

**М.Ф.Евсюков, А.А.Бровко**

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ**

Целью исследования являлось комплексное изучение изменения значений коэффициента линейного расширения (ТКЛР) при нагреве и при охлаждении в высокопрочных чугунах и белых износостойких чугунах в интервале температур  $20^0 \dots 1000^0\text{C}$ , оценка влияния структурных составляющих на значения коэффициента линейного расширения в процессе охлаждения реальных изделий. Впервые приведены систематические данные по средним и истинным значениям ТКЛР ( $\alpha$ ) как при нагреве, так и при охлаждении в интервале температур от  $20^0\text{C}$  до  $1000^0\text{C}$ .

**тепловой коэффициент линейного расширения, высокопрочный чугун, белый износостойкий чугун, температура, нагрев, охлаждение**

**Современное состояние вопроса.** Для инженерных расчетов применяются как средние, так и истинные значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) в процессе нагрева. В частности, для подсчета напряжений, возникающих в металле при изменении его температуры, необходимо использовать истинные коэффициенты расширения, а для подсчета изменения размеров изделия вследствие термического расширения удобно использовать средние значения  $\alpha$ . [1]. Коэффициент линейного расширения зависит от исходной структуры, характера легирования и термической обработки, а также от пластической деформации в холодном состоянии. В отсутствии структурных превращений в сталях и чугунах с перлитной структурой  $\alpha$  с повышением температуры монотонно расширяется в процессе нагрева до критической температуры  $A_{c1}$  [2]. Если же в процессе нагрева сплава происходят структурные изменения (фазовые превращения, процессы отпуска и рекристаллизации), то монотонное расширение нарушается [3].

Коэффициент линейного расширения сплава зависит не только от сплава на основе которого он изготовлен, но и от легирующих элементов, входящих в состав сплава. Изменение ТКЛР сплава под воздействием термической обработки зависит в большей степени от его состава. Так, например, с увеличением содержания углерода в стали интенсивность влияния термической обработки на ТКЛР значительно возрастает за счет образования мартенситных структур. [4]. Начиная с содержания 0,3%С в стали это изменение становится заметным, а в стали У8 с перлитной структурой в зависимости от термической обработки при высоких температурах  $\alpha$  может изменяться в 2 раза. Влияние же термической обработки на изменение  $\alpha$  перлитных и мартенситных сталей становится заметным даже при содержании углерода меньшем, чем 0,2%. Сплавы, принадлежащие к одному и тому же классу и находящиеся примерно в одинаковом структурном состоянии, несмотря на значительные различия в их составе,

имеют  $\alpha$ , достаточно близкие по значению. Коэффициенты линейного расширения большого количества конструкционных сталей в малой степени зависят от различных режимов термической обработки, применяемых на практике. Так, значения  $\alpha$  углеродистых сталей после отжига и нормализации практически одинаковые. На основании этого результаты обобщены в математические зависимости  $\alpha$  от температуры для отдельных классов сплавов, которые достаточно точны для проведения инженерных расчетов для сталей в интервале температур  $20^0 - 700^0\text{C}$ .

**Целью исследования** являлось комплексное изучение изменения значений коэффициента линейного расширения при нагреве и при охлаждении в высокопрочных чугунах и белых износостойких чугунах в интервале температур  $20^0 \dots 1000^0\text{C}$ , оценка влияния структурных составляющих на значения коэффициента линейного расширения в процессе охлаждения реальных изделий.

**Постановка задачи.** Наибольший интерес для исследования представляют чугуны, содержащие структурно свободный первичный цементит или графит, резко отличающиеся по значениям  $\alpha$  от основы сплава как при комнатной, так и при повышенных температурах. Так, графит в зависимости от кристаллографического направления имеет  $\alpha$  в пределах  $0,8 \dots 8,0 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ , а цементит в интервале температур  $20^0 - 100^0\text{C}$  равен  $6,0 \dots 8,5 \cdot 10^{-6}/\text{град}$  [5]. Истинный  $\alpha$  для аустенита равен  $17 \dots 24 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ , для феррита –  $12 \dots 12,5 \cdot 10^{-6}/\text{град}$  и для перлита –  $10 \dots 11 \cdot 10^{-6}/\text{град}$  [6]. Однако, какие либо систематические сведения о значениях истинного коэффициента линейного расширения, определяемые в процессе охлаждения, в литературе практически отсутствуют [1,7,8].

В связи с этим выполнена работа по комплексному изучению коэффициента линейного расширения как при нагреве, так и при охлаждении в высокопрочных чугунах и белых износостойких чугунах в интервале температур  $20^0 \dots 1000^0\text{C}$  с оценкой влияния структурных составляющих на значения среднего и, особенно, истинного коэффициента линейного расширения в процессе охлаждения, реализуемого в процессе охлаждения реальных изделий.

**Материал и методика исследования.** Исследования проводили на широко распространенных материалах, таких как высокопрочный серый чугун и белый износостойкий хромистый чугун. Высокопрочный чугун имеет следующий состав: 3,18%С, 2,18%Si, 0,33%Mn, 0,13%P, 0,02%S, 0,18%Cr, 0,68%Ni, и 0,24%Cu. Белый чугун имеет следующий химический состав: 2,72%С, 0,98%Si, 0,9%Mn, 0,05%P, 0,02%S, 16,4%Cr, 1,33%Ni, 1,21%Mo, 0,33%V, 0,35%W, 0,32%Cu.

При определении коэффициента линейного расширения исследуемые образцы  $3,5 \times 3,5 \times 30$  мм нагревались в dilatометре МД-83 со средней скоростью  $300^0\text{C}/\text{час}$  в интервале температур от  $20^0$  до  $1000^0\text{C}$ . При определении  $\alpha$  в процессе охлаждения образцы предварительно нагревались до  $1000^0\text{C}$ , выдерживались в течение 10 мин, после этого охлаждались по

программе со средней скоростью  $500^{\circ}\text{C}/\text{час}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ . В процессе нагрева и охлаждения расширение регистрировалось на двухкоординатном потенциометре ПДП4–02. По дилатограммам определили  $\alpha$  как среднее значение в температурном интервале  $20^{\circ} \dots t^{\circ}\text{C}$ , а истинные значения  $\alpha$  определяли в температурном интервале  $100^{\circ}\text{C}$  как при нагреве, так и при охлаждении. Строение продуктов распада изучали на микроскопе НЕОФОТ–2 микроструктурным методом на дилатометрических образцах, протравленных в 4% нитале.

**Результаты исследования.** Приведены средние и истинные коэффициенты линейного расширения высокопрочного (табл.1) и хромистого (табл.2) чугуна при нагреве и охлаждении в интервале температур от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $1000^{\circ}\text{C}$  ( $\alpha \cdot 10^{-6}$  1/град).

Таблица.1. Средние и истинные коэффициенты линейного расширения высокопрочного чугуна при нагреве и охлаждении.

Нагрев ( $^{\circ}\text{C}$ ) – среднее, $\alpha$	Нагрев ( $^{\circ}\text{C}$ ) – истинное, $\alpha$	Охлаждение ( $^{\circ}\text{C}$ ) – истинное, $\alpha$
50 – 100 – 10,3	50 – 100 – 10,3	1000 – 900 – –22,0
50 – 200 – 10,8	100 – 200 – 10,6	900 – 800 – –22,0
50 – 300 – 11,0	200 – 300 – 11,2	800 – 750 – –22,0
50 – 400 – 11,4	300 – 400 – 11,7	750 – 720 – –3,5
50 – 500 – 11,8	400 – 500 – 12,1	700 – 600 – –12,6
50 – 600 – 12,1	500 – 600 – 12,5	600 – 500 – –12,4
50 – 700 – 12,2	600 – 700 – 12,4	500 – 400 – –12,1
50 – 800 – 12,4	700 – 800 – 12,3	400 – 300 – –11,8
50 – 900 – 12,1	815 – 835 – 2,1	300 – 200 – –11,4
50 – 1000 – 13,5	835 – 850 – 3,1	
	850 – 900 – 22,0	
	900 – 1000 – 22,2	

Таблица 2. Средние и истинные коэффициенты линейного расширения хромистого чугуна при нагреве и охлаждении.

Нагрев ( $^{\circ}\text{C}$ ) – среднее, $\alpha$	Нагрев ( $^{\circ}\text{C}$ ) – истинное, $\alpha$	Охлаждение ( $^{\circ}\text{C}$ ) – истинное, $\alpha$
50 – 100 – 10,0	50 – 100 – 10,0	1000 – 900 – –21,5
50 – 200 – 11,1	100 – 200 – 11,1	900 – 800 – –18,2
50 – 300 – 11,3	200 – 300 – 11,6	800 – 700 – –16,3
50 – 400 – 11,8	300 – 400 – 13,2	700 – 600 – –15,3
50 – 500 – 12,1	400 – 500 – 13,6	600 – 500 – –14,7
50 – 600 – 12,2	500 – 600 – 12,5	500 – 400 – –14,2
50 – 700 – 12,8	600 – 700 – 17,2	400 – 300 – – 14,0
50 – 800 – 12,1	700 – 770 – 10,9	300 – 250 – –13,6
50 – 900 – 11,1	770 – 805 – 3,7	200 – 100 – +3,7
50 – 1000 – 12,0	805 – 865 – – 2,2	100 – 50 – +5,3
	865 – 1000 – 21,9	

**Обсуждение результатов исследования.** Средний температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) высокопрочного чугуна, состоящего из перлита и феррита вокруг графита (рис.1,а) в интервале температур  $20 \dots 100^{\circ}\text{C}$  составляет  $10,4 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ , в интервале температур  $20^{\circ} \dots A_{c1}$  равен  $12,2 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ , а в интервале температур  $50 \dots 1000^{\circ}\text{C}$  он равен  $13,5 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . Истинный ТКЛР при нагреве в интервале температур  $50 \dots 100^{\circ}\text{C}$  равен  $10,3 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . С повышением температуры нагрева ТКЛР увеличивается и в интервале температур  $700 \dots A_{c1}$  он составляет  $12,3 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . В межкритическом интервале  $A_{c1} \dots A_{c3}$  ТКЛР резко снижается и составляет всего  $2,1 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . Истинный ТКЛР аустенита выше  $850^{\circ}\text{C}$  и до температуры  $1000^{\circ}\text{C}$  изменяется мало и в интервале температур  $900^{\circ} \dots 1000^{\circ}\text{C}$  равен  $22 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ .

Истинный ТКЛР при охлаждении имеет отрицательные значения, но по абсолютной величине практически совпадает с ТКЛР высокопрочного чугуна при нагреве. Так, при охлаждении ТКЛР чугуна в интервале температур  $1000^{\circ} \dots A_{r3}$  составляет  $-22,0 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . В межкритическом интервале температур  $A_{r3} \dots A_{r1}$  он минимальный и составляет всего  $-3,1 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . ТКЛР продуктов распада аустенита в интервале температур  $A_{r1} \dots 600^{\circ}\text{C}$  составляет  $-13,0 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . С понижением температуры ТКЛР снижается и в интервале температур  $300^{\circ} \dots 200^{\circ}\text{C}$  он составляет  $-11,2 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ .

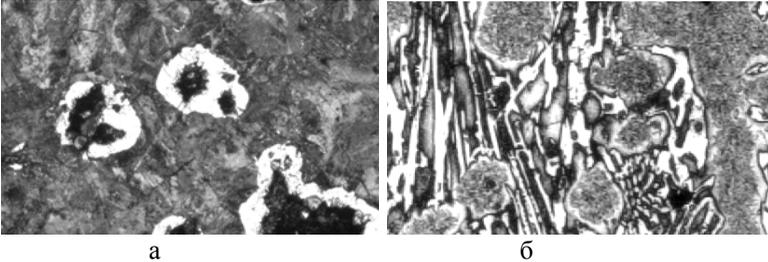


Рис.1. Микроструктура высокопрочного ( а ) и белого хромистого ( б ) чугуна в исходном состоянии,  $\times 200$ .

Средний температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) высокохромистого чугуна, состоящего из эвтектического цементита, мартенсита и остаточного аустенита ( рис. 1, б ), в интервале температур  $50^{\circ} \dots 100^{\circ}\text{C}$  составляет  $10 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . В интервале температур  $50^{\circ} \dots 900^{\circ}\text{C}$  за счет фазового превращения исходной структуры в аустенит понижается до  $11,1 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . При нагреве до максимальной температуры  $1000^{\circ}\text{C}$  он повышается за счет увеличения доли аустенита и равен  $12,0 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . Истинный коэффициент линейного расширения этого чугуна при нагреве в интервале температур  $50^{\circ} \dots 100^{\circ}\text{C}$  равен  $10 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . С повышением температуры нагрева до  $500^{\circ}\text{C}$  он увеличивается до  $13,6 \cdot 10^{-6}/\text{град}$ . В интервале температур  $500^{\circ} \dots 600^{\circ}\text{C}$  за счет процессов отпуска мартенситной

структуры он понижается до  $12,5 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . Распад остаточного аустенита на феррито – карбидную смесь в интервале температур  $600^{\circ} - 700^{\circ}\text{C}$  приводит к повышению ТКЛР до  $17,2 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . При дальнейшем нагреве до  $A_{c1}$  ( $770^{\circ}\text{C}$ ) за счет уменьшения скорости распада остаточного аустенита ТКЛР понижается до  $10,9 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . В интервале температур  $A_{c1} \dots 805^{\circ}\text{C}$  за счет фазового превращения исходной структуры в аустенит ТКЛР резко падает и равен  $3,7 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . За счет увеличения скорости превращения на аустенит в интервале температур  $805^{\circ} \dots A_{c3}$  температурный коэффициент линейного расширения принимает отрицательное значение и равен  $-2,2 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . Аустенитная структура при температурах выше  $A_{c3}$  в интервале  $865^{\circ} \dots 1000^{\circ}\text{C}$  имеет ТКЛР, равный  $21,9 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ .

Истинный коэффициент линейного расширения этого чугуна в процессе охлаждения имеет отрицательные значения и понижается вплоть до температуры начала мартенситного превращения, равной  $250^{\circ}\text{C}$ . Так, в интервале температур  $1000 - 900^{\circ}\text{C}$  он равен  $-21,5 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . При дальнейшем охлаждении он понижается и в интервале температур  $300^{\circ} - 250^{\circ}\text{C}$  он составляет всего  $-13,6 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . Распад переохлажденного аустенита на мартенсит в интервале температур  $200^{\circ} - 100^{\circ}\text{C}$  приводит к расширению образца и ТКЛР в этом случае составляет  $+3,7 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . Дальнейшее увеличение скорости распада аустенита на мартенсит приводит к дальнейшему увеличению ТКЛР чугуна до  $+5,3 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ .

**Выводы.** На основании полученных результатов показана тесная взаимосвязь между структурным составом и истинным коэффициентом линейного расширения, реализующегося в исследованных чугунах как в процессе нагрева, так и в процессе охлаждения. Установлено, что в высокопрочном сером чугуне с перлитной структурой истинный ТКЛР монотонно повышается в процессе нагрева до  $A_{c1}$  и составляет  $12,3 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ . В том случае, когда в процессе нагрева происходит процесс отпуска мартенситной структуры или превращение остаточного аустенита, как например в хромистом чугуне, монотонный характер изменения ТКЛР с повышением температуры нарушается. В межкритическом интервале температур  $A_{c1} - A_{c3}$ , независимо от характера легирования, ТКЛР сплавов снижается до нуля, при охлаждении наоборот повышается до нуля. Истинный ТКЛР аустенита в исследованных чугунах как при нагреве, так и при охлаждении имеют практически одинаковые значения. При этом ТКЛР при охлаждении имеет отрицательные значения. И только при мартенситном превращении ТКЛР всех сплавов приобретает положительные значения. Перлитно – ферритная структура как в процессе нагрева, так и в процессе охлаждения имеют практически одинаковые значения истинного ТКЛР, но с разным знаком.

Таким образом, наиболее объективные результаты при расчете напряжений в деталях и конструкциях могут быть получены только при использовании истинного коэффициента линейного расширения, опреде-

ленного в процессе охлаждения с учетом температурного интервала фазового превращения и тепловых свойств структурных составляющих сталей и чугунов. Полученные результаты имеют справочный характер и могут быть использованы для расчета напряжений в многослойных изделиях, состоящих из серого и белого высокопрочных чугунов.

1. *Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике.* Справочник. Под редакцией Б. Е. Неймарк. – М.–Л.: Энергия, 1967. –С.5–62.
2. *Михайлов–Михеев.* Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения. – М:Машгиз,1961. – 238с.
3. *Неймарк Б.Е.* Новые машины и приборы для испытания металлов. – М:Металлургиздат, 1963. – С.148.
4. *Laubitz M.I.* // Canad. J. Phys. – V.38. – 1960. – №6.
5. *Гудремон Э.* Специальные стали. – Т.1. – М: Metallurgizdat, 1966. – 736с.
6. *Справочник по машиностроительным материалам.* – Т.3. – М: Машгиз, 1959. – 430с.
7. *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов. – М: Физматгиз, 1959. – 248с.
8. *Чугун.* Справочное издание. – М: Метрология, 1991. –С.336 – 411с.

*Статья рекомендована к печати:  
ответственный редактор  
раздела «Металловедение и материаловедение»  
докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко,  
рецензент докт.техн.наук, проф. А.М.Нестеренко*

***М.Ф.Євсюков, А.О.Бровко***

**Вплив структурного стану на теплові властивості сталей і чавунів**

Метою дослідження було комплексне вивчення зміни значень теплового коефіцієнту лінійного розширення (ТКЛР) при нагріві та при охолодженні у високо-міцних чавунах і білих зносостійких чавунах в інтервалі температур 200...1000<sup>0</sup>С. Здійснено оцінку впливу структурних складових на значення коефіцієнта лінійного розширення в процесі охолодження реальних виробів. Вперше наведено систематизовані дані щодо середніх та істинних значень ТКЛР (*α*) як при нагріві, так і при охолодженні в інтервалі температур від 20<sup>0</sup>С до 1000<sup>0</sup>С.