

УДК 621.787:4

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЦЕМЕНТАЦИИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ

© 2017 В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, О.Ю. Семёнова, Д.С. Мокшин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 22.03.2017

Для оценки влияния цементации деталей обосновано применение корсетных образцов-свидетелей для проведения испытаний на усталость и гладких образцов-свидетелей для определения остаточных напряжений в поверхностном слое. Расчётная часть выполнена методом конечно-элементного моделирования с использованием комплексов ANSYS и PATRAN/NASTRAN. Установлено, что распределение осевых остаточных напряжений в опасном (наименьшем) сечении корсетного образца практически не отличается от распределения в гладких образцах. По полученным результатам определяются среднеинтегральные остаточные напряжения, по распределениям которых для гладких образцов их можно использовать для оценки предела выносливости упрочнённых корсетных образцов. Наиболее оптимальными режимами цементации будут те режимы, при которых среднеинтегральные остаточные напряжения будут наибольшими.

Ключевые слова: *поверхностное упрочнение, химико-термическая обработка, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, деформация, конечно-элементное моделирование, корсетный образец-свидетель, предел выносливости*

Цементацией (или науглераживанием) называется химико-термическая обработка (ХТО), заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагреве в соответствующей среде. В результате процесса образуется диффузионный слой, под которым понимается слой детали у поверхности насыщения, отличающийся от исходного материала по химическому составу, структуре и свойствам. Окончательные свойства цементованные детали приобретают в результате закалки и низкого отпуска, которые выполняются после цементации. Назначение цементации и последующей термической обработки – придать поверхностному слою высокую твёрдость и износостойкость, повысить контактную выносливость и сопротивление усталости при изгибе и кручении. Цементации обычно подвергаются детали из низкоуглеродистых, чаще легированных сталей. Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина деталей, не насыщенная углеродом при цементации, сохраняла высокую вязкость и после закалки. Так как цементация в поверхностном слое идёт с увеличением объёма, то в нём формируются сжимающие остаточные напряжения, которые повышают предел выносливости детали, поскольку усталостные трещины развиваются в результате действия растягивающих напряжений.

Цементация, как и любой другой технологический процесс, требует тщательного контроля, так как неправильно назначенные параметры или их

нарушение может привести к обратному эффекту.

Объём и порядок контроля цементованных деталей, как правило, регламентируется соответствующими нормативными документами. Вместе с тем важность некоторых параметров, полученных после химико-термической обработки, определяется условиями нагружения детали при её эксплуатации. Если при расчёте на контактную выносливость определяющим параметром является твёрдость по толщине упрочнённого после цементации слоя, то при расчёте на усталость при изгибе и кручении определяющими являются уже другие параметры. Проведенные многочисленные исследования [1-4] по изучению влияния упрочнения на сопротивление усталости показывают, что исходными данными для прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей при изгибе и кручении являются зависимости (эпюры) распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя.

Разработанные расчётно-экспериментальные методы [5-8] позволяют провести оценку эффективности процесса упрочнения поверхности тем или иным методом, а также оценить и правильность выбора параметров технологического процесса. Определение распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя наиболее точно выполняется механическими способами на образцах, вырезанных из исследуемых деталей, или на образцах-свидетелях, прошедших совместно технологический процесс химико-термической обработки. Результатами испытаний на усталость образцов уже другого типа должен быть экспериментально подтверждён эффект повышения предела выносливости детали и правильность выбора параметров упрочнения. Как показывает накопленный опыт, выполнить обе операции на одних и тех же образцах с высокой точностью невозможно, поэтому выбор параметров процесса цементации, а также других видов ХТО с позиций

*Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: sazanow@mail.ru*

*Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: dean\_fla@ssau.ru*

*Вакулюк Владимир Степанович, доктор технических наук, профессор. E-mail: soprostat@ssau.ru*

*Семёнова Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, доцент*

*Мокшин Дмитрий Сергеевич, аспирант. E-mail: Mokshin\_ds@mail.ru*

повышения предела выносливости при изгибе и кручении, должен основываться на теоретических исследованиях механики остаточных напряжений и разработанных на их основе расчётно-экспериментальных методах прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей.

**Постановка задачи.** Правильно назначенный технологический процесс поверхностного упрочнения деталей машин приводит к значительному повышению сопротивления усталости и соответственно повышает их ресурс и надёжность работы. Поэтому задачей данного исследования является разработка расчётно-экспериментального метода оценки эффективности цементации и других видов ХТО деталей с использованием определённых типов образцов-свидетелей. Из практики известно, что для испытаний на усталость применяются два вида 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 галтельного перехода, поэтому результаты испытаний не могут характеризовать истинное сопротивление материала усталости. Для испытаний на усталость в качестве образцов-свидетелей наиболее целесообразно использование корсетных образцов, которые лишены отмеченного недостатка. С другой стороны, для определения остаточных напряжений в поверхностном слое в зависимости от формы и размеров исследуемой детали целесообразно применять в качестве образцов-свидетелей гладкие образцы (плоские пластины, цилиндрические втулки), так как данный вариант является более точным, хорошо отработанным и простым в исполнении. Предложенный способ решения задачи требует обоснования расчётными методами на основании их сравнения с экспериментальными результатами, а также с использованием накопленного опыта изучения влияния упрочнения на сопротивление усталости деталей машин.

**Метод решения.** Решение поставленной задачи выполнено расчётно-экспериментальным методом, в котором изначально были использованы экспериментальные результаты, полученные при исследовании влияния ХТО и, в том числе цементации, на предел выносливости деталей [8]. В указанном исследовании испытания на усталость проводились на корсетных образцах, а определение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя выполнено на гладких образцах-свидетелях (цилиндрические втулки). Необходимый объём расчётов для анализа и сравнения с результатами испытаний проведен методом конечно-элементного моделирования (КЭМ). Влияние остаточных напряжений на повышение предела выносливости за счёт упрочнения поверхности детали оценивалось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений, определяемых на глубине нераспространяющейся трещины усталости в опасном (наименьшем) сечении [1].

**Результаты расчётно-экспериментальных исследований.** Для решения поставленной задачи использовались экспериментальные результаты исследований по изучению влияния цементации, которые были выполнены на гладких образцах-свидетелях (цилиндрические втулки) и корсетных образцах круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм (рис. 1). Образцы были изготовлены из конструкционной легированной стали 16Х3НВФМБ (ВКС-5). Сталь 16Х3НВФМБ в авиационном строении применяется для изготовления сортового проката и полос, цементуемых и азотируемых высоконагруженных деталей редукторов и трансмиссионных механизмов, к которым предъявляются требования высокой прочности, пластичности и вязкости сердцевины и высокой поверхностной твёрдости. Образцы после шлифования подвергались цементации на различных режимах. После цементации у корсетных образцов шлифованием обрабатывалась только коническая часть образцов, поэтому в рабочей (корсетной) части остаточное напряжённое состояние оставалось неизменным.

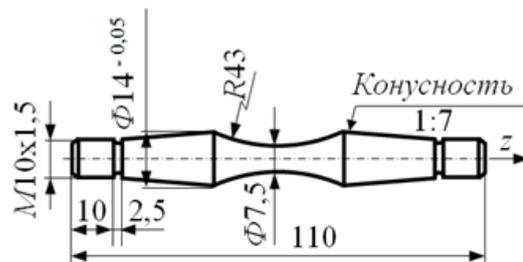


Рис. 1. Корсетный образец для испытаний на усталость

Распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов (цилиндрические втулки), полученные экспериментальным методом с использованием расчётных зависимостей работы [9], представлены на рис. 2. Режимы термической и ХТО корсетных и гладких образцов приведены в табл. 1.

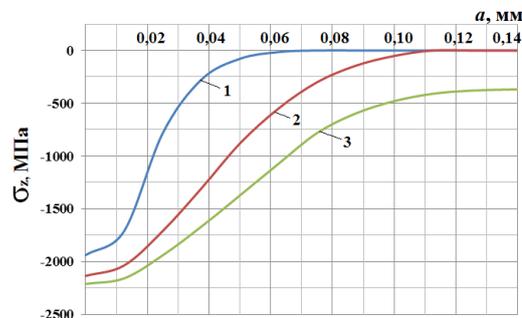


Рис. 2. Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в корсетных образцах из стали 16Х3НВФМБ (ВКС-5)

На основании ряда проведенных исследований было установлено, что прогнозирование приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений

при растяжении-сжатии и изгибе в случае симметричного цикла  $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$  наиболее точно 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  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

**Таблица 1.** Режимы термической и ХТО корсетных и гладких образцов

№ п/п	Обозначение на рис. 2	Режимы термической и ХТО
1	1	Исходное состояние: закалка 900°C; отпуск 600°C – 1 час
2	2	Ионная цементация 950°C – 1 час; отпуск 650°C – 3 часа
3	3	Цементация 940°C – 6 часов; отпуск 650°C – 3 часа; закалка 900°C; обработка холодом: – 70 °C

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

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

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

Для обоснования метода, в основу которого поставлена задача использования корсетных образцов для оценки эффективности цементации поверхности деталей, необходимо:

- определить теоретический коэффициент концентрации напряжений в опасном (наименьшем) сечении, а затем вычислить по формуле (2) коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  и сравнить его со средними значениями по результатам испытаний на усталость;
- с использованием метода КЭМ определить расчётное распределение остаточных напряжений по толщине опасного сечения и сравнить его с экспериментальным распределением в гладком образце-свидетеле.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_{\sigma}$  ранее в основном определялся по графикам справочников типа [10]. Однако это приводило, как правило, к большим погрешностям расчётов, особенно на границах графиков и за их пределами, поэтому для определения  $\alpha_{\sigma}$  требуется разработка более точных расчётных методов. В

данном исследовании расчёты  $\alpha_{\sigma}$  выполнены методом КЭМ с использованием комплекса ANSYS. В конечно-элементной модели корсетного образца 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  $\alpha_{\sigma}=1,038$ . Определённое 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 ХТО [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. В табл. 2 приведены результаты испытаний на усталость корсетных образцов из стали 16ХЗНВФМБ (ВКС-5), а также результаты расчёта среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  и опытных значений коэффициента влияния  $\bar{\psi}_{\sigma}$  для двух режимов цементации.

**Таблица 2.** Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Рис. 2	Режимы обработки	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
1	Исходное состояние: закалка 900°C; отпуск 600°C – 1 час	760	-136	–
2	Ионная цементация : 950°C – 1 час; отпуск 650°C – 3 часа	900	-389	0,553
3	Цементация: 940°C – 6 часов; отпуск 650°C – 3 часа; закалка 900°C ; обработка холодом: -70°C	1040	-672	0,522

На примере рассматриваемых образцов можно проследить за влиянием полноты эпюры сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости. После ионной цементации и обычной цементации наибольшие остаточные напряжения на поверхности различаются незначительно: -2100 МПа и -2200 МПа, соответственно (рис. 2, эпюры 2 и

3). Однако после ионной цементации распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя является менее полным, чем после обычной цементации – смена знака остаточных напряжений в первом случае происходит на глубине  $a=0,1$  мм, а во втором – на глубине  $a=0,23$  мм. В результате приращение предела выносливости образцов

по сравнению с исходным состоянием (рис. 2, эпюра 1) после ионной цементации в два раза меньше, чем после обычной цементации:  $\Delta\sigma_{-1}=140$  МПа и  $\Delta\sigma_{-1}=280$  МПа соответственно.

Для определения распределения остаточных напряжений по толщине опасного сечения корсетных образцов методом КЭМ были проведены расчёты с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. 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 перемещениям. При моделировании использован плоский шестиузловой треугольный конечный элемент типа 2D-solid, решение выполнялось в осесимметричной постановке. На рис. 3 представлен фрагмент остаточного напряжённого состояния конечно-элементной модели корсетного образца для одного из режимов цементации. На рис. 4–6 приводятся результаты расчётов распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя опасного (наименьшего) сечения корсетных образцов для различных режимов ХТО (табл. 1).

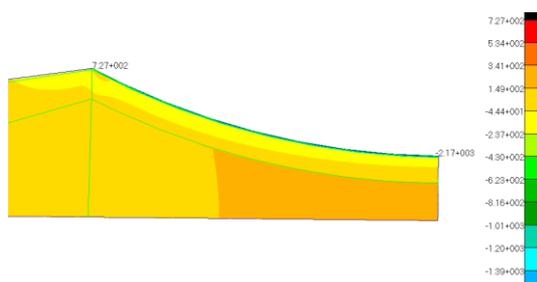


Рис. 3. Напряжённое состояние конечно-элементной модели корсетного образца: осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения (режим 3, табл. 1)

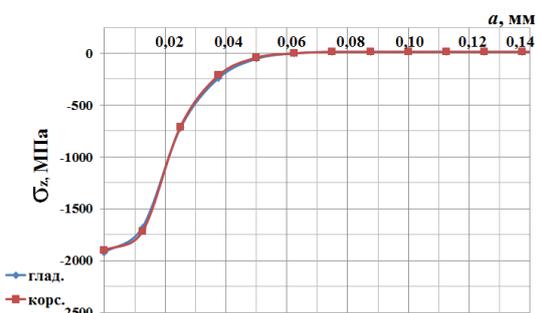


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (режим 1, табл. 1)

Оценка результатов расчётов, представленных на рис. 5–8, показывает, что распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя в наименьшем (опасном) сечении корсетного образца в рассматриваемых вариантах термической и ХТО практически совпадают с

аналогичными распределениями для гладких образцов, причём различие от исходной эпюры для гладкого образца не превышает 2,5–3%. На основании 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.

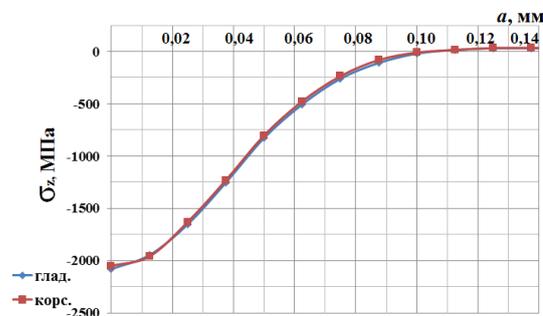


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (режим 2, табл. 1)

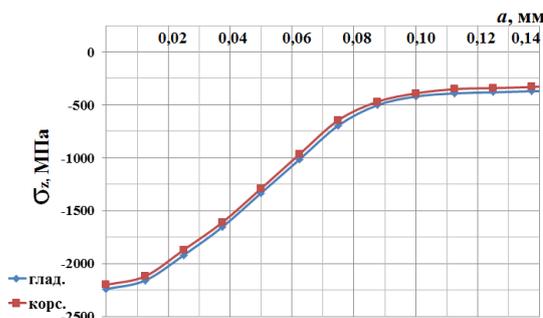


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения корсетного и гладкого образцов (режим 3, табл. 1)

Для оценки правильности выбранных режимов цементации поверхности детали 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. Размер наименьшего сечения корсетного образца для повышения точности прогнозирования предела выносливости за счёт упрочнения должен быть увязан с размером упрочняемой детали [9]. В качестве гладких образцов-свидетелей в случае осесимметричных деталей целесообразно использовать цилиндрические втулки, которые позволяют определять осевые и окружные остаточные напряжения хорошо отработанными методами и с высокой точностью. С экономической точки зрения значение предложенного метода образцов-свидетелей при оценке эффективности цементации заключается в том, что значительно сокращаются объём и время проведения испытаний на усталость, причём правильность выбора режимов технологической операции цементации подтверждается испытанием относительно небольшой партии корсетных образцов и

сходимостью их результатов с расчётным определением предела выносливости.

**Выводы:**

1. Установлено, что полученные расчётными методами результаты прогнозирования предела выносливости корсетных образцов, упрочнённых на различных режимах термической и ХТО (цементации), имеют достаточно высокую сходимость с результатами проведенных испытаний на усталость.

2. Из анализа расчётов, выполненных методом КЭМ остаточного напряжённого состояния гладких и корсетных образцов следует, что определение критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для вычисления приращения предела выносливости цементированных деталей можно проводить по результатам определения остаточных напряжений в поверхностном слое гладких образцов-свидетелей.

3. Для повышения предела выносливости наиболее оптимальными режимами цементации деталей будут те режимы, при которых критерий среднеинтегральных остаточных напряжений будет наибольшим.

4. Метод образцов-свидетелей для оценки эффективности цементации поверхности деталей, выполняемого с целью повышения их сопротивления усталости, может быть рекомендован и для других видов ХТО с проведением испытаний и расчётов на соответствующих образцах-свидетелях и на самой детали.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / 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. 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.
4. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, О.В. Каранаева и др. // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ. 2011. С. 678-685.
5. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при пережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. 2011. №3(27). Ч.3. С. 171-174.
6. 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. Том 19, №2 (68). С. 35-40.
7. 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. 2016. Том 20, №3 (73). С. 31-37.
8. Вакулюк, В.С. Расчётно-экспериментальный метод прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / В.С. Вакулюк, В.К. Шадрин, О.В. Каранаева, Б.Л. Кужахметов // Десятая Всеросс. науч. конф. с междунар. уч. «Математическое моделирование и краевые задачи», Самара, 25-27 мая 2016 г. – Самара, Самарский государственный технический университет. 2016. С. 61-63.
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. Петерсон, Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. 304 с.

**USING THE REFERENCE SPECIMEN FOR ASSESSMENT THE INFLUENCE OF CEMENTATION ON BENDING FATIGUE RESISTANCE**

© 2017 V.P. Sazanov, V.A. Kirpichyov, V.S. Vakulyuk, O.Yu. Semyonova, D.S. Mokshin

Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov

Using the corset reference specimens for fatigue tests carrying out and smooth reference specimens for residual stresses in a surface layer determination has been substantiated for the evaluation of parts cementation influence (thermo chemical processing). The calculations of the study have been carried out by the Finite Elements Modeling method using the calculation complexes ANSYS and PATRAN/NASTRAN. It is established that distribution of axial residual stresses in the dangerous (smallest) section of corset specimen practically does not differ from distribution in smooth specimen. It was determined that by the received results of average integral residual stresses on which distributions for smooth specimen can be used for assessment the endurance strength of the hardened corset specimen. The most optimum modes of cementation will be those modes at which average integral residual stresses will be the greatest.

Key words: surface hardening, chemical heat treatment, average integral residual stresses criterion, deformation, finite element modeling, corset reference specimen, endurance limit

Vyacheslav Sazanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: sazanow@mail.ru; Viktor Kirpichyov, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: dean\_fla@ssau.ru; Vladimir Vakulyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: sopromat@ssau.ru; Olga Semyonova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Dmitriy Mokshin, Post-graduate Student. E-mail: Mokshin\_ds@mail.ru