

На правах рукописи

ГОРЕЛОВА ВИКТОРИЯ ВИКТОРОВНА

**Моделирование наведения остаточных напряжений в
элементах конструкций в условиях ползучести**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

САМАРА-2003

Работа выполнена в Самарском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Астафьев Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Радченко Владимир Павлович

доктор физико-математических наук, профессор Сильвестров Василий Васильевич

Ведущая организация Самарский государственный аэрокосмический университет
им. С.П. Королёва

Защита состоится 18 декабря 2003 года в 15 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.218.06 при Самарском государственном университете по адресу:
443011, Самара, ул. Академика Павлова, 1, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Самарского
государственного университета.

Автореферат разослан 18 ноября 2003 года.

И. о. учёного секретаря
диссертационного совета

Клюев Н.И.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Разработка металлосберегающих технологий, позволяющих производить машины и механизмы повышенной прочности, в настоящее время является одной из основных задач научно-технического прогресса. Решение проблемы повышения прочности металла в условиях его эксплуатации вызывает необходимость поиска новых технологий, позволяющих защищать металл от нежелательных внешних воздействий. Данная проблема связана с учётом различных параметров и характеристик состояний, возникающих в материале. Среди внутренних параметров, характеризующих состояние материала в условиях внешних воздействий, особое место занимают остаточные напряжения. К настоящему времени проблема наведения и расчёта остаточных напряжений до конца не изучена и остаётся актуальной.

Известно, что остаточные напряжения, специальным образом наведённые в материале, влияют на устойчивость материала к внешним воздействиям. Металл, например, может иметь некоторые несовершенства структуры (дислокации, микротрещины, микропоры т. п.), которые способствуют его разрушению. Наличие сжимающих остаточных напряжений приводит к закрытию микротрещин и повышает прочностные характеристики металла.

Огромный экономический ущерб наносит также коррозия и вызванное ей коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Металл при КРН ухудшает свои характеристики, становится невозможным выполнение изделием заданных конструктивных функций. Известны различные методы борьбы, направленные против КРН. Большинство из них основано на нанесении самых различных защитных покрытий на поверхность металла с целью предотвращения или снижения проникновения ионов водорода внутрь металла. Наряду с нанесением защитных покрытий одним из методов, снижающих диффузию водорода в металле, также является наведение остаточных напряжений сжатия на поверхности металла.

Известны различные методы наведения остаточных напряжений в поверхностном слое металла – дробеструйная обработка, поверхностное пластическое деформирование, термообработка и т. д. Кроме них остаточные напряжения могут возникнуть и при следующем режиме термообработки. Пусть при термической обработке элементов конструкций в материале создан значительный градиент температуры, который, в свою очередь, создаёт упругие термические напряжения. При длительном времени воздействия на элемент конструкции высокой температуры и её градиента возникшие напряжения вызывают в металле деформации ползучести, которые приводят к релаксации этих термоупругих напряжений. При прекращении термической обработки и снятии градиента температуры возникнут термоупругие напряжения противоположного знака. Однако, при низкой температуре эти напряжения уже не будут релаксировать, что и приводит к появлению в элементах конструкций остаточных напряжений. Таким образом, сочетанием длительного с градиентом температуры нагрева и

последующего охлаждения можно получить различные распределения остаточных напряжений.

Целью данной диссертационной работы являются постановка и решение начально-краевой задачи о деформировании элементов конструкций в неоднородном поле температуры; анализ изменения напряженного состояния, вызванного заданным градиентом температуры; экспериментальная проверка величины и характера распределения остаточных напряжений, наведённых в бурильных трубах за счёт заданного градиента температуры.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Научная новизна заключается в создании метода повышения стойкости металла к внешним воздействиям (нагрузка, агрессивная среда и т. п.) с помощью наведения остаточных напряжений сжатия на свободной поверхности с учётом влияния ползучести и проверке данного метода в экспериментальных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Постановка и решение начально-краевой задачи термоупругоползучести в неоднородном температурном поле.

2. Распределение остаточных напряжений в трубах при их термообработке с заданным градиентом температуры.

3. Методика и результаты эксперимента по наведению остаточных напряжений в лёгких бурильных трубах.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов диссертационной работы обеспечивается применением фундаментального математического аппарата механики деформируемого твёрдого тела при постановке задачи и использованием апробированных алгоритмов численного решения, соответствием теоретических и экспериментальных результатов.

Практическая ценность. Теоретические и экспериментальные результаты данной работы показывают, что рассмотренный метод наведения остаточных напряжений может быть использован в нефтяной промышленности при создании в нефтепромысловых трубах остаточных напряжений, повышающих их стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением, а также в других отраслях, где необходимо наличие сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое элементов конструкций.

Апробация работы. Материалы настоящей диссертационной работы представлялись, докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах, школах и семинарах:

- Сибирской школе по современным проблемам механики деформируемого твердого тела, 1990, г. Якутск;
- IV Межреспубликанском симпозиуме «Остаточные напряжения: моделирование и управление», 1992, г. Пермь;
- Ежегодной областной научно-технической конференции «Исследования в области архитектуры, строительства и охраны окружающей среды», Самарская государственная архитектурно-строительная академия, 1993, 1997, 1998, 1999;

- Ежегодной научной конференции ученых и специалистов Самарского государственного университета, 2000, 2001;
- Научном семинаре «Актуальные проблемы механики сплошных сред» Самарского государственного университета под руководством д. ф.-м. н., проф. Астафьева В.И., 2001;
- Научном семинаре Самарского государственного аэрокосмического университета под руководством д. т. н., проф. Павлова В.Ф., 2002;
- Двенадцатой межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи», 2002, г. Самара;
- Третьей Международной конференции молодых учёных «Актуальные проблемы современной науки», 2002, г. Самара.
- Школе-семинаре Воронежского государственного университета «Современные проблемы механики и прикладной математики», 2002, г. Воронеж;
- Полностью диссертация была заслушана на расширенном заседании кафедры «Безопасность информационных систем» Самарского государственного университета 10 октября 2003 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объём работы 123 страницы, из них 107 страниц текста и 100 рисунков, список литературы включает 153 наименования.

Содержание работы

Во введении описывается объект исследования и состояние предмета исследования в настоящее время, приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы. Формулируется цель и задачи диссертационной работы, перечисляются используемые методы, а также отражается научная новизна, достоверность и практическая значимость работы, излагаются основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и публикациях. В конце введения приводится краткая аннотация диссертационной работы по главам.

В первой главе диссертационной работы приводится обзор литературы, посвящённой проблеме наведения остаточных напряжений в элементах конструкций. Отмечен ряд учёных, внесших значительный вклад в исследование проблемы наведения остаточных напряжений (И.А. Биргер, С.А. Бордаков, С.И. Иванов, А.А. Ильюшин, В.Ф. Павлов, Ю.Н. Работнов, S.R. Bodner, B.A. Boley, J.A. Burnett, A.M. Freudenthal, T. Inoue, E.F. Rybicki и другие).

Как показывает анализ литературы, в последние десятилетия основное внимание исследователей привлекает задача определения термоупругопластических напряжений при различных температурных и/или механических воздействиях. В этих задачах принимаются во внимание только термоупругие и пластические деформации, а также учитывается влияние фазового перехода. Одна-

ко, влияние деформаций ползучести на процесс наведения остаточных напряжений в большинстве работ игнорируется. В этой связи целью данной работы является исследование влияния процесса ползучести на величину и распределение остаточных напряжений в элементах конструкций.

Вторая глава посвящена постановке и решению начально-краевой задачи термоупругоползучести под действием градиента температур. Несвязанная задача термоупругоползучести включает в себя две основные задачи – температурную и механическую.

Для решения температурной задачи определения поля температуры в теле при заданных начальных и граничных условиях необходимо решить уравнение теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_q \Delta T + Q, \quad (1)$$

где c - удельная теплоёмкость, T - температура, t - время, λ_q - коэффициент теплопроводности, $\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2}$ - оператор Лапласа, Q - мощность объёмных источников тепла.

Начальным условием в данной задаче будет условие

$$T(x_k, t_0) = T_0. \quad (2)$$

В качестве граничного условия воспользуемся смешанным граничным условием теории теплопроводности

$$-\lambda_q \frac{\partial T(x_k, t)}{\partial n} = h[T(x_k, t) - T^*], \quad (3)$$

где n - внешняя нормаль к поверхности тела в точке x_k , h - коэффициент теплообмена, который зависит от термических и физических характеристик поверхности тела и окружающей среды, T^* - температура окружающей среды.

Для анализа механической задачи термоупругоползучести запишем уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = 0 \quad (i=1,2,3), \quad (4)$$

где σ_{ij} - тензор напряжения, ρ - плотность, F_i - объёмные силы, запятая означает ковариантное дифференцирование по соответствующей переменной, по повторяющимся индексам производится суммирование.

В условиях повышенных температур необходимо учитывать явление ползучести. В связи с этим полная деформация ε_{ij} может быть записана в виде

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^c, \quad (5)$$

где ε_{ij}^e - упругая деформация, ε_{ij}^T - температурная деформация, ε_{ij}^c - деформация ползучести.

Уравнение равновесия необходимо дополнить законом Гука

$$\sigma_{ij} = \lambda(\theta - \theta^T - \theta^c)\delta_{ij} + 2\mu(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^T - \varepsilon_{ij}^c). \quad (6)$$

С учётом температурных деформаций ε_{ij}^T и деформации ползучести ε_{ij}^c уравнения Ламе запишутся в виде

$$(\lambda + \mu)\theta_{,i} + \mu\Delta u_i + [\rho F_i - (3\lambda + 2\mu)\alpha T_{,i} - \lambda\theta_{,i}^c - 2\mu\varepsilon_{ij,j}^c] = 0. \quad (7)$$

Граничные условия при этом примут вид:

на поверхности S_f

$$(\lambda\theta n_i + 2\mu\varepsilon_{ij}n_j)|_{S_f} = [f_i + (3\lambda + 2\mu)\alpha T n_i + \lambda\theta^c n_i + 2\mu\varepsilon_{ij}^c n_j], \quad (8)$$

а на поверхности S_u

$$u_i|_{S_u} = u_i^0. \quad (9)$$

Скорость деформации ползучести с учётом условия несжимаемости $\theta^c = \varepsilon_{kk}^c = 0$ можно записать в виде

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} B \sigma_e^{n-1} S_{ij}, \quad (10)$$

где B и n - параметры степенного закона ползучести, σ_e - интенсивность напряжений, $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$ - девиатор тензора напряжений.

Начальные условия с учётом того, что характерное время процесса ползучести t_c значительно больше характерного времени процесса теплопроводности t_r , можно записать в виде

$$t = t_0, \quad \varepsilon_{ij}^c = 0, \quad \sigma_{ij}|_{t=t_0} = \sigma_{ij}^T = (3\lambda + 2\mu)\alpha(T - T_0)\delta_{ij}. \quad (11)$$

Длительный процесс нагрева элемента конструкции приведёт к полной релаксации начальных термоупругих напряжений σ_{ij}^T . После прекращения нагрева при низких значениях температуры ползучесть и вызванная ей релаксация вновь возникших термоупругих напряжений будут отсутствовать. В этом случае новые термоупругие напряжения останутся неизменными. Это и есть остаточные напряжения при данной технологии их наведения.

Во второй части второй главы рассматривается решение задачи термоупругоползучести для длинного полого цилиндра с внутренним радиусом a и внешним радиусом b .

Уравнение теплопроводности (1) уравнение равновесия (4) в цилиндрической системе координат имеют вид

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + Q, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0. \quad (13)$$

Определяющие соотношения (6) будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E(T)} (\sigma_r - \nu(\sigma_\varphi + \sigma_z)) + \alpha(T)(T - T_0) + \varepsilon_r^c \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{E(T)} (\sigma_\varphi - \nu(\sigma_r + \sigma_z)) + \alpha(T)(T - T_0) + \varepsilon_\varphi^c \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E(T)} (\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\varphi)) + \alpha(T)(T - T_0) + \varepsilon_z^c \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Граничные условия на внутренней и внешней стенках трубы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r(r=a) &= \sigma_r(r=b) = 0 \\ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} &= h_a(T)(T - T_a) \quad \text{при } r=a \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} &= h_b(T)(T - T_b) \quad \text{при } r=b \end{aligned} \right\}.$$

Для решения задачи термоупругоползучести в безразмерных переменных уравнение равновесия (13) и определяющие соотношения (14) записываются в скоростях:

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_r}{\partial r} + \frac{\dot{\sigma}_r - \dot{\sigma}_\varphi}{r} = 0, \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_r &= \dot{\sigma}_r - \nu(\dot{\sigma}_\varphi + \dot{\sigma}_z) + \dot{T} + f(\sigma_e) \times \left[\frac{\sigma_r - \frac{1}{2}(\sigma_\varphi + \sigma_z)}{\sigma_e} \right] \\ \dot{\varepsilon}_\varphi &= \dot{\sigma}_\varphi - \nu(\dot{\sigma}_r + \dot{\sigma}_z) + \dot{T} + f(\sigma_e) \times \left[\frac{\sigma_\varphi - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_z)}{\sigma_e} \right] \\ \dot{\varepsilon}_z &= \dot{\sigma}_z - \nu(\dot{\sigma}_r + \dot{\sigma}_\varphi) + \dot{T} + f(\sigma_e) \times \left[\frac{\sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\varphi)}{\sigma_e} \right] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Для $f(\sigma_e)$ используется степенная зависимость $f(\sigma_e) = e^{-\frac{\nu}{T}} \sigma_e^n$, где σ_e - интенсивность напряжений, а $T(r)$ определяется из решения термической задачи соотношением $T = C_1 + C_2 \ln r - \frac{Qr^2}{4}$.

После соответствующих преобразований имеем следующее дифференциальное уравнение для величины $\dot{\sigma}_r$

$$\frac{\partial^2 \dot{\sigma}_r}{\partial r^2} + \frac{3}{r} \frac{\partial \dot{\sigma}_r}{\partial r} = f(r, t), \quad (17)$$

где

$$f(r,t) = -\frac{g}{1-\nu^2} \left[\left(1-\frac{\nu}{2}\right) \frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial r^2} + \left(1-\frac{\nu}{2}\right) \frac{3}{r} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \left(\nu-\frac{1}{2}\right) \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_z}{\partial r} \right] -$$

$$-\frac{1}{1-\nu^2} \frac{\partial g}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{2}-\nu\right) \frac{\sigma_r}{r} + \left(1-\frac{\nu}{2}\right) \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \left(\nu-\frac{1}{2}\right) \frac{\sigma_z}{r} \right] - \frac{1}{1-\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}$$

Так как поле температур в трубе считается стационарным $t_c \gg t_r$, то последним слагаемым в $f(r,t)$ можно пренебречь.

Получение аналитического решения данного уравнения представляет серьёзные трудности, поэтому были использованы численные методы. Расчёт производился следующим образом. Для каждого временного слоя $t_k = k\Delta\tau$ при известном напряжении $\sigma_r^{(k)}(r, t_k)$ уравнение (17) для $\dot{\sigma}_r^{(k)}(r, t_k)$ решалось методом прогонки. Затем по явной схеме Эйлера находилось напряжение $\sigma_r^{(k+1)}(r, t_{k+1})$ для следующего временного слоя $t_{k+1} = t_k + \Delta\tau$, методом прогонки находилось $\dot{\sigma}_r(r, t_{k+1})$ и т. д. Характерные результаты представлены на рисунках 1-6. Расчёты проводились для $a/b = 0.5, 0.8$. Температура выбиралась равной 100°C и 500°C , а безразмерная величина \hat{Q} полагалась равной 0.001 и 0.005.

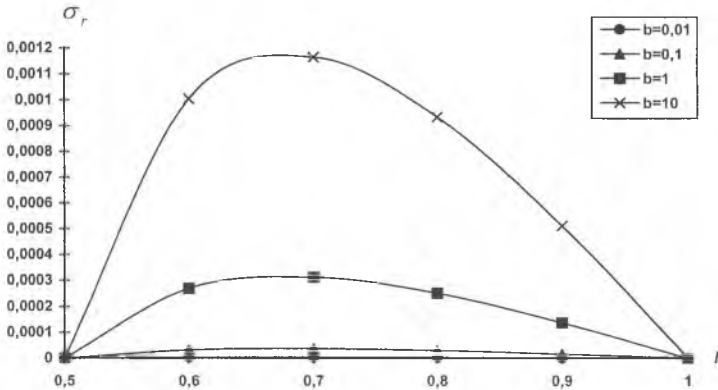


Рис. 1. Распределение начальных термоупругих напряжений σ_r в зависимости от толщины стенки трубы при различных коэффициентах теплообмена ($\hat{h}_a = \hat{h}_b = \beta$): 1 - 0,01; 2 - 0,1; 3 - 1; 4 - 10; $T = 100^\circ\text{C}$; $\hat{Q} = 0$; $r = \tilde{a} = 0,5$

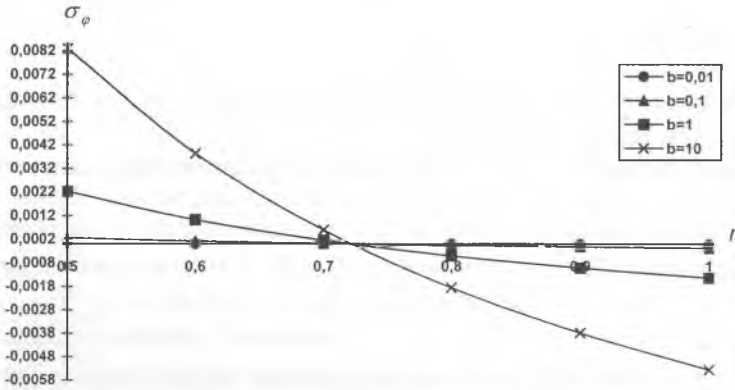


Рис. 2. Распределение начальных термоупругих напряжений σ_φ в зависимости от толщины стенки трубы при различных коэффициентах теплообмена ($\hat{h}_a = \hat{h}_b = \beta$): 1 - 0,01; 2 - 0,1; 3 - 1; 4 - 10; $T = 100^\circ \text{C}$; $\hat{Q} = 0$; $r = \bar{a} = 0,5$

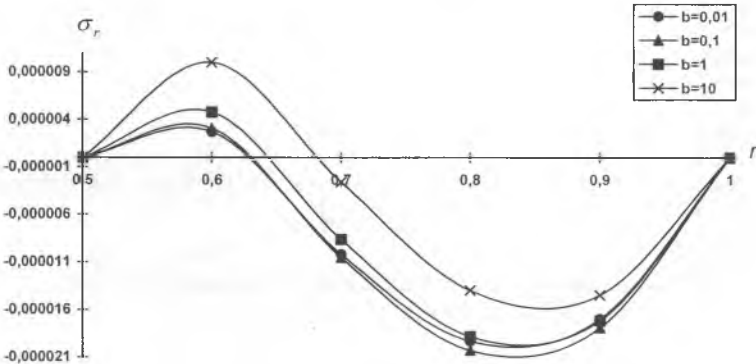


Рис. 3. Распределение начальных термоупругих напряжений σ_r в зависимости от толщины стенки трубы при различных коэффициентах теплообмена ($\hat{h}_a = \hat{h}_b = \beta$): 1 - 0,01; 2 - 0,1; 3 - 1; 4 - 10; $T = 20^\circ \text{C}$; $\hat{Q} = 0,005$; $r = \bar{a} = 0,5$

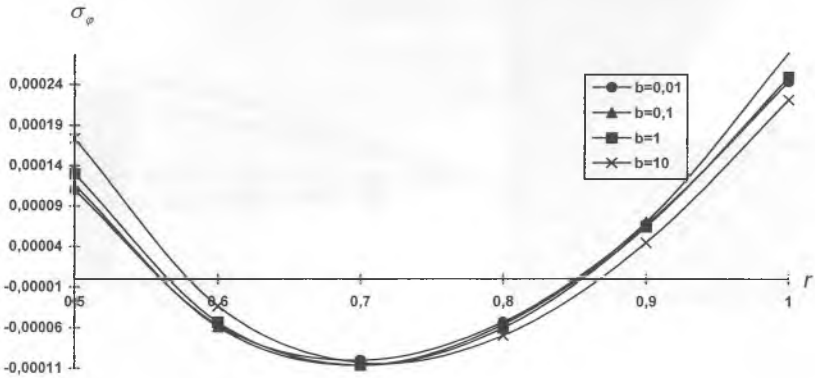


Рис. 4. Распределение начальных термоупругих напряжений σ_φ в зависимости от толщины стенки трубы при различных коэффициентах теплообмена ($\hat{h}_a = \hat{h}_b = \beta$): 1 - 0,01; 2 - 0,1; 3 - 1; 4 - 10; $T = 20^\circ \text{C}$; $\hat{Q} = 0,005$; $r = \tilde{a} = 0,5$

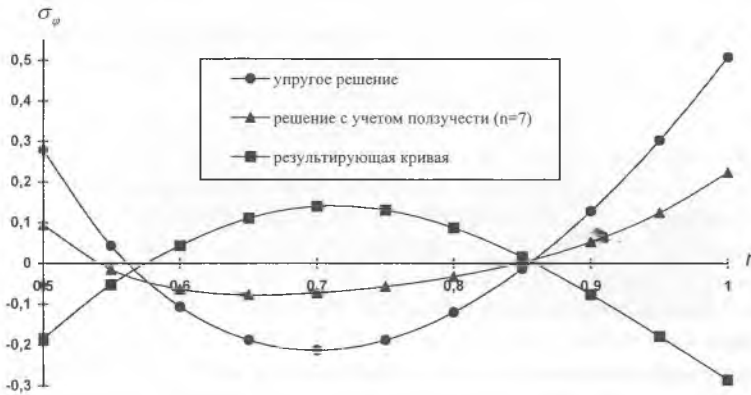


Рис. 5. Распределение тангенциальных остаточных напряжений по толщине стенки трубы с учётом явления ползучести при $n=7$

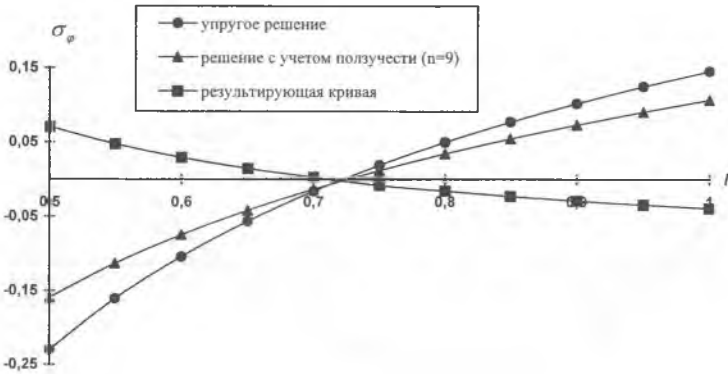


Рис. 6. Распределение тангенциальных остаточных напряжений по толщине стенки трубы с учётом явления ползучести при $n=9$

В третьей главе проводится сравнение результатов наведения остаточных напряжений, полученных во второй главе, с результатами, полученными по другим технологиям. Одной из наиболее распространённых технологий наведения остаточных напряжений является дробеструйная обработка поверхностного слоя. В связи с этим третья глава начинается с конечно-элементного расчёта (ANSYS 5.7) процесса упругопластического контактного взаимодействия отдельной сферической частицы с толстой плитой.

На первом этапе рассматривался случай статического приложения нагрузки. При описании поведения материала использовалась модель упругопластического тела с линейным упрочнением. Нагружение производилось путём постепенного увеличения усилия сферической частицы диаметром 1 мм на контактную поверхность и записи зависимости $P \sim \delta$ (P —сила, δ —смещение). Результаты расчётов для нормального давления $p=16 \cdot 10^5$ Па представлены на рис. 7. Из рисунка 7 видно, что в случае развитого пластического течения при больших давлениях контактные усилия принимают достаточно равномерный характер, а максимальная величина контактного давления достигает значения $4\sigma_T$.

Распределение остаточных напряжений σ_z по сечению представлено на рис. 8. Как видно из этого рисунка, распределение σ_z по толщине имеет существенно неоднородный характер. Максимальные растягивающие напряжения σ_z (превышающие предел текучести) возникают вблизи поверхности, что представляет собой отрицательный фактор, так как увеличивается вероятность возникновения вблизи поверхности микродефектов — микропор и микротрещин.

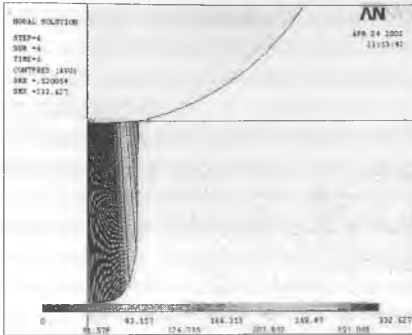


Рис. 7. Вид распределения контактных напряжений для величины нормального давления $p=16 \cdot 10^5$ Па

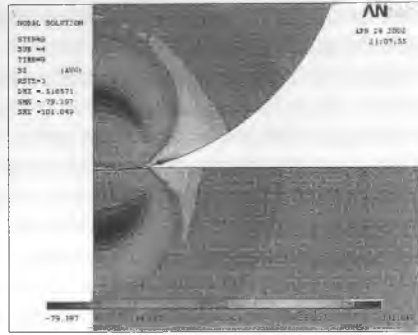


Рис. 8. Вид распределения остаточных напряжений σ_z по сечению

Далее в работе результаты статического анализа были обобщены на случай динамического воздействия частицы на преграду, а также на случай ударного нагружения плоского образца ударником. Во всех этих случаях отмечалось, что вблизи поверхности нагружения образуется зона с высокой плотностью микропор или микротрещин (рис. 9).

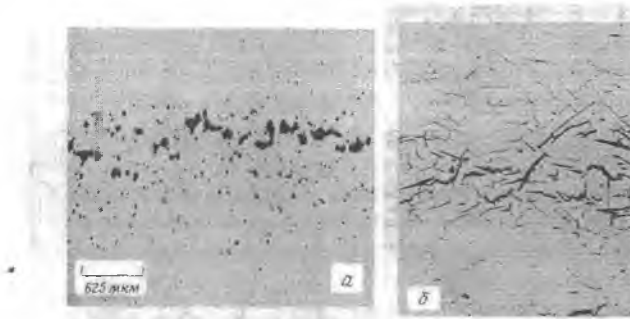


Рис. 9. Характерное поперечное сечение образца, подвергнутого удару пластиной (Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грещук Л.Б., Курран Д.Р. Динамика удара. - М.: Мир, 1985. - 296 с., стр. 261, рис. 6.4)

Таким образом, основная негативная особенность процесса дробеструйной обработки поверхности заключается в том, что к обработанной поверхности прилегает область со значительными растягивающими напряжениями σ_z , в которой могут зарождаться микропоры и микротрещины. Как следует из результатов главы 2, при наведении остаточных напряжений с помощью градиента температуры данная особенность отсутствует, что говорит об определённом

преимущество этого способа наведения остаточных напряжений перед дробеструйной обработкой поверхности.

Наряду с дробеструйной обработкой широкое распространение приобрели и другие способы наведения остаточных напряжений в поверхностном слое конструкций. Одним из них является термопластическое упрочнение (ТПУ). При этом для высоких значений температуры на поверхности необходимо также учитывать и явление ползучести, что и было описано в главе 2.

Во второй главе модель ТПУ была рассмотрена без учёта краевых эффектов. В третьей главе для учёта влияния краевых эффектов при температурном нагружении трубы была построена ее конечно-элементная модель. Рассматривался концевой участок трубы, подвергнувшейся ТПУ. Материал, из которого изготовлена труба – алюминиевый сплав Д16Т. При описании его механических свойств использовалась упругопластическая модель с линейным упрочнением, для описания свойств ползучести использовался степенной закон Нортона. Граничные условия для температуры следующие: на внешней поверхности трубы $T=200^{\circ}\text{C}$, на внутренней поверхности трубы $T=20^{\circ}\text{C}$.

При анализе краевых эффектов к торцам трубы также были приложены граничные условия $T=200^{\circ}\text{C}$. Такой температурный режим выдерживался в течение 48 часов, после чего труба остывала при комнатной температуре 20°C (конвективный теплообмен). Результаты расчета представлены на рис. 10. Как видим, в данной задаче краевой эффект играет весьма существенную роль, и его необходимо учитывать в реальных процессах ТПУ.

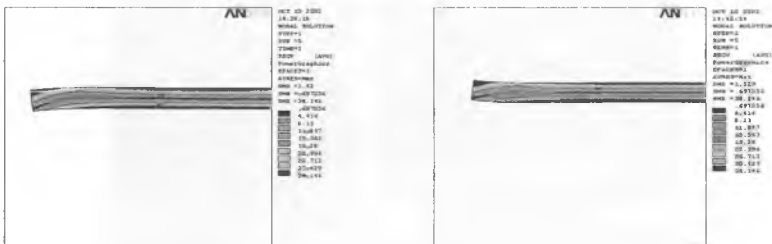


Рис. 10. Интенсивность напряжений в трубе до релаксации (с наружным – слева, и внутренним – справа нагревом)

При описании процесса ТПУ для внутренней и внешней поверхностей трубы необходим учёт теплообмена между нагретым металлом и охлаждающей жидкостью. В связи с этим возникает вопрос о виде граничных условий на поверхности трубы, подвергаемой охлаждению. Для определения граничных условий важно знать не среднее значение температуры на выходе, а неоднородное поле температуры по всему сечению жидкости, охлаждающей поверхность трубы. На входе трубы температура воды может иметь однородный характер,

однако по мере продвижения внутрь трубы распределение температуры может принять существенно другой вид из-за процессов теплообмена и конвекции. Следует отметить, что существенную роль здесь оказывает величина коэффициента теплообмена h .

В связи с этим в работе была произведена оценка поля температуры потока охлаждающей жидкости в трубе. Для расчета также был использован пакет КЭ анализа ANSYS 5.7. Результаты расчётов при температуре на внешней границе 200°C и температуре входного потока 20°C показали, что значение температуры существенно изменяется по длине трубы и зависит от характера течения (ламинарное или турбулентное). Перераспределение температуры приводит к тому, что градиент температуры в задаче о ТПУ может принимать существенно иное значение. Одним из выводов из произведенных расчетов может стать рекомендация об увеличении интенсивности подачи и перемешивания охлаждающей жидкости в процессе ТПУ.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному определению напряжённого состояния трубы, подвергнутой градиенту температур. Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной базе «ВНИИТ-НЕФТЬ».

Эксперимент по наведению и изучению остаточных напряжений проводился в три этапа: первый этап - наведение остаточных напряжений; второй этап - подготовка экспериментальных образцов; третий этап - расчёт экспериментальных значений. В качестве исследуемого образца был взят отрезок трубы с внешним диаметром 73 мм и внутренним - 50 мм. Длина образца составляла 140 мм. Материал, из которого сделан образец - сплав Д16Т, из которого изготавливаются легкие буровые трубы (ЛБТ). Эти трубы были выбраны для эксперимента с той целью, что они имеют вес значительно меньший в сравнении со стальными трубами, что значительно облегчает практическую работу с ними. Кроме того, сплав алюминия подвержен деформации ползучести при более низких температурах, чем сталь. Образец обладает относительно большой толщиной - 1/2 от внутреннего диаметра, что позволяет наглядно проводить измерение деформации образца на различных стадиях эксперимента. Блок-схема установки изображена на рис. 11.

На первом этапе эксперимента проводилось наведение внутренних остаточных напряжений. Наведение происходило под действием температурного градиента по толщине стенки образца. Для этого внешняя поверхность цилиндрического образца подвергалась нагреву в муфельной печи, мощность которой 3 кВт. Внутренняя поверхность охлаждалась проточной водой с температурой на входе не более 25°C в течение времени нагрева. Измерение температуры проводилось с помощью термопары, прикреплённой к внешней поверхности образца. Таким образом, осуществлялся контроль температуры воды на выходе из муфельной печи. Для уменьшения влияния теплового потока печи на термопару и повышения достоверности показаний она снаружи покрывалась термо-

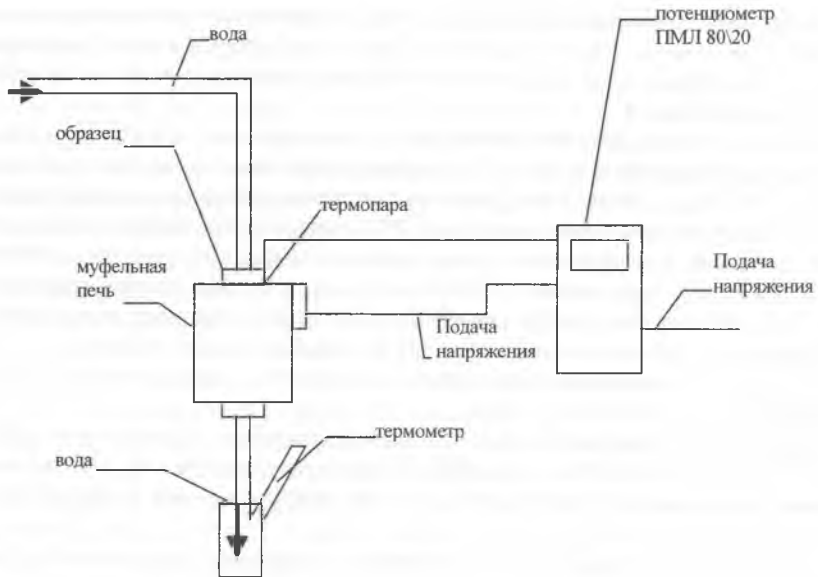


Рис. 11. Блок-схема установки экспериментальной установки для исследования остаточных напряжений

изолятором (асбестовым картоном). Температура воды на выходе контролировалась термометром с диапазоном измеряемых температур от -5 до $+100^{\circ}\text{C}$. Нагрев образца длился 48 часов. Температура на внешней поверхности цилиндра в течение времени нагрева составляла $170 \pm 10^{\circ}\text{C}$. Температура воды на выходе была не более $+40^{\circ}\text{C}$.

После выключения муфельной печи и до удаления образца из зоны нагрева подача воды не прекращалась. После извлечения образца его остывание на воздухе до температуры $25-30$ градусов длилось 1 час 40 мин. На первом этапе эксперимента проводилось наведение внутренних остаточных напряжений. Наведение происходило под действием температурного градиента по толщине стенки образца.

На втором этапе из образца были вырезаны 3 кольца шириной 22 мм каждый (рис. 12.).

На третьем этапе проводилось измерение производилось определение значений тангенциальных напряжений σ_{θ} .

Определение значений тангенциальных остаточных напряжений проводилось по следующей методике. На торце каждого кольца были нанесены пять пар точек на расстоянии ~ 4 мм друг от друга по одной паре на радиусах 27, 29, 31, 33

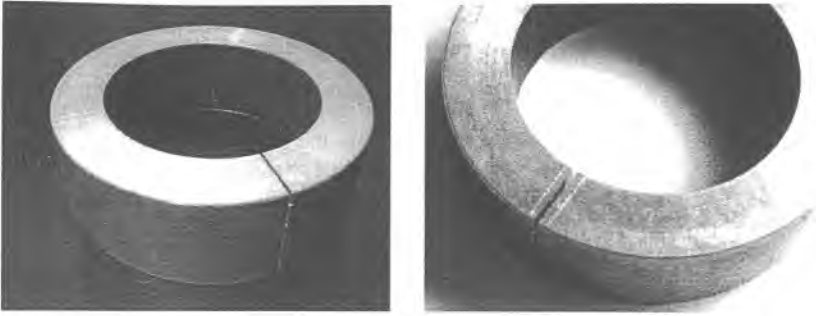


Рис. 12. Фотографии вырезанных колец

и 35 мм (рис. 13) с таким расчётом, чтобы разрезка кольца была проведена между этими метками, что позволило определить расходимость (сходимость) кольца по изменению расстояния между метками.

По результатам эксперимента с использованием теории изгиба стержня большой кривизны были рассчитаны значения тангенциальной составляющей остаточных напряжений σ_φ в зависимости от текущего радиуса.

Анализ экспериментальных и теоретических значений σ_φ (рис. 14) позволяет установить, что полученные в обоих случаях значения тангенциальной со-

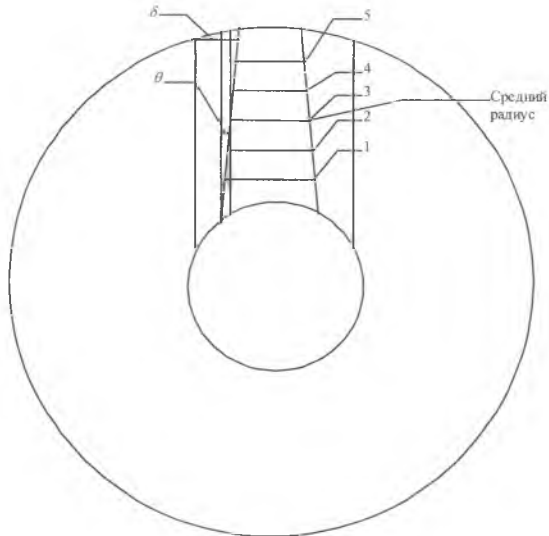


Рис. 13. Изображение кольца с нанесенными метками (1,2,3,4,5 – пары меток для определения сходимости или расходимости кольца)

ставляющей остаточных напряжений соответствуют друг другу, незначительные отклонения обусловлены погрешностью эксперимента, которая составляет ~10%. Величина σ_φ в теоретических расчётах определялась по безразмерной величине $\hat{\sigma}_\varphi$ следующим образом:

$$\sigma_\varphi = \hat{\sigma}_\varphi \alpha E T_m, \text{ где } T_m = 931,7^\circ\text{K} - \text{температура плавления алюминия.}$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная технология наведения остаточных напряжений сжатия на одной из поверхностей трубы является эффективной, в том числе и для решения проблемы коррозионной стойкости металлических труб.

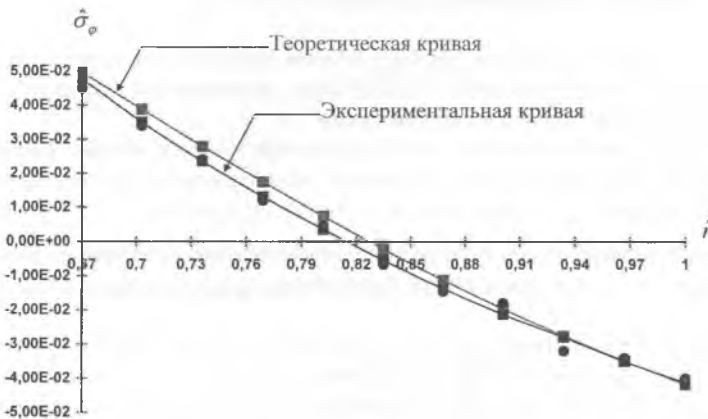


Рис. 14. Зависимости экспериментальных и теоретических значений тангенциальной составляющей остаточных напряжений от величины текущего радиуса кольца.

Заключение

Данная работа посвящена решению проблемы повышения стойкости металла к нежелательным внешним воздействиям методом наведения остаточных напряжений при учёте эффекта ползучести. Выполнен теоретический анализ процесса наведения остаточных напряжений в элементах конструкций с учётом эффекта ползучести. Теоретически и экспериментально определена величина тангенциальной составляющей остаточных напряжений в толстостенных трубах. Установлено удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных данных. Проведя анализ полученных результатов, приходим к следующим выводам:

1. наряду с существующими технологиями наведения остаточных напряжений в элементах конструкций возможен метод их наведения в неравномерном поле температуры с учётом эффекта ползучести;

2. характер распределения напряжений при данном методе их наведения существенно отличается от аналогичного при дробеструйной обработке поверхности – более глубокое проникновение тангенциальных сжимающих напряжений вглубь элемента конструкции и незначительные по величине нормальные растягивающие напряжения в приповерхностном слое;

3. величина остаточных напряжений при их наведении с учётом эффекта ползучести существенно зависит от коэффициента теплообмена при поверхностном разогреве и слабо зависит – при объёмном разогреве элемента конструкции;

4. экспериментальные значения тангенциальных остаточных напряжений, определённые для лёгких бурильных труб при их поверхностном разогреве, соответствуют вычисленным теоретическим значениям.

Хочу выразить глубокую признательность моему отцу – доктору технических наук Горелову Виктору Ивановичу – за постановку проблемы и оказанное им при его жизни внимание к работе.

Основные публикации по теме диссертационной работы

1. Астафьев В.И., Горелова В.В. Тензорный параметр упрочнения в условиях ползучести // Сибирская школа по современным проблемам МДТТ: Тезисы докл. – Якутск, 1990. - С. 11-12.
2. Горелова В.В. Определение остаточных напряжений в трубах при переменном режиме нагревания-охлаждения / УДК 620.9 Энергетика. – М., 1991. - 21 с., прил. – Деп. в ВИНТИ 29.05.91, № 2241-В 91.
3. Астафьев В.И., Горелова В.В. Влияние процесса ползучести на величину остаточных напряжений при термоциклировании // Остаточные напряжения: моделирование и управление: Тезисы докладов IV Межреспубликанского симпозиума. – Пермь, 1992. - С. 13.
4. Горелова В.В. Анализ остаточных напряжений, наведённых ползучестью в трубах в различных условиях нагружения // Неупругие деформации, прочность и надёжность конструкций. - Самара: СГТУ, 1993. - С. 48-53.
5. Горелова В.В. Сравнение результатов теоретических исследований по наведению остаточных напряжений растяжения-сжатия в условиях ползучести с экспериментальными данными // Исследования в области архитектуры, строительства и охраны окружающей среды: Тезисы докладов обл. 56-ой НТК. - Самара: СамГАСА, 1999. - С. 51.
6. Горелова В.В. Конечно-элементное моделирование упругопластического контактного взаимодействия сферической частицы с плитой // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды двенадцатой межвузовской конференции 29-31 мая 2002 г. - Ч. 1. – Самара, 2002. – С. 54-58.

7. Астафьев В.И., Горелова В.В. Упругопластическое контактное взаимодействие сферической частицы с плитой // Современные проблемы механики и прикладной математики: Труды школы-семинара ВГУ. – Воронеж, 2002. – С. 12-17.
8. Горелова В.В. Численный расчет упругопластического контактного взаимодействия сферической частицы с плитой // Актуальные проблемы современной науки: Труды 3-й Международной конференции молодых ученых 30 сентября – 2 октября 2002 г. – Ч. 1. – Самара, 2002. – С. 52-53.

Подписано в печать 10 ноября 2003 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ №94
443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1.
Отпечатано УОП СамГУ