

УДК 620.178

РАСЧЕТ ВНУТРЕННИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЗАКАЛЕННЫХ ДЕТАЛЯХ МАШИН ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Рожков И.И., Мыльников В.В.

*ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижегород, e-mail: mrmynikov@mail.ru*

В работе произведен расчет внутренних остаточных напряжений, возникающих в закаленных деталях машин после химико-термической обработки. Предложен режим закалки в подогретом масле, в результате чего было установлено снижение остаточных напряжений и уменьшение брака при изготовлении деталей зубчатое колесо и вал-шестерня.

Ключевые слова: внутренние остаточные напряжения, химико-термическая обработка, коробление, теплофизические характеристики, ликвация.

CALCULATION OF INTERNAL RESIDUAL STRESSES ARISING IN HARDENED PARTS OF MACHINES AFTER CHEMICAL-THERMAL PROCESSING

Rozhkov I.I., Mylnikov V.V.

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,
e-mail: mrmynikov@mail.ru*

In the work of the calculation of internal residual stresses arising in hardened parts of machines after chemical-thermal processing. Proposed regime of hardening in the warmed-up butter, resulting in a decrease in residual stresses and reduce scrap in manufacturing of parts for gear and pinion shaft.

Keywords: internal residual voltage, chemical heat treatment, warping, thermophysical characteristics, liquation.

Проблемной особенностью любой упрочняющей термообработки является коробление деталей, превышающее припуск на последующую обработку в размер сопрягаемых поверхностей шлифованием. Среди множества причин, вызывающих коробление, существенной является химическая неоднородность или ликвация по сечению детали, которая возникает при диффузионном насыщении поверхностного слоя адсорбатом.

Большинство деталей машин работает в условиях износа, кавитации, циклических нагрузок, коррозии при криогенных и высоких температурах, при которых максимальные напряжения возникают в поверхностных слоях металла, где сосредоточены основные концентраторы напряжений. Чтобы деталь хорошо работала в условиях трения, поверхность должна обладать высокой износостойкостью. Сопротивление циклическим и вибрационным нагрузкам обеспечивает вязкая сердцевина данного изделия. Для достижения всего комплекса свойств деталь подвергается поверхностному упрочнению. Химико-термическая обработка, повышая твердость, износостойкость, задиростойкость, кавитационную и коррозионную стойкость и создавая на поверхности деталей благоприятные остаточные напряжения сжатия, увеличивает надежность и долго-

вечность машин. В то же время, ХТО создает градиент напряженно-деформированных состояний, при которых неизбежно возникают значительные внутренние напряжения, приводящие к короблению и растрескиванию деталей [2-4].

Цель работы – определение внутренних напряжений, возникающих при закалке тяжело нагруженных деталей машин с переменным химическим составом по сечению и их снижение за счет модифицирования процесса тепловой обработки для уменьшения коробления и растрескивания в конце технологического цикла изготовления.

На практике возникают ситуации, когда химический состав изделия по сечению переменный. Примером являются изделия, прошедшие химико-термическую обработку, когда поверхностный слой резко отличается от внутренних слоев изделия, и возникающие внутренние напряжения от перепада температур и структурных превращений, протекающих в материале на стадии различных видов обработок будут переменными, переменными будут и теплофизические характеристики.

Известные методики расчета внутренних напряжений применимы для материалов с постоянным химическим составом по сечению изделий [1].

Алгоритм решения упругопластической задачи для нахождения термонапряженного состояния стального цилиндра с постоянным химическим составом предложен в работе Тимофеева В.Н., Самойловича Ю.А. [5], который включает:

1) определение температурного поля по сечению цилиндра на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода, при нагреве (охлаждении) по закону Ньютона:

$$\Theta = \frac{t}{t_c} = 1 - \sum A_n I_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) e^{-\mu_n^2 F_0}; \quad (1)$$

где t_c – температура греющей среды, °С; t – температура в искомой точке тела, °С (начальное температурное поле по сечению цилиндра равномерно и равно нулю);

$$A_n = \frac{2I_1(\mu_n)}{\mu_n(I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n))} - \text{постоянные}$$

коэффициенты (тепловые амплитуды, зависящие от числа Био); $I_0(\mu_n)$, $I_1(\mu_n)$ – функции Бесселя; μ_n – корень трансцендентного уравнения

$$\frac{I_0(\mu)}{I_1(\mu)} = \frac{1}{Bi} \mu; \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} - \text{число Био};$$

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{R^2} - \text{число Фурье};$$

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

τ – время, с;

2) принимается:

$$\sigma = \frac{\sigma(1-\mu)}{\beta E t_c}, \quad \eta = \frac{\sigma_s}{\beta E t_c}, \quad \varepsilon_z = \varepsilon_z \frac{E}{\sigma_s}, \quad (2)$$

где ε_z – продольная деформация,

μ – число Пуассона;

3) с помощью последовательных приближений определяются границы (радиус) зон упругой и пластической деформаций:

$$-\frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} \theta r dr - \theta(r_0) = \frac{2(1-\mu)\eta}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где r_0 – радиус зоны пластической деформации, м;

4) расчет пластических радиальных и тангенциальных напряжений:

$$\sigma_r^{nl} = \frac{2(1-\mu)\eta}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{R}{r},$$

$$\sigma_\tau^{nl} = \frac{2(1-\mu)\eta}{\sqrt{3}} \cdot \left(\ln \frac{R}{r} - 1 \right); \quad (4)$$

5) расчет упругих радиальных и тангенциальных напряжений:

$$\sigma_r^{ymp} = \frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} \theta r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r \theta r dr + \frac{2(1-\mu)\eta}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{R}{r_0}, \quad (5)$$

$$\sigma_\tau^{ymp} = \frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} \theta r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r \theta r dr - \theta + \frac{2(1-\mu)\eta}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{R}{r_0}, \quad (6)$$

6) определение модуля пластичности:

$$\psi = \frac{\left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \left(\frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} \theta r dr - \theta(r_0) \right)}{-\frac{2(1-\mu)\eta}{\sqrt{3}}} +$$

$$+ \frac{(1-\mu) \left(\frac{2}{r^2} \int_0^r \theta r dr + \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \theta(r_0) - \theta \right)}{-\frac{2(1-\mu)\eta}{\sqrt{3}}}, \quad (7)$$

7) определение продольной деформации:

$$\varepsilon_z = \frac{(1-\mu) \left(\frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} \Theta r dr + \frac{1}{r_0^2} \int_{r_0}^R \frac{\Theta r dr}{\psi} \right)}{(1-\mu)\eta \left(0.5 + \frac{1}{r_0^2} \int_{r_0}^R \frac{r dr}{\psi} \right)}$$

$$- \frac{\frac{\mu}{r_0^2} \int_0^{r_0} \left(\sigma_r^{ymp} + \sigma_\tau^{ymp} \right) r dr - 0.5 \int_{r_0}^R \left(\sigma_r^{nl} + \sigma_\tau^{nl} \right) r dr}{(1-\mu)\eta \left(0.5 + \frac{1}{r_0^2} \int_{r_0}^R \frac{r dr}{\psi} \right)}, \quad (8)$$

8) расчет осевых упругих и пластических напряжений:

$$\sigma_z^{ymp} = \mu \left(\sigma_r^{ymp} + \sigma_\tau^{ymp} \right) + (1-\mu)\eta \varepsilon_z - (1-\mu)\Theta, \quad (9)$$

$$\sigma_z^{nl} = 0.5 \left(\sigma_r^{nl} + \sigma_\tau^{nl} \right) + \frac{(1-\mu)\eta}{\psi} \varepsilon_z - \frac{(1-\mu)\Theta}{\psi}, \quad (10)$$

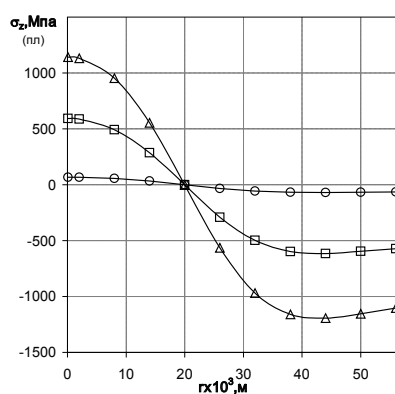
Используя этот алгоритм, предложена методика расчета внутренних напряжений, когда химический состав по сечению переменный. При расчетах внутренних напряжений использовался цилиндр из стали 12ХНЗА диаметром 56 мм, прошедший химико-термическую обработку. Учитывались теплофизические характеристики конкретных слоев изделия с разным химическим составом:

- коэффициент теплоотдачи α ;
- коэффициент теплопроводности λ ;
- коэффициент температуропроводности a ;
- коэффициент линейного расширения β .

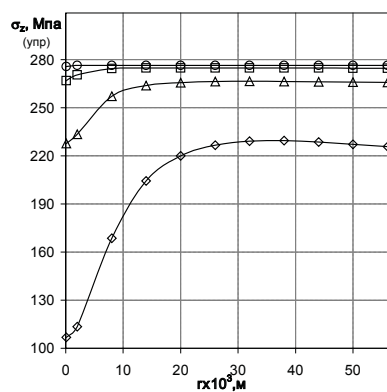
Расчет внутренних напряжений при нагреве и охлаждении цилиндра производился в программе MathCad. В компьютерную

программу для расчета термических напряжений при нагреве и охлаждении деталей, вносили основные теплофизические свойства сталей с учетом их послойного изменения по сечению.

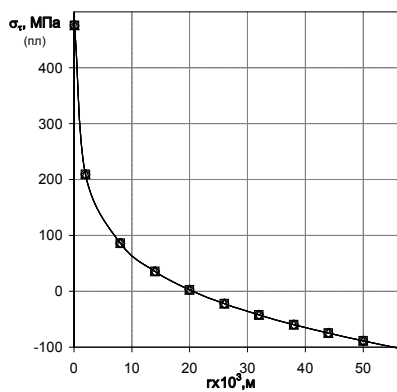
По результатам расчета построены зависимости основных упругих и пластических напряжений при нагреве и охлаждении стального цилиндра. На рисунке 1 показано распределение упругих и пластических напряжений $\sigma^{упр}$ и $\sigma^{пл}$ на расстоянии r от центра цилиндра при охлаждении в масле.



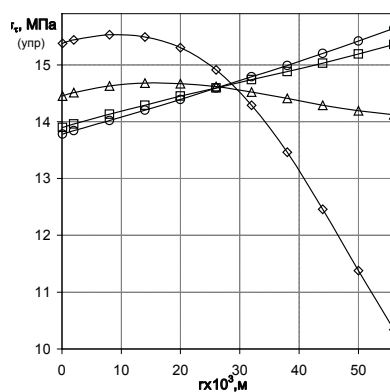
а



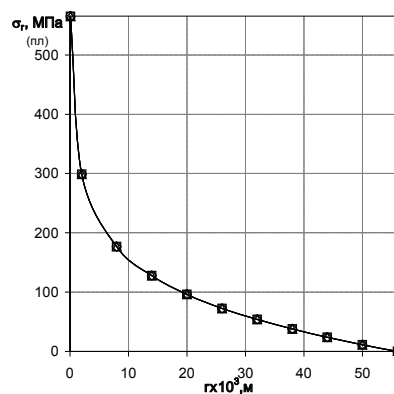
б



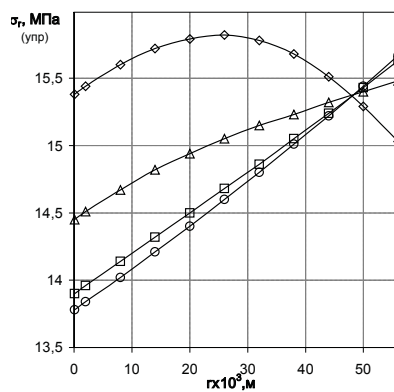
в



г



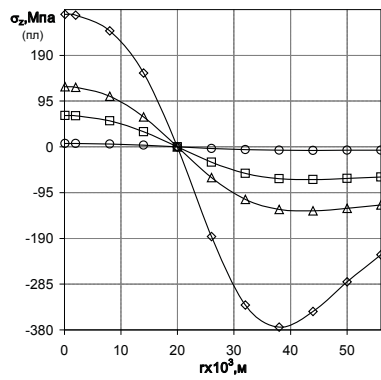
д



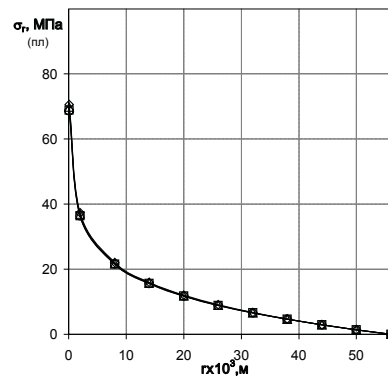
е

Рис. 1. Изменение напряжений σ в зависимости от расстояния до поверхности цилиндра r при закалке в масле: \circ -7 мин; \square -4 мин; Δ -2 мин; \diamond -30 сек.

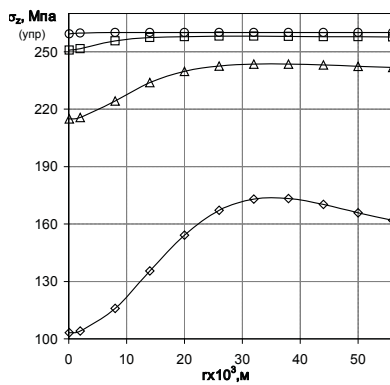
а – зависимость осевых пластических напряжений $\sigma_z^{пл}$; б – зависимость осевых упругих напряжений $\sigma_z^{упр}$; в – зависимость пластических тангенциальных напряжений $\sigma_r^{пл}$; г – зависимость упругих тангенциальных напряжений $\sigma_r^{упр}$; д – зависимость пластических радиальных напряжений $\sigma_r^{пл}$; е – зависимость упругих радиальных напряжений $\sigma_r^{упр}$.



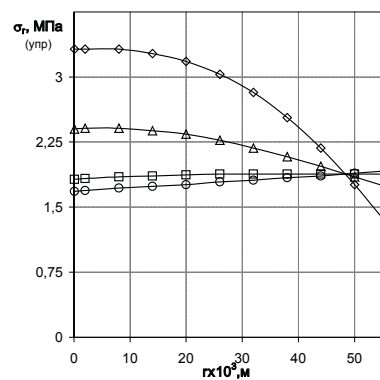
a



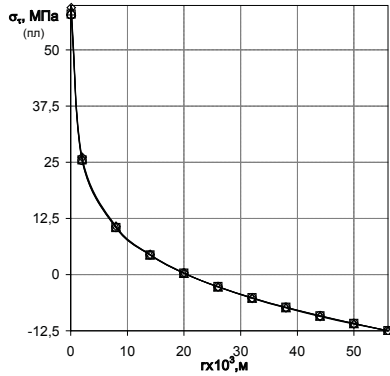
д



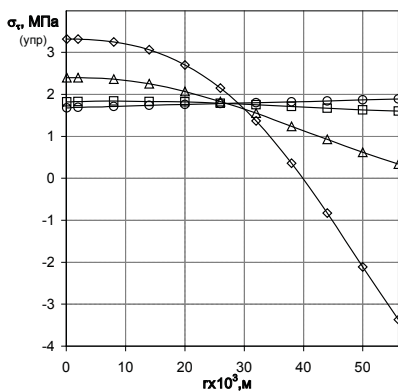
б



е



в



г

Рис. 2. Изменение напряжений σ в зависимости от расстояния до поверхности цилиндра r при закалке в подогретом масле: \circ -7 мин; \square -4 мин; Δ -2 мин; \diamond -30 сек.

а – зависимость осевых пластических напряжений $\sigma_z^{пл}$; б – зависимость осевых упругих напряжений $\sigma_z^{упр}$; в – зависимость пластических тангенциальных напряжений $\sigma_\tau^{пл}$; г – зависимость упругих тангенциальных напряжений $\sigma_\tau^{упр}$; д – зависимость пластических радиальных напряжений $\sigma_r^{пл}$; е – зависимость упругих радиальных напряжений $\sigma_r^{упр}$.

Откуда видно, что некоторые составляющие упругих и пластических напряжений имеют крайне высокие значения, которые соответствуют действующему технологическому процессу изготовления детали валшестерня из стали 12ХН3А заключающегося в следующем:

- цементация, $t = 910^\circ\text{C}$, нагрев 1ч, выдержка 13ч, охлаждение на воздухе до 20°C ;
- нормализация, $t = 920^\circ\text{C}$, нагрев 1,5ч, выдержка 25 мин; охлаждение на воздухе до 20°C ;
- закалка $t = 810^\circ\text{C}$, нагрев 100 мин, выдержка 20 мин; охлаждение в масле;
- отпуск $t = 200^\circ\text{C}$, нагрев 100 мин, выдержка 150 мин, охлаждение на воздухе.

С целью уменьшения градиента температур значительно снижающих значения остаточных напряжений были предложены режимы закалки в подогретом масле. Распределение упругих и пластических напряжений $\sigma^{уп}$ и $\sigma^{пл}$ на расстоянии r от центра цилиндра при охлаждении в подогретом масле ($t = 160^\circ\text{C}$) представлены на рисунке 2.

Выводы

На основе проведенных расчетов термических напряжений (осевых упругих и пластических, тангенциальных упругих и пластических, радиальных упругих и пластических) конструкционной стали 12ХН3А ферритного класса, применяемых для изготовления деталей вал-шестерня и колесо зубчатое и предложенного режима закалки в подогретом масле (160°C), было установлено:

1-уменьшение остаточных напряжений в 5-8 раз;

2-значительное уменьшение брака после термической обработки при изготовле-

нии деталей зубчатое колесо и вал-шестерня в среднем с 28% до 5%.

Список литературы

1. Абрамов В.Л. Остаточные напряжения и деформация в металле. – М.: Машиностроение, 1993. – 345 с.

2. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – М.: из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.

3. Рожков И.И., Мыльников В.В. Оценка чувствительности сталей к трещинообразованию в процессах тепловой обработки // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №10 (часть 2). – С. 244.

4. Темлянец М.В., Осолова Т.Н. Трещинообразование в процессах нагрева и охлаждения стали и сплавов. – М.: Наука, 2005. – 195 с.

5. Тимофеев В.Н., Самойлович Ю.А. Оценка влияния пластической деформации на температурные напряжения при нагреве стального цилиндра // Горение, теплообмен, процессы нагрева: сборник научных трудов ВНИИМТ. – Свердловск: из-во ВНИИМТ, 1963. – №10. – С. 68-80.