гладкого образца.

Таким образом, полученные результаты расчётов и их сравнение с экспериментальными данными свидетельствуют о том, что для оценки эффективности азотирования поверхности деталей с точки зрения повышения сопротивления усталости наиболее целесообразно использовать образцы двух типов: гладкие – для определения зависимости остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя и корсетные – для испытаний на усталость. Необходимо также отметить экономическую сторону предложенного метода решения задачи об оценке эффективности азотирования поверхности деталей, которая заключается в том, что значительно сокращаются объём и время проведения

испытаний на усталость. Правильность выбора режимов технологической операции подтверждается испытанием лишь одной партии корсетных образцов и сходимостью их результатов с расчётным определением предела выносливости.

Выводы

1. На основании проведённых исследований установлено, что определение остаточных напряжений в поверхностном слое корсетных образцов после азотирования можно проводить на гладких образцах-свидетелях.

2. Расчёт критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для вычисления приращения предела выносливости азотированных деталей представляется возможным проводить по результатам определения остаточных напряжений в поверхностном слое гладких образцов-свидетелей.

3. Оптимальными будут режимы азотирования деталей, при которых критерий среднеинтегральных остаточных напряжений будет наибольшим.

Заключение

Предложенный в исследовании метод оценки эффективности азотирования поверхности деталей, выполняемого с целью повышения их сопротивления усталости, может быть рекомендован и для других видов химико-термической обработки с проведением соответствующих экспериментов и расчётов на соответствующих образцах-свидетелях и на самой детали.

Библиографический список

1. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. 125 с.

2. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29-32.

3. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1988. № 8. С. 22-26.

4. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Труды Международной научно-технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций». Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. С. 678-685.

5. Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). 2011. № 3(27), ч. 3. С. 171-174.

6. Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 302 с.

7. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Сб. трудов «Остаточные напряжения». Вып. 53. Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1971. С. 32-42.

SELECTION OF REFERENCE SPECIMENS FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF PART SURFACE NITRIDING

© 2017

V. V. Sazanov Postgraduate Student of the Department of Strength of Materials;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
sopromat@ssau.ru

The use of corset reference specimens for carrying out fatigue tests and smooth reference specimens for determining residual stresses in a surface layer to assess the sufficiency of nitriding (thermochemical processing) is substantiated in the paper. The calculations are carried out by finite element simulation using the ANSYS and PATRAN/NASTRAN software complexes. The ANSYS complex is used to determine the stress concentration factor for the case of corset specimen bending. The employed models with harmonic axisymmetric finite elements make it possible to find the stress concentration factors in the case of tension- and- compression and bending of body-of-rotation parts. The obtained value of the influence of the coefficient of residual stresses on the endurance limit increase is in quite good agreement with its experimental values for nitriding and other types of thermochemical treatment of corset specimens. The PATRAN/NASTRAN complex is used to calculate the stress-strain state in corset specimens depending on residual stresses arising on a part surface under nitriding. Modeling is performed by the thermoelasticity method, with experimental diagrams of residual stresses in smooth specimens used as initial data. It is established that the distribution of axial residual stresses in the dangerous (smallest) section of a corset specimen practically does not differ from the distribution in smooth specimens. The results obtained provide the basis for determining average integral residual stresses by the distribution of residual stresses in smooth specimens and using them to calculate the endurance limit for hardened corset specimens. The results of the study allow making a conclusion that the most optimal nitriding practices are those wherein the average integral residual stresses are maximal.

Surface hardening; nitriding; average integral residual stress criterion; initial deformations; finite element modeling; reference specimen; endurance limit.

Citation: Sazanov V.V. Selection of reference specimens for assessing the efficiency of part surface nitriding. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 1. P. 142-151. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-1-142-151

References

1. Pavlov V.F., Kirpichev V.A, Vakulyuk V.S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Prediction of surface hardened parts' fatigue resistance by residual stresses]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.
2. Pavlov V.F. On connection between residual stresses and the endurance limit under bending in stresses concentration conditions. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1986. No. 8. P. 29-32. (In Russ.)
3. Pavlov V.F. Influence of a value and a distribution of residual stresses in the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Report 1. Solid parts. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1988. No. 8. P. 22-26. (In Russ.)
4. Kirpichyov V.A., Filatov A.P., Karanaeva O.V., Chirkov A.V., Semyonova O.Yu. Surface hardened parts endurance limit prediction under various degree of stress concentration. *Proceedings International Conference «Strength of materials and structural elements»*. Kiev: G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Ac. Sci. of Ukraine Publ., 2011. P. 678-685. (In Russ.)
5. Peterson R.E. Stress concentration factors. New York: Wiley, 1974. 146 p.

6. Chirkov A.V., Sazanov V.P., Samoylov V.A., Larionova Y.S. Modeling of redistribution of residual stresses in the cylindrical specimens after advancing surface plastic forming. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No. 3 (27), part 3. P. 171-174. (In Russ.)

7. Ivanov S.I. K opredeleniyu ostatochnykh napryazheniy v tsilindre metodom kolets i polosok. *Sb. trudov «Ostatochnye napryazheniya»*. Iss. 53. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1971. P. 32-42. (In Russ.)