

ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ КРУПНЫХ ПОКОВОК

Д.А. Мирзаев, А.Д. Шабуров

INTERNAL STRESSES DURING COOLING OF LARGE FORGINGS

D.A. Mirzaev, A.D. Shaburov

В работе произведен расчет напряженного состояния и оценка величины внутренних напряжений для нестационарного температурного поля цилиндрических поковок различного диаметра при охлаждении на воздухе.

Ключевые слова: охлаждение на воздухе, внутренние напряжения, расчет напряжений, моделирование охлаждения.

The paper describes calculations of the stress state and estimates of the magnitude of internal stresses for unsteady temperature field of cylindrical forgings of various diameters during air cooling.

Keywords: air cooling, internal stresses, stress analysis, modeling of cooling.

Введение

В настоящее время считается, что флокены возникают в результате разрастания зародышей трещин, постепенно заполняемых водородом. При этом напряжения, обусловленные неоднородностью охлаждения поковок по сечению или фазовыми переходами в процессе охлаждения, могут в значительной мере стимулировать развитие флокенов. Например, изучая образование флокенов в стали 35ХНЗМФА [1], М.А. Штремель с сотрудниками экспериментально показали, что тангенциальные растягивающие напряжения, которые максимальны при охлаждении цилиндрических поковок, ориентируют флокены в радиальном направлении. Они обнаружили, что плоскость большинства флокенов в среднем интервале радиуса отклоняется от радиального направления не более чем на 20°. Для понимания закономерностей возникновения флокенов и трещин иной природы очень важно изучить характер напряженного состояния и величины напряжений, которые возникают при охлаждении поковок разного диаметра, чему и посвящено данное исследование.

Методика расчета

Для расчета напряженного состояния цилиндрической поковки предварительно были рассчитаны температурные поля при охлаждении поковок большого диаметра от температуры противоблокенного отжига (680 °С) до комнатной температуры, причем для расчета температур по сечению поковки в зависимости от времени охлаждения была разработана компьютерная программа, использующая метод конечных разностей. Методика расчета и сравнение с экспериментальными данными подробно изложены в предыдущих работах [4].

Параллельно с моделированием охлаждения производился расчет внутренних напряжений σ , возникающих в металле по формулам работы [2]:

$$\sigma_r = \frac{\beta E}{1-\nu} (T_n - T_k) \times \sum_{n=1}^{100} G_n \left[I_1(\mu_n) - \frac{R}{r} I_1\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \right] e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}}; \quad (1a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\beta E}{1-\nu} (T_n - T_k) \times \sum_{n=1}^{100} G_n \left[I_1(\mu_n) + \frac{R}{r} I_1\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) - \mu_n I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \right] \times e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}}; \quad (1б)$$

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} (T_n - T_k) \times \sum_{n=1}^{100} G_n \left[2I_1(\mu_n) - \mu_n I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \right] e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}}, \quad (1в)$$

где коэффициенты

$$G_n = \frac{2}{\mu_n^2} \cdot \frac{I_1(\mu_n)}{I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)}; \quad (2)$$

T_n – температура начала охлаждения; T_k – температура окончания охлаждения; E – модуль нормальной упругости; β – коэффициент теплового расширения; ν – коэффициент Пуассона.

Формулы (1a)–(1в) записаны в виде сумм бесконечного ряда слагаемых, каждый из которых представляет произведение координатной функции $U_n(r) = I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)$ на функцию от времени

$e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}}$, где $I_n\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)$ – функция Бесселя n -го

порядка ($n = 0, 1$), a – коэффициент температуропроводности стали, а величины μ_n представляют собой решение трансцендентного уравнения

$$\mu_n \cdot I_1(\mu_n) = \frac{\alpha}{\lambda} R \cdot I_0(\mu_n), \quad (3)$$

в котором параметр $\frac{\alpha}{\lambda} R$ является критерием Био.

Здесь α – коэффициент теплообмена, λ – коэффициент теплопроводности.

В качестве исходных параметров для расчета были приняты: температура начала охлаждения 680 °С, охлаждение на спокойном воздухе с температурой 25 °С, марка стали 40ХМА, диаметр поковки до 1000 мм. Кривые охлаждения в различных точках поковки диаметром 1000 мм приведены на рис. 1. Как показано в [4], отклонение расчетных значений температуры от эксперимента не превышает 30 °С.

Существует мнение [3], что величина возникающих термических напряжений зависит, главным образом, от разности температур центра и поверхности поковки. Приведенные расчеты (рис. 2) показали, что максимальная разность температур для поковки диаметром 1000 мм наблюдается после полуторачасового охлаждения. У поковок меньшего диаметра максимальная разность температур наблюдается при тем меньшей длительности охлаждения, чем меньше диаметр поковки.

Результатом расчета по уравнениям (1а)–(1в) является зависимость температуры поковки от времени для различных отношений r/R , где R – радиус поковки, r – радиус рассматриваемого слоя.

Расчет по уравнениям (1а)–(1в) для трех различных участков поковки в зависимости от времени охлаждения (рис. 3) показывает, что максимальные напряжения возникают через 1–3 часа после начала охлаждения, когда разность температур центра и поверхности оказывается максимальной (см. рис. 2). При этом напряжения на поверх-

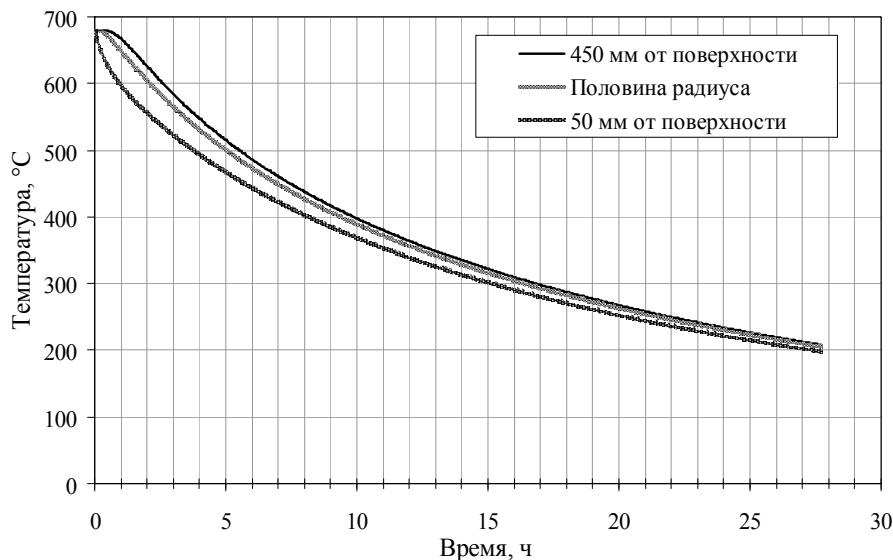


Рис. 1. Температура поковки диаметром 1000 мм при охлаждении на воздухе в трех различных точках от поверхности

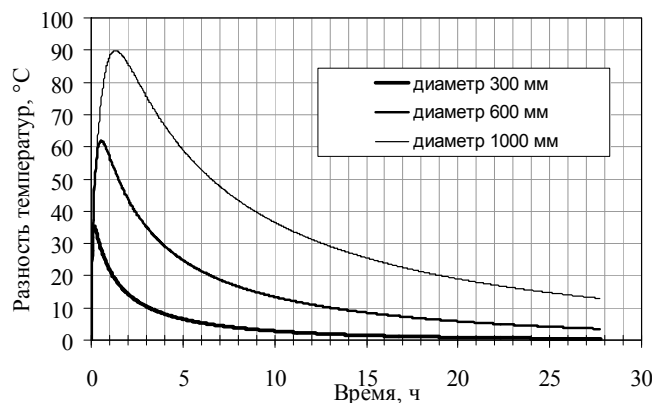


Рис. 2. Разность температур между центром и поверхностью поковок как функция длительности охлаждения на воздухе поковок различного диаметра

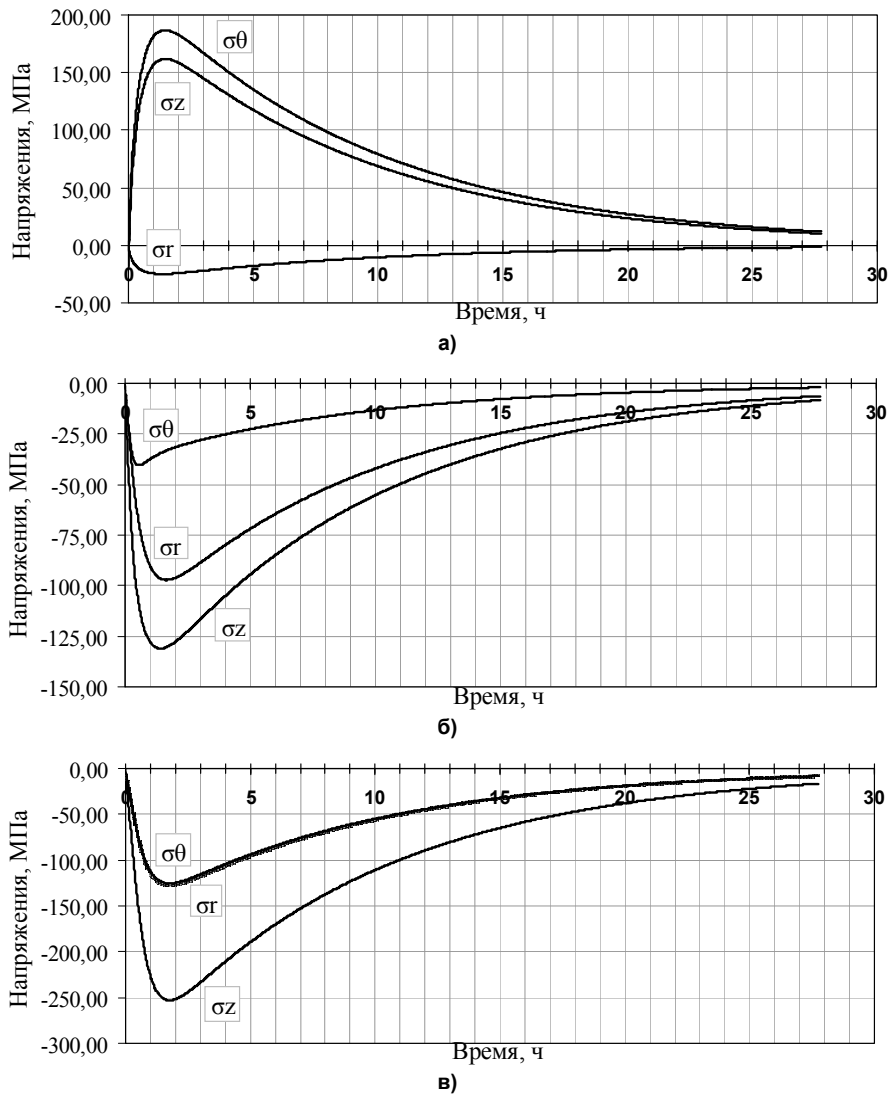


Рис. 3. Внутренние напряжения: а – на расстоянии 450 мм от поверхности; б – в центре поковки; в – на расстоянии 50 мм от поверхности

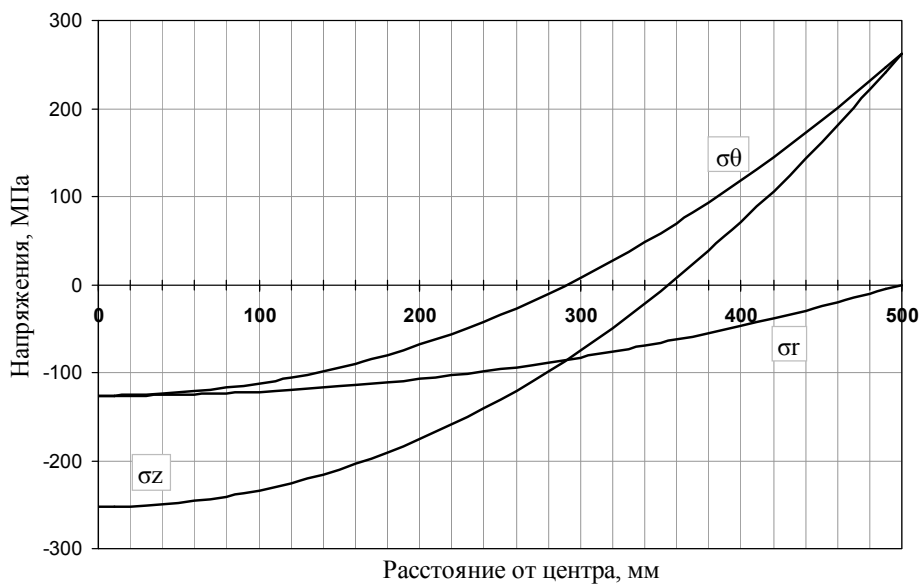


Рис. 4. Внутренние напряжения в зависимости от радиуса через 2 ч после начала охлаждения ($R = 500$ мм)

ности (рис. 3, в) и в центре (рис. 3, а) поковки, соответственно сжимающие или растягивающие, принимают максимальные значения (рис. 4).

Выводы

При охлаждении поковок большого диаметра в однофазной α -области в цилиндрических образцах возникают осевые (σ_z), радиальные (σ_r) и окружные (σ_θ) напряжения. Радиальные напряжения всегда сжимающие, тогда как σ_θ и σ_z оказываются сжимающими на оси поковки и растягивающими на внешней поверхности. Максимальная величина напряжений для всех размеров поковок наблюдается в относительно ранний момент времени, когда в поковке возникает максимальная разность температур между поверхностью и центром. При дальнейшем охлаждении абсолютная величина напряжений уменьшается и стремится к нулю при подходе к комнатной температуре.

Литература

1. Строение флокенов в стали 35ХНЗМФА / Н.К. Мочалин, А.С. Кузнецов, М.А. Штремель, В.А. Волков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1977. – № 9. – С. 127–131.
2. Тайц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Н.Ю. Тайц. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567 с.
3. Склюев, П.В. Зависимость остаточных напряжений от скорости охлаждения после отпуска / П.В. Склюев, Б.Д. Петров // Проблемы металлургии и термообработки – М.; Свердловск: Машигиз, 1960. – Вып. 2. – С. 136–142.
4. Шабуров, А.Д. Расчет и моделирование охлаждения крупных поковок / А.Д. Шабуров, Д.А. Мирзаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2011. – Вып. 17. – № 36 (253). – С. 66–69.

Поступила в редакцию 27 декабря 2011 г.