

**ТЕПЛОВЫЕ ДИЛАТАЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЯ**

Часовников Н.В.

Научные руководители: Любимова Л.Л., к.т.н., доцент; Ташлыков А.А., к.т.н., доцент
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: Nikolay-chasownikow@mail.ru

**THERMAL DILATATION CRYSTAL LATTICE STRUCTURAL MATERIALS
FOR POWER ENGINEERING**

Chasovnikov N.V.

Supervisors: Lubimova L.L., Ph.D., associate professor; Tashlykov A.A., Ph.D., associate professor
Tomsk Polytechnic University, 634050, Lenina Avenue, 30, Tomsk, Russia

E-mail: Nikolay-chasownikow@mail.ru

Среди многообразия факторов, определяющих работоспособность и ресурс конструкционных материалов в составе паровых котлов и ядерных энергетических установок, особый интерес представляют температурные деформации (Δt), определяемые коэффициентом линейных расширений α и приводящие к объемным изменениям материалов. Наибольшую опасность вызывают явления радиационного распухания, а также неоднородные остаточные напряжения σ от неравномерной деформации различных участков труб паровых котлов и твэлов [1]. Между долговечностью элементов конструкций трубно-оболочечного типа при повышенных температурах в условиях ползучести и параметрами структуры существует определенная связь: $\tau = \varphi(t, \sigma, d)$, где время до разрушения τ (долговечность) определяется температурой t , размером зерна d и уровнем напряжения σ [2].

Остаточные напряжения I рода σ_1 , способные вызвать разрушение конструкций, определяются методом рентгенографии по дилатациям кристаллической решетки $\Delta a/a$: $\sigma_1 = (\Delta a/a)E$, E – модуль нормальной упругости [3, 4].

Значение коэффициентов линейных термических расширений, полученные с применением методов макродилатометрии по удлинению нагретого стержня $\Delta L/L$ или изменению объема образца $\Delta V/V$, приводятся в справочной литературе.

Однако, наблюдается ограниченность информации о тепловых расширениях кристаллических решеток сталей и сплавов, которые устанавливаются как правило, экспериментально.

В этой связи *целью работы* является экспериментальное определение температурно-временных зависимостей $\alpha \sim f(t)$ для элементарных кристаллических решеток методом рентгеновской микродилатометрии.

Для количественной характеристики теплового расширения кристаллических решеток « a » введено понятие коэффициента теплового расширения α [5]:

$$\alpha = \frac{1}{\alpha_{cp}} \left(\frac{a_2 - a_1}{t_2 - t_1} \right),$$

где a_1 и a_2 – параметр элементарной ячейки, измеряемый соответственно при температурах t_1 и t_2 ; $\alpha_{cp} = (a_1 + a_2) / 2$.

Тепловые расширения кристаллических решеток устанавливались по методике термоциклирования образца в вакууме в течение двух термоциклов. Параметр элементарной ячейки рассчитывался по методу наименьших квадратов решением системы нормальных уравнений, имеющих для кубических кристаллов следующий вид [6]:

$$\begin{cases} A \sum_i \alpha_i^2 + D \sum_i \alpha_i \delta_i = \sum_i \alpha_i \sin^2 \theta_i, \\ A \sum_i \alpha_i \delta_i + D \sum_i \delta_i^2 = \sum_i \delta_i \sin^2 \theta_i, \end{cases}$$

где A и D – постоянные, причем $A = \lambda^2 / (4a^2)$, $\alpha_i = H_i^2 + K_i^2 + L_i^2$; $\Sigma \alpha_i$ – сумма сумм квадратов индексов всех анализируемых линий; $\delta_i = 10 \sin 2\theta_i$.

Результаты выполненных исследований для стали 10, используемой в котлостроении для изготовления экранов в топочной камере котлоагрегата и трубопроводов котлов высокого давления для длительной работы при температурах, не превышающих 350 °С, представлены на рис. 1. Абсолютная погрешность определения α не превышала: $\Delta\alpha = (0,2 \dots 2,0) \cdot 10^{-6}$ 1/град.

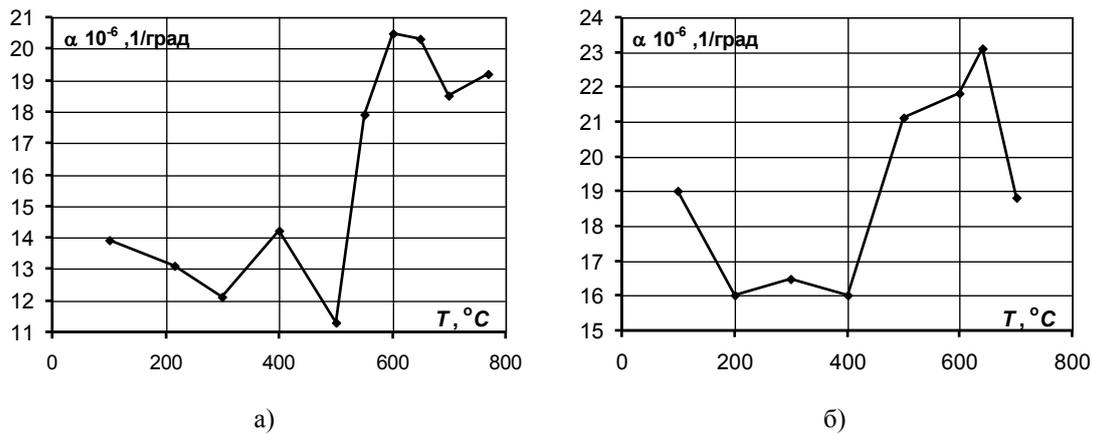


Рис. 1. Тепловые расширения кристаллических решеток стали 10: а) первый; б) второй термоцикл

Из рис. 1 следует, что, несмотря на соответствие α макродилатометрическим значениям, для кристаллических решеток существуют отличия в ходе кривых, заключающиеся в аномальном отклонении $\alpha \sim f(t)$ от прямолинейной зависимости или кривой второго порядка, характерных для макродилатометрии. Эти отклонения наблюдаются при температурах: в первом термоцикле при 440, 550, 600 °С; во втором термоцикле – в диапазоне температур 500... 600 °С. Следует отметить, что к основным явлениям, снижающим работоспособность конструкционных материалов ядерных энергетических установок относят высокотемпературное охрупчивание, которое, например, для аустенитных нержавеющей сталей наблюдается при температуре порядка 600...650 °С. Температура максимального распухания оболочек твэлов достигается при 600...625 °С. В диапазоне температур 380...400 °С наблюдается низкотемпературное охрупчивание как нержавеющей сталей, так и сталей ферритномартенситного класса и сплавов. В диапазоне этих же температур отмечаются явления аномального изменения механических свойств – твердости, прочности, пластичности, охрупчивания сталей. Справедливо предположить, что аномальные изменения механических свойств, наблюдаемых в практике эксплуатации и исследований свойств реакторных материалов, и аномалии термических деформаций кристаллических решеток (рис.1) объединены общими температурными точками, а данные о термических деформациях кристаллических решеток могут быть положены в основу мероприятий по стабилизации свойств и повышению эксплуатационной надежности поверхностей нагрева [7, 8]. Термические расширения кристаллических решеток в первом термоцикле вплоть до температуры 500 °С составляют порядка $(12 \dots 14) \cdot 10^{-6}$ 1/град. По результатам второго термоцикла коэффициент α для кристаллических решеток увеличился и находится в диапазоне значений $(19 \dots 16) \cdot 10^{-6}$ 1/град. Известно,

что коэффициент теплового расширения обратно пропорционален модулю упругости и, очевидно, увеличение α свидетельствует об изменении прочностных свойств стали в результате ослабления сил межатомных связей.

Заключение

Таким образом, в процессе исследований выявлены температурно-временные закономерности изменения α для стали 10 и обнаружены эффекты аномальных деформаций кристаллических решеток при определенных температурах, совпадающих с температурами аномальных изменений механических свойств материалов теплоэнергетического оборудования. Важность обнаруженного явления очевидна и состоит в том, что в определенном, узком интервале температур (как правило, служебных или близких к ним) скачкообразно изменяется коэффициент линейного расширения кристаллических решеток, который, как и модуль упругости, определяет сопротивление атомов смещению, но уже под действием температур. При этом, находясь в твердом состоянии, вещество изменяет не только модуль упругости, но и плотность, микротвердость, теплоемкость, пластичность. Растет пористость, увеличивается газопроницаемость, что имеет существенное значение для ресурса используемого материала.

В этой связи, выбор оптимальной температуры эксплуатации, при которой отсутствуют «скачки» термических деформаций кристаллических решеток, снизит риски термической усталости и повысит работоспособность поверхности нагрева. Такая температура с учетом реальных градиентов составляет не более 350 °С (рис. 1), что подтверждено практикой эксплуатации стали 10.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-99544а в 2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рентгенометрия аномальных температурных расширений энергетических сталей / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин, Б.В. Лебедев, А.А. Ташлыков // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – Вып. 2. – С. 82 – 88.
2. Мельников Г.П. Долговечность элементов конструкций в условиях высоких температур при стендовых испытаниях. – М.: Атомиздат, 1979. – 80 с.
3. Методика рентгенометрического анализа внутрискруктурных напряжений / Л.Л. Любимова // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – Вып. 4. – С. 72–77.
4. Закономерности изменений параметра элементарной ячейки металла паропроводов как критерий накопления повреждаемости / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.А. Ташлыков, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 35–39.
5. Руководство по рентгеновскому исследованию минералов / Под ред. В.А. Франк-Каменецкого. – Л.: Недра, 1975. – 399 с.
6. Русаков А. А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.
7. Аномальные эффекты термических деформаций кристаллических решеток котельных сталей как критерий оценки работоспособности и увеличения эксплуатационного ресурса / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко // Известия вузов: Черная металлургия. – № 2. – 2014. – С. 52–57.
8. Assessing the Life of Boiler on the Basis of Anomalous Thermal Deformation of Its Crustal Lattice/ L.L. Lyubimova, A.A. Makeev, A.A. Tashlykov, A.S. Zavorin, R.N. Fisenko // Steel in Translation. – Vol. 44 – No. 2. – 2014. – pp. 117–122.