С.А.Лихачев, И.П.Молосаев, А.А.Андрушевич, Б.С.Кухарев,
Е.И.Бельский, В.А.Бондарев, Г.В.Стасевич

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ УСТАЛОСТЬ

К кузнечным штампам предъявляются высокие эксплуатационные требования. Поэтому повышение сопротивления штамповых сталей термической усталости является актуальной задачей, связанной с интенсификацией кузнечно-штамповочного производства.

Известные методы испытания на термическую усталость позволяют получать либо качественную картину поведения материала без количественной оценки напряженного состояния, либо измерять деформацию в условиях одноосного напряженного состояния, создание которого связано со значительными техническими трудностями.

В этой связи целесообразна и актуальна разработка методов, связанных с испытанием образцов, форма и размеры которых позволили бы применить инженерные методы для расчета температурно-напряженного состояния. Таким условиям отвечает образец кольцевой формы. При расчетах термических напряжений используется метод расчленения тела /I/, который дает возможность учесть влияние температуры на модуль Юнга и коэффициент линейного расширения. Более точно задачу можно решить используя уравнения теории упругости /3/, в этом случае вышеуказанные коэффициенты берутся усредненными.

При термоциклировании желательно создать в образце симметричное температурное поле $T(r,\tau)$. В нашем случае это достигается путем погружения набранного из кольцевых образцов цилиндра в нагревающую (охлаждающую) среду. При нагреве в свинцовой ванне, отвечающей граничным условиям третьего рода, распределение температуры в каждом отдельном кольце может быть представлено как и для полуограниченного тела. Решение этой задачи имеет вид /2/:

$$\frac{t(x,\tau)-t_0}{t_c-t_0}=erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)-e^{hx+h^2a\tau}\cdot erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}+h\sqrt{a\tau}\right), \quad (I)$$

где t_c – температура окружающей среды, ^oC;

t_0 - начальная температура тела, ^oC;
x - характерный размер образца, м;
τ - время нагрева, сек;
α - коэффициент теплоотдачи, вт/м^{2}град;
λ - коэффициент теплопроводности, в/м·град
a - коэффициент температуропроводности, м^2/сек;
$h = \frac{\alpha}{\lambda}$ - относительный коэффициент теплоотдачи, м$^{-1}$.

Условия охлаждения образца удовлетворяют граничным условиям первого рода с распределением температуры по сечению в начальный момент времени, заданной функцией $t(x,0) = f(x)$.

Изменение температурного поля, найденного по уравнению (I) в конечный момент нагрева - начальный момент охлаждения, может быть с небольшой погрешностью задано показательной функцией вида

$$f(x) = (t_n - t_0)e^{-kx} + t_0 , \tag{2}$$

где t_n - температура поверхности тела в конечный момент нагрева, ^oC;
t_0 - начальная температура тела при нагреве, ^oC;
k - постоянная, м$^{-1}$.

Постоянная k выбирается по значениям температурного поля полуограниченного тела в конечный момент нагрева.

Подставляя выражение (2) в дифференциальное уравнение теплопроводности, при неравномерном распределении температуры по его сечению и решая его, получим уравнение температурного поля при охлаждении

$$t_{(x,\tau)} - t_0 = (t_n - t_0)e^{-kx + a\tau k^2} \cdot \left[erf\left(k\sqrt{a\tau} + \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \right. \tag{3}$$
$$\left. - erf\left(k\sqrt{a\tau}\right)\right].$$

При расчете температурного поля охлаждаемого образца произвольной формы в выражение /3/ вводится коэффициент m , равный отношению относительных температур тела заданной формы и полуограниченного тела в зависимости от значений числа Фурье и безразмерной координаты $\frac{X}{R}$.

В таблице I приводятся расчетные и экспериментальные данные значений температур по сечению кольцевого образца при следующих условиях испытаний: температура свинцовой ванны $t_в$ = 700-720°С, время нагрева $\tau_{нагр.}$ = I2 сек, температура охлаждающей среды t_c = 80°С.

Таблица I

Текущая координата, X, м	Нагрев $\tau_{нагр.}$ = 4 сек.		Охлаждение $\tau_{охл.}$ = 2 сек.	
	$T_{расч.}$, °С	$T_{экcп.}$, °С	$T_{расч.}$, °С	$T_{экcп.}$, °С
0	445	I80	80	I20
0,002	360	380	I80	230
0,004	276	295	280	300
0,006	204	200	395	450

Изменяя условия испытаний образца (скорость нагрева, охлаждения и т.д.), можно моделировать тепловой режим работы кузнечного штампа.

В нашем случае $d_{нар.}$ = 0,02 м, h = 0,03 м. Согласно /3/ при выполнении условия $h \leq 0{,}2 d_{нар.}$ $\sigma_z = 0$, а $\sigma_\theta \gg \sigma_r$. Распределение тангенциальных напряжений по радиусу образца с учетом $E(t°)$ и $\alpha(t°)$ определяем по формуле /I/:

$$\sigma_\theta = \left[-t_i \alpha_i + \frac{R_\delta}{R_0}\right] E_i ,$$

где

$$R_\delta = \sum T_i \alpha_i E_i \Delta_i$$

$$R_0 = \sum E_i \Delta_i ,$$

$T_i, \alpha_i, E_i, \Delta_i$ – соответственно температура, коэффициент линейного расширения, модуль упругости и толщина i-го слоя.

В табл.2 приведены значения тангенциальных напряжений, подсчитанных по известному температурному полю опытного образца, для второй секунды - при охлаждении и четвертой - при нагреве.

Таблица 2

Расстояние от поверхности образца, X , м	Нагрев для 4-ой секунды	Охлаждение для 2-ой секунды
	σ_θ , кг/мм^2	σ_θ , кг/мм^2
0	- 37,0	+ 33,5
0,002	- 26,0	+ 20,0
0,004	- I,0	+ 3,I
0 006	+ 23,0	- I5,0

Изменяя условия нагрева-охлаждения образцов, можно установить зависимость между напряжениями и сопротивлением термической усталости.

ВЫВОДЫ

I. Расчетные температурные поля, полученные по проведенной методике, находятся в хорошем соответствии с определенными экспериментально значениями.

2. Предлагаемая методика позволяет установить количественную связь между температурными напряжениями и термической стойкостью материала.

Литература

I. Абрамов В. В. Остаточные напряжения и деформации, М., Машгиз, 1963.

2. Лыков А. В. Теория теплопроводности, "Высшая школа", 1967.

3. Кац А. Л. Теория упругости, М., Гостехиздат, 1956.