

РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ НАГРЕВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

В.А. Смыслов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: smsvit@gmail.com

Рассмотрена задача расчета напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое цилиндрического изделия после процедуры поверхностного пластического деформирования и последующего нагрева детали. Показано, что вследствие изменения модуля Юнга в процессе температурного нагружения происходит существенное изменение полей остаточных напряжений. Приводятся результаты расчета для цилиндрических образцов, упрочненных по различным технологиям.

Ключевые слова: цилиндрический образец, поверхностное пластическое упрочнение, остаточные напряжения, температурное нагружение.

Постановка задачи

Технология поверхностного пластического упрочнения является одним из эффективных резервов повышения долговечности многих изделий. С точки зрения механики это связано с наведением в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений (ОН), которые препятствуют выходу различного рода дислокаций и вакансий на поверхность детали. Применительно к цилиндрическим образцам в работе [1] разработан феноменологический метод расчета ОН в поверхностно упрочненном слое, который для различных технологий упрочнения развивался в работах [2-4]. Однако в условиях внешнего температурно-силового нагружения деталей (температурное нагружение, ползучесть, малоцикловое нагружение и т. д.) происходит перераспределение остаточных напряжений во времени. В частности, в [5] исследовано влияние остаточных напряжений на повышение предела сопротивления усталости, а в [6] предложен метод оценки кинетики остаточных напряжений в цилиндрическом образце при высокотемпературной нагрузке. При этом наведенные остаточные напряжения при решении краевых задач играют роль начальных напряжений. Одним из недостатков работы [6] является то, что в начальный момент не учитывалось перераспределение напряжений вследствие чисто температурного нагрева и изменения модуля Юнга от температуры. Поэтому целью данной работы является разработка метода расчета остаточных напряжений при существенном изменении температуры.

Восстановление начального напряженно-деформированного состояния в цилиндрическом образце после процедуры поверхностного пластического деформирования

Рассматривается сплошной цилиндрический образец радиуса $r = a$. Предположим, что одной из технологических процедур в его поверхностном слое наводятся поля остаточных напряжений и пластических деформаций при температуре T_0 , а затем образец нагревается до температуры T_1 (рассматривается установившееся ста-

ционарное) температурное поле цилиндрического образца). Как правило, упрочнение происходит при нормальной (комнатной) температуре T_0 (за исключением термопластического упрочнения). Задача решается в стандартной цилиндрической системе координат r, θ, z . Через σ_θ^{res} , σ_r^{res} и σ_z^{res} обозначим окружное, радиальное и осевое остаточные напряжения, а через q_θ , q_r и q_z – соответствующие компоненты тензора остаточных пластических деформаций. Недиагональными компонентами тензоров остаточных напряжений и деформаций пренебрегаем в силу их малости по сравнению с нормальными компонентами. В предположении, что вторичные пластические деформации в области сжатия поверхностного слоя отсутствуют и экспериментально известна компонента $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$, в работах [1-4] для остальных компонент тензора напряжений и тензора пластических деформаций получены следующие зависимости:

$$\sigma_r^{res}(r) = -\frac{1}{r} \int_r^a \sigma_\theta^{res}(x) dx; \quad (1)$$

$$q_\theta(r) = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1+\alpha\nu)^2} r^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha\nu}} \int_0^r x^{\frac{1+\alpha-\alpha\nu}{1+\alpha\nu}} \left[\sigma_r^{res}(x) + (1+\alpha)\sigma_\theta^{res}(x) \right] dx - \frac{1+\nu}{E(1+\alpha\nu)} \left[(1-\nu)\sigma_\theta^{res}(r) - \nu\sigma_r^{res}(r) \right]; \quad (2)$$

$$q_z = \alpha q_\theta; \quad (3)$$

$$q_r = -q_\theta(1+\alpha); \quad (4)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left\{ q_z(r) - \frac{\nu}{E} \left[\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r) \right] \right\} dr; \quad (5)$$

$$\sigma_z^{res}(r) = E(\varepsilon_z^0 - q(r)) + \nu(\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)), \quad (6)$$

где α – феноменологический параметр анизотропии упрочнения, методика идентификации которого изложена в [2, 3].

Таким образом, схема расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в сплошном цилиндре после упрочнения его поверхности имеет следующий вид:

$$\sigma_\theta^{res}(r) \xrightarrow{1} \sigma_r^{res}(r) \xrightarrow{2} q_\theta(r) \xrightarrow{3,4} q_z(r), q_r(r) \xrightarrow{5} \varepsilon_z^0 \xrightarrow{6} \sigma_z^{res}(r). \quad (7)$$

Номера над стрелками означают формулы, по которым рассчитывается соответствующая величина. Из схемы (7) следует, что в конечном итоге компоненты σ_r^{res} , σ_z^{res} , q_θ , q_r и q_z определяются через σ_θ^{res} и параметр α .

Перераспределение остаточных напряжений вследствие температурного нагружения

Пусть теперь температура T цилиндрического образца повышается от T_0 до величины T_1 , причем $T_1 > T_0$. Обозначим модуль Юнга E при $T = T_0$ через E_0 , а при $T = T_1$ – через E_1 (очевидно, что $E_1 < E_0$). Будем предполагать, что при повышении температуры в цилиндрическом образце не возникает дополнительных пластических деформаций за счет термического разупрочнения характеристик пластичности материала. При этом предположении величина $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$ при $T = T_1$ может быть

определена из решения интегрального уравнения (2) с использованием (1) и $E = E_1$, поскольку $q_0(r)$ известна и не зависит от температуры. Но эта задача сложна, и ее решение проблематично. Поэтому предлагается следующий прием, позволяющий свести поставленную задачу к задаче фиктивной ползучести, методика решения которой разработана и реализована в [8]. Предположим, что в процессе нагрева модуль Юнга изменяется по закону

$$E(t) = E_0 + (1 - e^{-\lambda t})(E_1 - E_0), \quad (8)$$

где t – некоторое фиктивное время (параметр нагружения), при этом при $t > 10$ величина $e^{-t} \approx 0$ и $E(t) = E_1$, т. е. имеем состояние, соответствующее температуре $T = T_1$, а при $t = 0$ – $E(0) = E_0$, т. е. имеем состояние при $T = T_0$.

Тогда с учетом обозначений

$$\begin{aligned} \sigma_0^{res}(r, t) &= \sigma_\theta^{res}(r, t) + \sigma_z^{res}(r, t) + \sigma_r^{res}(r, t), \\ e_i^0(r, t) &= \frac{(1 + \mu)\sigma_i^{res}(r, t) - \mu\sigma_0^{res}(r, t)}{E_0} \quad (i = r, \theta, z), \quad E^* = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \end{aligned}$$

и соотношения (8) имеем

$$\begin{aligned} e_i(r, t) &= \frac{(1 + \mu)\sigma_i^{res}(r, t) - \mu\sigma_0^{res}(r, t)}{E(t)} = \\ &= e_i^0(r, t) \frac{1}{1 - (1 - e^{-t})E^*} \quad (i = r, \theta, z). \end{aligned}$$

Раскладывая второй множитель в предыдущем равенстве в ряд Тейлора и ограничиваясь членами первого порядка малости относительно величины E^* , получим

$$e_i(r, t) = e_i^0(r, t) + e_i^0(r, t)(1 - e^{-t})E^* \quad (i = r, \theta, z). \quad (9)$$

Второе слагаемое в правой части (9) назовем деформацией фиктивной ползучести (псевдоползучести) и обозначим через $h_i(r, t)$, т. е.

$$h_i(r, t) = \frac{(1 + \mu)\sigma_i^{res}(r, t) - \mu\sigma_0^{res}(r, t)}{E_0} (1 - e^{-t})E^* \quad (i = r, \theta, z),$$

или в дифференциальной форме

$$\dot{h}_i(r, t) = \frac{E^*}{E_0} [(1 + \mu)\sigma_i^{res}(r, t) - \mu\sigma_0^{res}(r, t)] - h_i(r, t). \quad (10)$$

Соотношение (10) соответствует варианту линейной наследственной теории вязкоупругости с экспоненциальным ядром ползучести и начальными данными $h_i(r, 0) = 0$ ($i = r, \theta, z$).

Если теперь представить полную деформацию $\varepsilon_i(r, t)$ в виде

$$\varepsilon_i(r, t) = e_i^0(r, t) + q_i(r) + h_i(r, t) \quad (i = r, \theta, z), \quad (11)$$

то для расчета напряженно-деформированного состояния в процессе нагревания цилиндрического изделия до температуры $T = T_1$ можно использовать разработанный в [6] прямой метод решения краевой задачи ползучести упрочненного цилиндрического образца и в качестве конечного решения использовать асимптотическое решение при $t \rightarrow \infty$ (на практике это соответствует $t > 10$, поскольку здесь $e^{-t} \approx 0$). В качестве замечания следует отметить, что температурные деформации в (11) не учитываются, поскольку они не влияют на напряженное состояние в силу однородности температурного поля по объему цилиндрического образца.

Численная реализация и анализ результатов

В качестве иллюстрации предложенного метода были просчитаны варианты для сплошных цилиндрических образцов радиуса R из различных материалов, упрочненных по различным технологиям: сплав ЭИ691 ($R = 5\text{мм}$, алмазное выглаживание, коэффициент анизотропии $\alpha = 14.6$), сталь 30ХГСА ($R = 7.5\text{мм}$, обкатка роликом, коэффициент анизотропии $\alpha = 16.6$), сталь 12Х18Н10Т ($R = 5\text{мм}$, обкатка роликом, коэффициент анизотропии $\alpha = 8.2$), сталь 45 ($R = 5\text{мм}$, гидродробеструйная обработка, коэффициент анизотропии $\alpha = 1$). Зависимости модулей Юнга для этих материалов от температуры приведены в таблице. Предполагалось, что упрочнение материалов производилось при начальной комнатной температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$, а нагревание производилось до температуры $T = T_1$, соответствующей последнему значению соответствующего столбца таблицы. Экспериментальные данные для остаточных напряжений после процедуры упрочнения для образцов из указанных материалов заимствованы из работы [5]]. Начальное напряженно-деформированное состояние, соответствующее $T_0 = 20^\circ\text{C}$, рассчитывалось по формулам (1)–(7) с использованием программного комплекса [7].

Модуль упругости материалов при различных температурах

Т, °С	ЭИ691	30ХГСА	12Х18Н10Т	Сталь 45
	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-5}$, МПа			
20	2,00	2,15	1,98	2,10
100	1,98	2,11	1,94	2,05
200	1,87	2,03	1,89	1,93
300	1,75	1,96	1,81	1,90
400	1,65	1,84	1,74	1,72
500	1,45	1,73	1,66	1,60
600	1,09	1,64	1,57	–
700	–	1,43	1,47	–
800	–	1,25	–	–

На рис. 1 показаны исходная ($T = T_0$) и конечная ($T = T_1$) эпюры напряжения σ_θ и σ_z для рассмотренных экспериментов. Исходная эпюра рассчитана по схеме (7), а конечная – по предлагаемой методике. Наблюдается значительное уменьшение по модулю значений компонент тензора остаточных напряжений (до 35 %). Это говорит о том, что нагрев изделия в значительной степени влияет на НДС упрочненного образца.

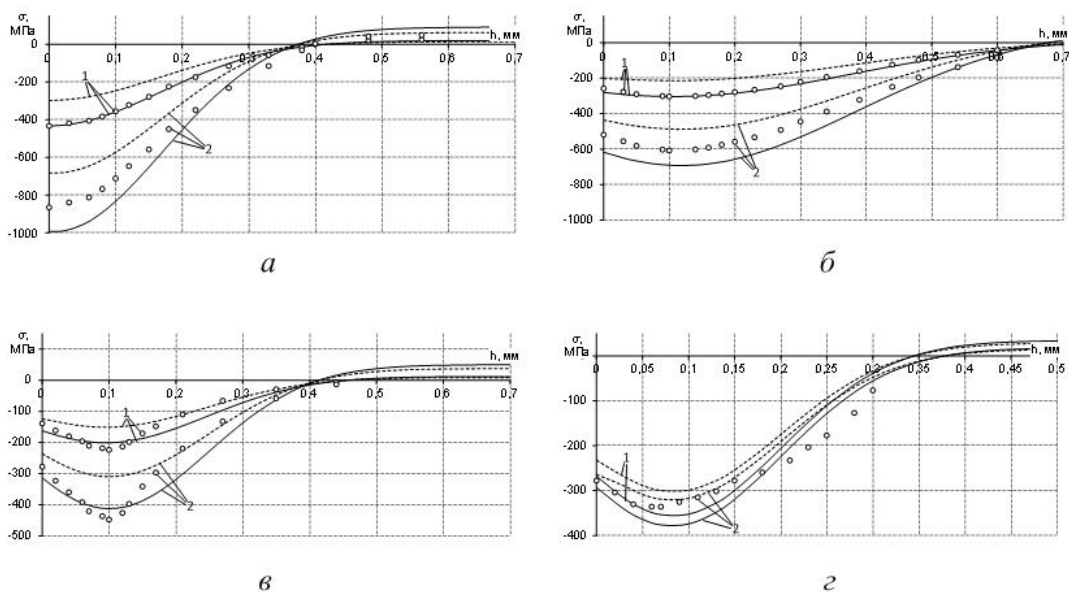


Рис. 1. Перераспределение остаточных напряжений при нагреве цилиндрического образца: 1 – окружная компонента σ_{θ}^{res} ; 2 – осевая компонента σ_z^{res} ; значки – эксперимент [5]; расчетные при $T = T_0$ (сплошные линии) и при $T = T_1$ (штриховые линии) значения остаточных напряжений; а) ЭИ961, алмазное выглаживание ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 600\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\alpha = 14.6$; б) 30XГСА, обкатка роликом ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 800\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\alpha = 16.6$; в) 12X18H10T, обкатка роликом ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 700\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\alpha = 8.2$; г) сталь 45, гидродробеструйная обработка ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 500\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\alpha = 1$

На рис. 2 отображена зависимость максимума (по модулю) эпюры осевой компоненты тензора ОН σ_z^{rez} от температуры для образца из стали 30XГСА. Значения напряжений рассчитаны по схеме (7).

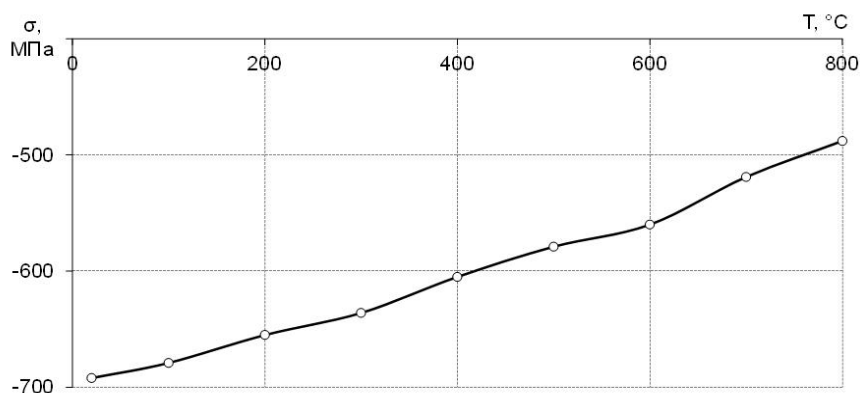


Рис. 2. Зависимость максимума (по модулю) компоненты σ_z^{rez} от конечной температуры нагрева образца (сталь 30XГСА)

Выводы

В работе предложен метод моделирования изменения НДС изделия и упругих свойств материала при нагреве. Приведены результаты расчетов для образцов из различных материалов, упрочненных разными технологическими способами.

Анализ полученных результатов показывает, что вследствие нагрева изделия наблюдается значительное перераспределение полей ОН в упрочненном слое. Одним из возможных применений данной методики является оценка скорости релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести даже при самоуравновешенных остаточных напряжениях в условиях чисто термического нагружения (термоэкспозиция образца при фиксированной температуре).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226с.
2. Радченко В.П., Павлова В.Ф., Саушкин М.Н. Определение параметра анизотропного упрочнения и остаточных напряжений в цилиндрическом образце из стали после обкатки роликом // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 4. – С. 93-100.
3. Саушкин М.Н., Радченко В.П., Павлов В.Ф. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52. – № 2. – С. 173-182.
4. Саушкин М.Н., Курпичёв В.А., Смыслов В.А. Феноменологический подход к моделированию напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненном слое цилиндрического изделия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2009. – № 1(18) – С. 159-168.
5. Павлов В.Ф., Курпичёв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
6. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочненном изделии цилиндрической формы при ползучести // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 6. – С. 90-99.
7. Саушкин М.Н., Смыслов В.А. Блок расчета начального напряженно-деформированного состояния конструкций в программном комплексе STRELAX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2010. – № 5(21). – С. 318-321.

Статья поступила в редакцию 15 октября 2013 г.

RESIDUAL STRESS AND ELASTIC DEFORMATION FIELDS EVALUATION FOR HEATED CYLINDRICAL SPECIMEN

V.A. Smyslov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The problem of cylindrical specimen surface layer stress-strain state evaluation after surface plastic hardening and following heating is investigated. It is shown, that due to Young's modulus change during the temperature stressing essential residual stress fields change happens. Results for cylindrical specimens, strengthened under different technologies, are introduced.

Keywords: *cylindrical specimen, surface plastic hardening, residual stress, temperature stressing.*