

## ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

**В.П. Сазанов,  
В.С. Вакулюк,  
О.Ю. Семёнова,  
В.В. Лунин,  
А.В. Письмаров**

Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени академика С. П. Королёва

Московское шоссе, 34,  
г. Самара, Российская Федерация,  
443086

sopromat@ssau.ru

*Разработана расчётно-экспериментальная методика оценки эффективности химико-термической обработки поверхности деталей с точки зрения повышения сопротивления усталости. Для этого обосновано применение двух типов образцов-свидетелей, используемых в экспериментальной составляющей исследований. Рекомендовано использование гладких образцов-свидетелей для определения остаточных напряжений в поверхностном слое и корсетных образцов-свидетелей для проведения испытаний на усталость. В работе использованы результаты экспериментального исследования влияния двух видов химико-термической обработки (цементации и азотирования) на сопротивление усталости корсетных образцов из высокопрочных сплавов ВКС-5 и ВНС-17. В расчётной части исследования использован метод конечно-элементного моделирования с применением комплексов ANSYS и PATRAN/NASTRAN. Моделирование остаточного напряжённого состояния выполнено методом термоупругости. На основании проведённых расчётов установлено, что распределение осевых остаточных напряжений в опасном (наименьшем) сечении корсетного образца практически не отличается от подобного распределения в гладких образцах. Приращение предела выносливости за счёт упрочнения корсетных образцов определялось с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. Полученные результаты исследования позволяют также считать, что оптимальными будут те технологические режимы химико-термической обработки, при которых среднеинтегральные остаточные напряжения являются наибольшими.*

**Ключевые слова:** *поверхностное упрочнение; химико-термическая обработка; остаточные напряжения; первоначальные деформации; конечно-элементное моделирование; корсетный образец; предел выносливости*

### 1 Введение

Одной из важнейших задач при проектировании, производстве и эксплуатации изделий машиностроения является повышение надёжности и ресурса их работы. Для деталей машин, испытывающих переменные напряжения, наиболее эффективным способом повышения сопротивления усталости является поверхностное упрочнение [1-3]. При такой технологической операции в тонком поверхностном слое создаются значительные сжимающие напряжения, которые и препятствуют развитию усталостной трещины.

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 (ХТО). Химико-термическая обработка отличается от других видов термической обработки тем, что при ней, кроме структурных изменений, происходит изменение состава поверхностного слоя путём диффузии в металл различных элементов. Возможность диффузии, а следовательно и ХТО, определяется следующими обстоятельствами:

- растворимостью диффундирующего элемента в основном металле;

– стремлением системы к выравниванию концентрации во всём объёме;

– тепловым колебанием атомов.

Так как протекающий в поверхностном слое процесс идёт с увеличением объёма, то в нём и возникают остаточные напряжения сжатия.

Наиболее широко распространёнными видами ХТО в машиностроении являются цементация и азотирование. При цементации происходит поверхностное насыщение стали углеродом, в результате чего получается высокоуглеродистый поверхностный слой. Так как для цементации берётся низкоуглеродистая сталь, то сердцевина остаётся мягкой и вязкой, несмотря на то, что после цементации сталь подвергается закалке. После закалки для снятия внутренних напряжений цементированные детали подвергаются отпуску при низкой температуре. Азотированием называют процесс насыщения стали азотом. Основное назначение процесса азотирования – повышение твёрдости и износостойкости. Для этой цели азотируют специальные стали, содержащие элементы, дающие нитриды высокой термической устойчивости (хром, молибден, алюминий). Для азотирования характерными являются исключительно высокая поверхностная твёрдость и неглубокий диффузионный слой в отличие от цементации, где при относительно небольшой продолжительности процесса достигается более значительная глубина диффузионного слоя при значительно меньшей его твёрдости. Преимущество азотированного слоя – в его более высокой износоустойчивости, но азотированные детали значительно дороже, так как процесс требует более длительного времени и для азотирования применяются дорогостоящие легированные стали. Кроме того, более тонкий азотированный слой в отличие от цементированного слоя может выдерживать меньшие удельные нагрузки.

## 2 Цель исследования

Основной целью исследования является разработка расчётно-экспериментальной методики, позволяющей оценить эффективность химико-термической обработки с точки зрения повышения предела выносливости по сравнению с неупрочнёнными деталями, а также иметь возможность выбора наиболее оптимального технологического режима. Решаемая в исследовании задача заключается в том, что требуется обосновать следующие положения:

– для испытаний на усталость предпочтительно использовать корсетные образцы, которые по сравнению с цилиндрическими образцами в наименьшем (опасном) сечении имеют теоретический коэффициент концентрации, близкий к единице;

– экспериментальное определение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя целесообразно выполнять на гладких образцах, поскольку этот метод более точный, менее трудоёмкий и позволяет получить две эпюры компонент напряжений вместо одной на корсетных образцах.

## 3 Основные результаты исследования

В проведённом исследовании были использованы экспериментальные результаты изучения влияния химико-термической обработки корсетных образцов круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм (рисунки 1) из сплава ВКС-5 (цементация) и сплава ВНС-17 (азотирование) на предел выносливости через величину и распределение остаточных напряжений поверхностного слоя [3]. Образцы после шлифования подвергались соответствующему виду термической и химико-термической обработке на различных технологических режимах. После ХТО шлифованием обрабатывалась только коническая часть образцов и поэтому в

рабочей (корсетной) части остаточное напряжённое состояние оставалось неизменным.

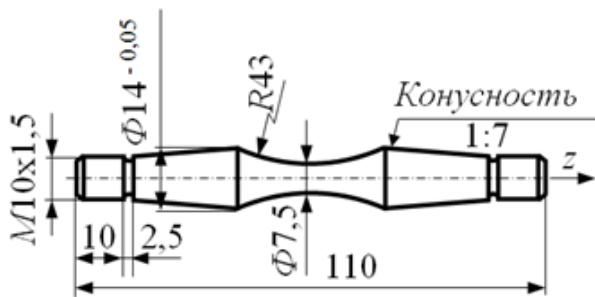


Рисунок 1. Корсетный образец для испытаний на усталость

Режимы термической и химико-термической обработки корсетных и гладких образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Вариант	Режимы обработки
ВКС-5	1	исходное состояние: закалка 900 °С; отпуск 600 °С – 1 час
	2	ионная цементация 950 °С – 1 час; отпуск 650 °С – 3 час
	3	цементация 940 °С – 6 час; отпуск 650 °С – 3 час; закалка 900 °С; обработка холодом: -70 °С
ВКС-17	1	исходное состояние: закалка 860 °С; отпуск 580 °С – 10 час
	2	закалка 860 °С; отпуск 580 °С – 10 час; азотирование 560 °С – 36 час

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 средне-интегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [2, 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 [3]:

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

где  $\alpha_{\sigma}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Для решения поставленной задачи об использовании корсетных образцов при оценке эффективности ХТО 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  $\alpha_{\sigma}$  в классическом варианте определяется по графикам справочника [4]. Однако это приводит, как правило, к существенным погрешностям, особенно на границах графиков. Поэтому для определения  $\alpha_{\sigma}$  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. По результатам расчёта при изгибе получено значение  $\alpha_{\sigma} = 1,038$ . Вычисленное с использованием этой

величины по формуле (2) расчётное значение коэффициента влияния  $\bar{\psi}_\sigma = 0,528$ .

Для определения распределений остаточных напряжений по толщине опасного сечения корсетных образцов методом конечно-элементного моделирования были проведены расчёты с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN [5-7]. Моделирование остаточных напряжений в упрочнённом слое выполнено методом термоупругости по первоначальным деформациям [5, 8], которые определялись на моделях гладких образцов сплошного сечения диаметром 7,5

мм. В качестве исходных данных использованы распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине а упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов, полученные экспериментальным методом с использованием расчётных зависимостей работы [9].

На рисунках 2-3 представлены фрагменты остаточного напряжённого состояния конечно-элементной модели корсетного образца для одного из режимов азотирования и цементации.

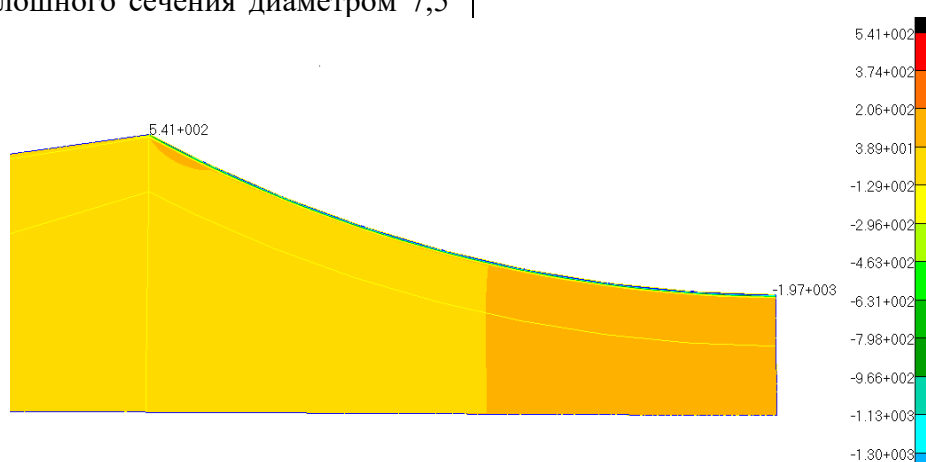


Рисунок 2. Напряжённое состояние конечно-элементной модели корсетного образца; осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения (ВНС-17, режим 2, таблица 1)

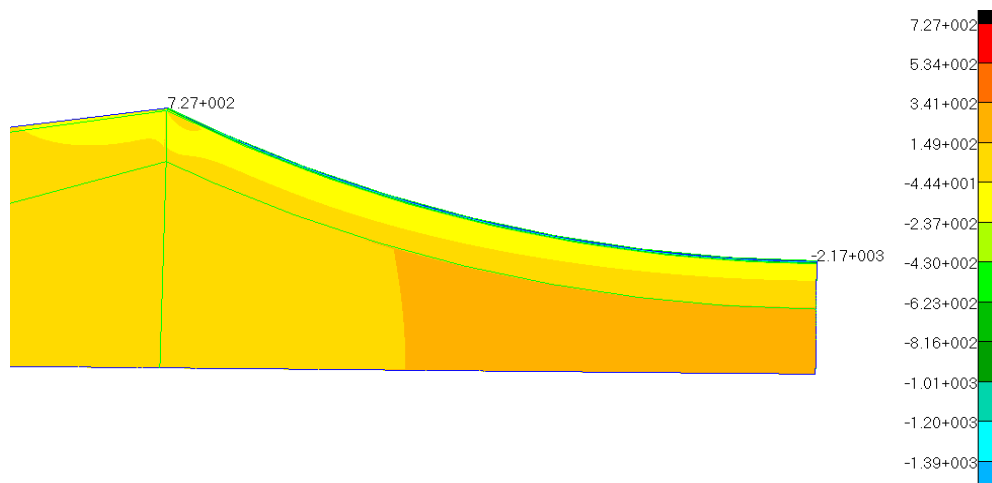


Рисунок 3. Напряжённое состояние конечно-элементной модели корсетного образца; осевые остаточные напряжения (ВКС-5, режим 3, таблица 1)

На рисунках 4–8 приведены результаты расчётов распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного

(наименьшего) сечения корсетных образцов и для сравнения с ними приведены экспериментальные эпюры гладких образцов для соответствующих режимов термической и химико-термической обработок.

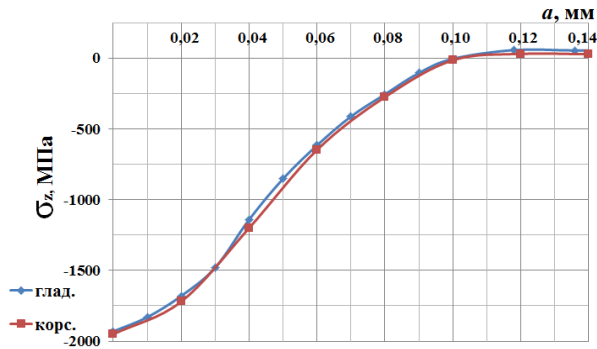


Рисунок 4. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (ВНС-17, режим 1, таблица 1)

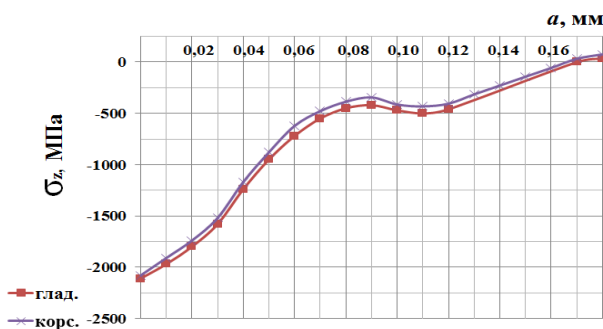


Рисунок 5. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (ВНС-17, режим 2, таблица 1)

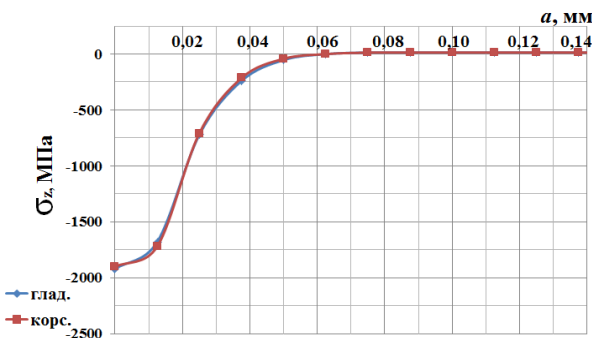


Рисунок 6. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (ВКС-5, режим 1, таблица 1)

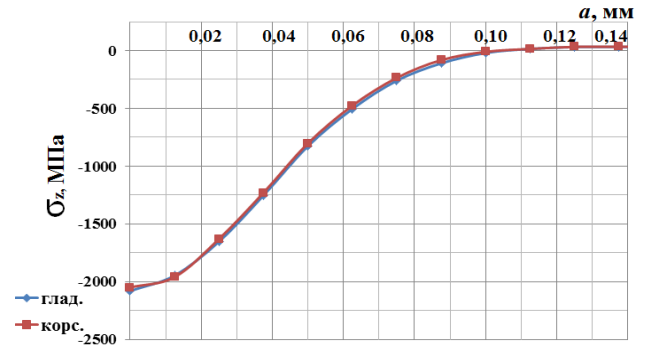


Рисунок 7. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (ВКС-5, режим 2, таблица 1)

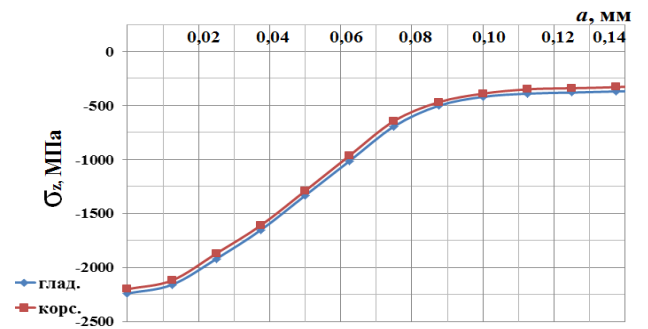


Рисунок 8. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (ВКС-5, режим 3, таблица 1)

Анализ результатов расчётов, представленных на графиках рисунки 4–8, показывает, что распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине  $a$  поверхностного слоя наименьшего сечения корсетных образцов для всех рассмотренных вариантов состояния упрочнённой поверхности практически совпадает с аналогичным распределением 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.

В таблице 2 приведены результаты определения среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ , коэффициента влияния  $\bar{\psi}_\sigma$  и результаты испытаний на

усталость корсетных образцов (база | испытаний – 3·10<sup>6</sup> циклов нагружения).

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Материал	Вариант	Режимы обработки	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
ВКС-5	1	исходное состояние: закалка 900 °С; отпуск 600 °С – 1 час	760	-136	–
	2	ионная цементация 950 °С – 1 час; отпуск 650 °С – 3 час	900	-389	0,553
	3	цементация 940 °С – 6 час; отпуск 650 °С – 3 час; закалка 900 °С; обработка холодом: -70 °С	1040	-672	0,522
ВНС-17	1	исходное состояние: закалка 860 °С; отпуск 580 °С – 10 час	640	-372	–
	2	закалка 860 °С; отпуск 580 °С – 10 час; азотирование 560 °С – 36 час	760	-606	0,513

Приведённые в таблице 2 результаты расчёта и испытаний на усталость корсетных образцов показывают, что химико-термическая обработка значительно повышает предел выносливости. Вычисленное с использованием формулы (2) расчётное 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, 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.

Таким образом, полученные результаты расчётов и их сравнение с экспериментальными результатами свидетельствуют о том, что для оценки эффективности ХТО 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. Следует также добавить, что для определения экспериментальных эпюр остаточных напряжений гладкий образец сплошного сечения заменяется втулкой с толщиной стенки, равной половине диаметра сплошного цилиндра [10]. В этом случае упрощается изготовление колец и полосок для экспериментального определения эпюр остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя [6].

Необходимо также отметить экономическую сторону предложенного метода решения задачи об оценке эффективности ХТО поверхности деталей, которая заключается в том, что значительно сокращаются объём и время проведения испытаний на усталость. Правильность выбора режимов технологической операции подтверждается испытанием лишь двух партий корсетных образцов и сходимостью их результатов с расчётным определением предела выносливости.

#### 4 Заключение

1. На основании проведённых исследований установлено, что экспериментальное определение остаточных напряжений в поверхностном слое корсетных образцов после ХТО

целесообразно проводить на гладких образцах-свидетелях.

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

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

4. Предложенный в исследовании метод оценки эффективности цементации и 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 самой детали.

#### Список использованных источников

[1] Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.

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

[3] Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулук В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.

[4] Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 304 с.

[5] Сазанов В.П., Кирпичёв В.А., Вакулук В.С., Павлов В.Ф. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. №2 (68). С. 35-40.

[6] Сазанов В.П., Чирков А.В., Семёнова О.Ю., Иванова А.В. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN // Вестник СамГТУ. Сер.: Технич. науки. 2012. №1 (33). С. 106-114.

[7] Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулук В.С., Сазанов В.П. Влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра // Известия вузов. Авиационная техника. 2014. №3. С. 324-326.

[8] Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 341 с.

[9] Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения // Куйбышев: КуАИ. 1971. Вып. 53. С. 32-42.

[10] Сазанов В.П., Семёнова О.Ю., Кирпичёв В.А., Вакулук В.С. Математическое моделирование первоначальных деформаций в поверхностно упрочнённых деталях при выборе образца-свидетеля // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20. №3 (73). С. 31-37.

## AN EVALUATION OF PARTS' FATIGUE RESISTANCE AFTER SURFACE THERMO CHEMICAL MACHINING

*In order to raise a fatigue resistance the calculation-experimental method of parts' surface thermo chemical machining efficiency has been carried out. The employment of two types of reference specimens in experiments has been substantiated. The employment of smooth reference specimens for a determination of residual stresses in a surface layer and of corset reference specimens for fatigue tests has been recommended. The results of experimental study of two types of thermo chemical machining (cementation and nitriding) influence on a fatigue resistance of corset specimens made of high-strength alloys BKC-5 and BHC-17 have been used in the work. The calculations of the study have been carried out by the Finite Elements Modeling method using the calculation complexes ANSYS and PATRAN/NASTRAN. The residual strained state modeling is carried out by thermo elasticity method. On grounds of conducted calculation it's been stated that an axial residual stresses distribution in a dangerous (smallest) section of a corset specimen doesn't practically differ from a similar distribution in smooth specimens. An endurance limit increment due to corset specimens hardening was determined with use of the average integral residual stresses criterion. Carried out results let also maintain that the optimal regimes of thermo chemical machining are the regimes under which average integral residual stresses are maximum.*

**Key words:** *surface hardening; thermo-chemical machining; residual stresses; initial deformations; finite element modeling; corset specimen; endurance limit*

**Vyacheslav P. Sazanov,  
Vladimir S. Vakulyuk,  
Ol'ga Yu. Semenova,  
Valentin V. Lunin  
Andrej V. Pismarov**

Samara National Research University  
34, Moskovskoe shosse, Samara,  
443086, Russian Federation

pavlov.vf@ssau.ru

## References

- [1] Pavlov, V.F., (1986) O svyazi ostatochnykh napryazhenij i predela vynoslivosti pri izgibe v usloviyah koncentracii napryazhenij [On connection between residual stresses and endurance limit under bending in stresses concentration conditions]. Izvestiya vusov. Mashinostroeniye [Universities News. Mechanical Engineering], no. 8, pp. 29-32. (in Russian).
- [2] Pavlov, V.F., (1988) Vliyanie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniya ostatochnykh napryazhenij v poverhnostnom sloe detali s koncentratorom. Soobshchenie I. Sploshnye detali [The influence of residual stresses in a part with a concentrator surface layer value and distribution on the endurance limit. Report 1. Solid parts]. Izvestiya vusov. Mashinostroeniye [Universities News. Mechanical Engineering], no. 8, pp. 22-26. (in Russian).
- [3] Pavlov, V.F., Kirpichev, V.A., Vakulyuk, V.S., (2012) Prognozirovaniye soprotivleniya ustalosti poverhnostno uprochnyonnykh detalej po ostatochnym napryazheniyam [The prediction of surface hardened parts fatigue resistance by residual stresses]. Samara: Izdatel'stvo SNC RAN [Samara: Samara scientific centre Publishing House of the Russian Academy of Sciences], 125 pp. (in Russian).
- [4] Peterson, R.E., (1977) Koeffitsienty koncentracii napryazhenij [Stresses concentration coefficients]. M.: Mir [M.: Publishing House «MIR»], 304 pp. (in Russian).
- [5] Sazanov, V.P., Kirpichev, V. A., Vakulyuk, V.S., Pavlov, V.F., (2015) Opredelenie pervonachal'nykh deformacij v uprochnyonnom sloe cilindricheskoj detali metodom konechno-ehlementnogo modelirovaniya s ispol'zovaniem raschyotnogo kompleksa PATRAN/NASTRAN [The determination of initial deformations in the surface layer of a cylindrical part by the finite elements modeling method with use of the calculation program complex PATRAN/NASTRAN]. Vestnik UGATU [Ufa State Aviation Technical University bulletin], vol. 19, no. 2 (68), pp. 35-40. (in Russian).
- [6] Sazanov, V.P., Chirkov, A.V., Semenova, O.Yu., Ivanova, A.V., (2012) Modelirovaniye ostatochnogo napryazhyonnogo sostoyaniya detali v usloviyah koncentracii napryazhenij s ispol'zovaniem programmno kompleksa PATRAN/ NASTRAN [The residual strain state of parts modeling under stress concentration conditions using the calculation program complex NASTRAN/PATRAN]. Vestnik SamGTU [Samara State Technical University bulletin. Part: technical sciences], no. 1 (33), pp. 106-114. (in Russian).
- [7] Pavlov, V.F., Kirpichev, V. A., Vakulyuk, V.S., Sazanov, V.P., (2014) Vliyanie poverhnostnogo uprochneniya na predel vynoslivosti cilindricheskih detalej razlichnogo diametra [The influence of surface hardening on the endurance limit of cylindrical parts of various diameter]. Izvestiya vusov [Universities News. Aviation technique], no. 3, pp. 324-326. (in Russian).



- [8] Timoshenko, S.P., Goodier G., (1979) *Teoriya uprugosti [Elastic theory]*. Moscow: Science, 341 pp. (in Russian).
- [9] Ivanov, S.I., (1971) *K opredeleniyu ostatochnyh napryazhenij v cilindre metodom kolec i polosok. Ostatochnye napryazheniya [On determination of residual stresses in cylinder by rings-and-stripes method. Residual stresses]*. Kuibyshev: KuAI [Kuibyshev Aviation Institute], issue 53. pp. 32-42. (in Russian).
- [10] Sazanov, V.P., Semenova, O.Yu., Kirpichev, V. A., Vakulyuk, V.S. *Matematicheskoe modelirovaniye pervonachal'nyh deformatsij v poverhnostno uprochnyonyh detalyah pri vybore obraztza- svidetelya. [Mathematic modeling of initial deformations in surface hardened parts under the choice of a reference specimen]*. Vestnik UGATU. 2016 [Ufa State Aviation Technical University bulletin]. Vol. 20, No. 3 (73), pp. 31-37. (in Russian).