

4) происходит дальнейшее интенсивное понижение температуры, наряду с этим возникает текучесть оптико-механических характеристик; это зона максимальной неустойчивости напряжений; напряжения, образованные в третьей зоне, релаксируют.

5) зона стеклования; в этой зоне происходит выравнивание температуры по объему. Напряжения, образованные на предыдущих этапах, исчезают (но не полностью). В материале возникают самоуравновешенные по объему остаточные напряжения, соответствующие исчезнувшему температурному полю, но с обратным знаком.

Результаты экспериментов представлены следующими зависимостями:

а) температурный режим полимеризации для составов  $1_{20}$ ,  $2_{20}$ ,  $1_{10}$ ,  $2_{10}$  и  $3_{20}$  (рис. 1);

б) диаграмма зависимости максимальной интенсивности сформировавшихся напряжений и времени релаксаций напряжений от состава материала (рис. 2).

Из рис. 1 и 2 следует, что наиболее ярко выраженную картину образования полос можно наблюдать на составе 2, где имеется большой температурно-временной интервал скорости охлаждения, а время релаксации относительно невелико.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mike Masanobu, Ohmura Gasuhiro, Awatani Lobu. Photoplasticity utilizing the Stress-optic law of polyester-Bull ISME, 1977, № 145. 2. Метод фотоупругости /Под общ. ред. Г.Л. Хесина-М., 1975, т. I.

УДК 621.791:541.65

Н.Н.Буткевич

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ НА РЕЛАКСАЦИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Задача определения температурных напряжений может решаться как упругая, если напряжения не превосходят предела пропорциональности. Определение температурных напряжений в различных случаях исходя из упругости дает верхний предел реально возможных напряжений, так как при определенных условиях наличие пластических деформаций и ползучести материала сводят к минимуму температурные напряжения.

Однако температурные напряжения, которые возникают на разных стадиях охлаждения, изменяются по сложному закону и в зависимости от скорости охлаждения могут достигать таких величин, при которых происходит разрушение материала.

Таким образом, с одной стороны, возникает опасность искажения формы детали, с другой — разрушение ее без предварительной деформации под действием температурных напряжений.

Для оценки остаточных напряжений, возникающих в реальных условиях, было проведено исследование влияния ползучести на релаксацию температурных напряжений. Исследования проводились на эпоксидном материале ЭД-20М, имеющем широкий интервал ползучести теплофизических и механических характеристик. В качестве модели был выбран простейший случай бесконечно длинного цилиндра. Задача решалась как осесимметричная.

Если при охлаждении такого цилиндрического блока скорость охлаждения воздушной среды в термостате постоянна и устанавливается регулярный тепловой режим II рода, то температура в нем рассчитывается согласно [1] по закону

$$T(r,t) = T_0 + \frac{R^2}{4a} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) V - Vt, \quad (1)$$

где  $T_0$  — температура, принятая за начальную;  $R$  — радиус блока;  $V$  — скорость охлаждения;  $a$  — коэффициент температуропроводности.

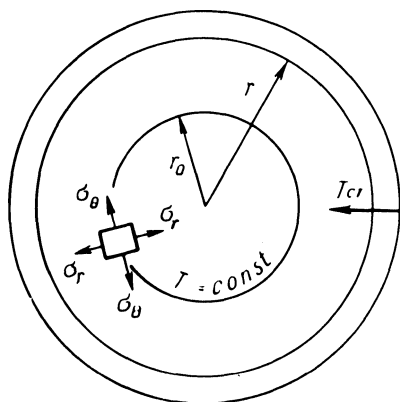


Рис. 1. Фронт продвижения стеклообразного состояния материала.

Вначале блок находится в высокоэластичном состоянии. При охлаждении блока на наружной поверхности его появляется область стеклообразного состояния, которая распространяется к центру: при  $r_0 < r < R$  и  $0 < r < r_0$  материал имеет линейно упругие свойства и изотерма перехода от высокоэластичного к

стеклообразному состоянию определяется уравнением  $T(r, t) = T_{\text{ст}}$ , где  $T_{\text{ст}}$  — температура стеклования. (Фронт продвижения  $T_{\text{ст}}$  показан на рис. 1). При этом

$$E, \mu, \alpha \begin{cases} E_{\infty}, \mu_{\infty}, \alpha_{\infty} & 0 < r < r_0; \\ E_{\text{ст}}, \mu_{\text{ст}}, \alpha_{\text{ст}} & r_0 < r < R. \end{cases}$$

Здесь  $E_{\infty}, \mu_{\infty}, \alpha_{\infty}$  и  $E_{\text{ст}}, \mu_{\text{ст}}, \alpha_{\text{ст}}$  — модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент расширения соответственно в высокоэластичном и стеклообразном состояниях.

В этих предположениях задача решена [2] и остаточные напряжения в охлажденном блоке определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E_{\text{ст}} \alpha_{\text{ст}} (1 - \rho^2)}{16(1 - \mu_{\text{ст}}) \alpha} \cdot R^2 V; \\ \sigma_{\theta} &= - \frac{E_{\text{ст}} \alpha_{\text{ст}} (3\rho^2 - 1)}{16(1 - \mu_{\text{ст}}) \alpha} \cdot R^2 V; \\ \sigma_z &= - \frac{E_{\text{ст}} \alpha_{\text{ст}} (2\rho^2 - 1)}{8(1 - \mu_{\text{ст}}) \alpha} \cdot R^2 V, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_r, \sigma_{\theta}$  и  $\sigma_z$  — радиальные, тангенциальные и осевые напряжения, которые в данной задаче являются главными,  $\rho = \frac{r}{R}$ .

Так как эти напряжения рассчитывались из условия упругого состояния материала, то они являются максимально возможными.

Для сравнения с реальной картиной напряженного состояния был проделан эксперимент по охлаждению длинного цилиндрического блока высотой 150 мм и диаметром 50 мм по режиму (1) с разными скоростями охлаждения (60 г/ч, 30 г/ч, 15 г/ч) (материал блока ЭД-20М).

Охлаждение проводилось с температур высокоэластичного состояния (120°C). При охлаждении до комнатной температуры (20°C) материал ЭД-20М проходит зону ползучести оптико-механических характеристик (80–50°C), в которой происходит "замораживание" (фиксация) температурных напряжений. После охлаждения из блока вырезались темплеты по среднему сечению, перпендикулярному к оси симметрии, которые просвечивались в поляризованном свете.

При этом "незамороженные" деформации снимались и картина полос, видимая в поляризованном свете, соответствовала "замороженной" части деформации, дающей информацию об остаточных

напряжениях, прорелаксированных в зоне ползучести. Зная температурное поле в любой момент времени по зависимости (1), можно было определить соответствующую цену полосы и рассчитать разность главных напряжений  $\sigma_{\theta} - \sigma_r$  в плоскости сечения. На рис. 2 приведено распределение расчетных и экспериментальных значений  $\sigma_{\theta} - \sigma_r$  по радиусу сечения для вышеприведенных скоростей охлаждения. Теоретические значения  $\sigma_{\theta} - \sigma_r$  рассчитывались по формулам (2)

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = - \frac{E_{ст} \alpha_{ст} (2\rho^2 - 1)}{8(1 - \mu_{ст})\alpha} \cdot R^2 V.$$

При всех трех скоростях охлаждения экспериментальные кривые отличаются от теоретических на разные величины. При средних (оптимальных) скоростях охлаждения (рис. 2,б) это расхождение максимально, так как время пребывания материала в зоне ползучести достаточно для значительной релаксации температурных напряжений. При высоких скоростях охлаждения процесс вязкого течения значительно подавляется и напряжения релакси-

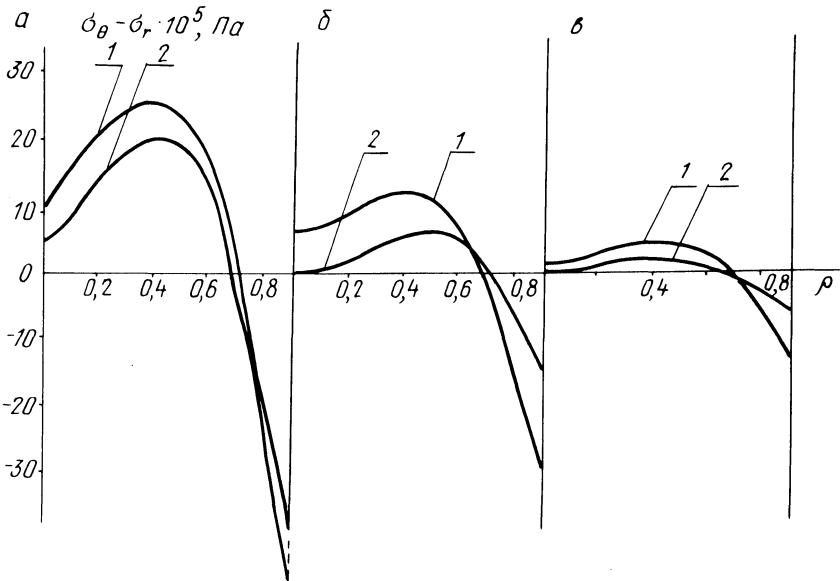


Рис. 2. Распределение максимальных значений остаточных напряжений по радиальному сечению цилиндра:

1, 2 — соответственно теоретическое и экспериментальное.

руют меньше (рис. 2,а). При очень малых скоростях охлаждения напряжения сами по себе незначительны и доля, приходящаяся на релаксацию, уменьшается. Существует оптимальная скорость охлаждения, при которой достигается максимальная релаксация температурных напряжений. Эта скорость зависит от свойств материала.

Сравнивая результаты данных исследований с результатами работы [3], можно сказать, что характер распределения температурных напряжений в материале ЭД-20М при фронтальном переходе зоны высокоэластичного состояния в зону стеклообразного состояния сходен с характером распределения напряжений в цилиндрической отливке из металла при ее затвердевании. Это дает широкие возможности для постановки задач о моделировании процесса изготовления металлических деталей.

На примере охлаждения цилиндрического блока (материал ЭД-20М) показана возможность управления процессом релаксации температурных напряжений в зависимости от скорости охлаждения (нагрева).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Метод фотоупругости. Под общ. ред. Г.Л. Х е с и н а. — М., 1975. т. 1.
2. Т и м о ш е н к о С.П. Теория упругости. — М., 1955.
3. Л е в и н М.А. Определение напряжений в затвердевающей отливке: Прикладная механика, т. V, вып. 9. Киев, 1969.

УДК. 534.29

**М.Д.Мартыненко, Н.А.Долбин,  
И.Г.Довгялло, Р.М.Кончиц**

#### **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СОБСТВЕННУЮ ЧАСТОТУ ПРОДОЛЬНО КОЛЕБЛЮЩИХСЯ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ СТЕРЖНЕЙ**

Расчет многоступенчатых стержней на высокочастотную вибрацию представляет сложную в математическом отношении задачу, поэтому он выполняется на основе ряда упрощений [1–3]. Наиболее часто предполагают, что в каждый момент времени поперечные сечения стержня остаются плоскими и напряжения по ним распределяются равномерно. Тогда при отсутствии вынуждающей силы определение продольного перемещения  $u(x, t)$  точек этого сечения сводится к интегрированию следующего уравнения: