

УДК 669.018+669.224+539.3

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПОСРЕДСТВОМ ТЦ-КАРТ И ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ

© 2014 Е.А. Тихомирова<sup>1</sup>, Е.Ф. Сидохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>«КБ Рентгеновские приборы», г. Санкт-Петербург

Предлагается использовать для анализа, в том числе при подготовке эксперимента и выборе режимов в исследованиях термической усталости материалов, ТЦ-карты, которые дают наглядное представление о развитии деформации в ходе термоциклических испытаний. На ТЦ- карте должны быть нанесены кривые температурной зависимости упругой деформации  $\varepsilon_{упр}=f(T)$ , соответствующей пределу упругости или пределу текучести исследуемого материала, и кривые изменения с температурой в ходе нагрева или охлаждения величины свободной термической деформации  $\varepsilon_0=\varphi(T)$ , которая вследствие стеснения полностью или частично преобразуется в упругопластическую деформацию  $\Delta\varepsilon=\varphi(T)$ , являющаяся суммой упругой  $\varepsilon_{упр}$  и пластической  $\varepsilon_{пл}$  деформации. В качестве примера приведены ТЦ-карты сплавов ЖС6Ф, ЖС32, ЖС36, ВКНА-1В и ЭИ867, используемых в производстве авиационных двигателей. Применение ТЦ-карт иллюстрируется на примере анализа опубликованных результатов испытаний сплавов ЖС6Ф и ВКНА-1В и наглядно показывает динамику развития деформации в опытах с полным стеснением и при испытаниях по методу варьирования жёсткости нагружения. ТЦ-карты дают информацию о величине пластической деформации в нулевом полуцикле, величину пластической деформации в цикле, температуру начала пластической деформации в цикле, а также помогают по-новому взглянуть на результаты проведённых ранее испытаний и сделать заключение о целесообразности корректировки режимов испытания и наметить пути исследования жаропрочных сплавов для оценки их термоусталостной долговечности.

*Термическая усталость, термоциклические испытания, пластическая деформация.*

Термическая усталость (ТУ) является важной проблемой современной техники, работающей в экстремальных условиях. Изделия из жаропрочных материалов подвергаются в процессе эксплуатации сложному температурно-силовому воздействию, которое часто является периодическим. Прогрессирующее разрушение в ходе повторного нагрева и охлаждения деталей называют термической усталостью. Это «неизотермическое малоцикловое разрушение, как считают, обусловлено стеснением температурной деформации различных участков материала или детали» [1]. Данное определение предполагает два возможных варианта развития разрушения. С одной стороны, разрушение является следствием процессов, происходящих во время изменения температуры при нагреве и охлаждении. С другой стороны, это результат процессов, которые развиваются при верхней температуре цикла, и связаны с температурной зависимостью свойств материала, с термиче-

скими напряжениями в крайних точках термического цикла и с внешним силовым воздействием.

Исследования термической усталости производят главным образом как процесс, развивающийся в ходе изменения температуры [2, 3]. Основой тому послужила установленная Коффиным [4] зависимость долговечности (число циклов до разрушения  $N$ ) от пластической деформации ( $\varepsilon_{пл}$ ) в цикле (вида  $\varepsilon_{пл}N^k=\text{const}$ ) и предложенная методика термоциклических испытаний.

Этот метод, равно как и его развитие - метод варьiruемой жёсткости нагружения [5], даёт информацию о сопротивлении термической усталости различных материалов, но не конкретных изделий, поскольку не учитывает роли формы изделий и условий их работы. Разрабатывая принципы моделирования термической усталости, С.В. Серенсен и П.И. Котов [5, 6], а также Г.Н. Третьяченко с соавторами [3] указывают, что основное требование к

образцам для испытаний - возможность воспроизведения в их рабочей части реальных условий нагружения материала. Однако на практике во всех исследованиях учитывают только максимальную температуру работы материала изделий в эксплуатации.

При термоциклических испытаниях (ТЦ) принято производить нагрев образца в его рабочей части пропусканием электрического тока с пилообразным циклом изменения температуры либо с выдержкой при верхней температуре цикла. Поскольку применяют достаточно высокие скорости изменения температуры в полуциклах нагрева ( $50 \dots 100^\circ\text{C}/\text{c}$ ) и охлаждения ( $10 \dots 40^\circ\text{C}/\text{c}$ ) [1,7], достигаемые скорости деформации составляют  $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{c}^{-1}$ , т.е. примерно такие же, как при механических испытаниях с задаваемой скоростью деформации, и в той же последовательности этапов упругой и пластической деформации [8-10]. При этом свой вклад на обоих этапах вносят температурная зависимость модуля упругости  $E(T)$  и предела текучести  $\sigma_{02}(T)$  (или  $\sigma_{005}(T)$ ), а также специфические особенности и различия упрочнения при верхних и нижних температурах цикла. Важно отметить существенное отличие условий протекания структурных изменений в ходе пластической деформации при нагреве, где большее значение имеет переход в разупорядоченное состояние и влияние активационных процессов. При этом в силу цикличности каждый раз при нагреве высокотемпературная деформация протекает в материале со структурой, сформировавшейся при холодной деформации, тогда как при охлаждении деформируется материал, подвергнутый в полуцикле нагрева термообработке при очень высокой температуре и под напряжениями. В связи с этим требует должного внимания протяжённость температурных диапазонов, в которых протекает пластическая деформация при нагреве и при охлаждении. Однако в опубликованных материалах термоциклических испытаний этот параметр даже не упоминается. При этом заметим,

что в ряде работ [1, 4, 8, 9] при объяснении природы термической усталости вспоминают эффект Баушингера, который говорит об изменении предела текучести материала  $\sigma_{02}(T)$  при смене знака деформации. В ходе циклических нагревов, с которыми связана ТУ, имеет место смена знака (сжатие при нагреве и растяжение при охлаждении). Однако при ТЦ испытаниях пластическая деформация сжатия и растяжения происходит в области разных температур, где в силу особенностей температурной зависимости  $\sigma_{02}(T)$  может не только уменьшаться, но и значительно увеличиваться, как, например, у ряда жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Температурный интервал ненулевого полуцикла ( $T_{\max} \leftrightarrow T_{\min}$ ) включает три этапа: снятие упругой деформации, достигнутой в предшествующем полуцикле; рост упругой деформации противоположного знака до уровня, соответствующего пределу упругости материала ( $\sigma_{005}(T)$ ), этап пластической деформации. Протяжённость каждого из этапов зависит как от свойств испытываемого материала, так и от условий нагружения, в частности жёсткости стеснения.

Чтобы получить наглядное представление о развитии деформации в ходе изменения температуры при различных режимах нагрева и охлаждения, предлагается строить диаграммы (будем называть их ТЦ-картами). На ТЦ-карте должны быть нанесены кривые температурной зависимости упругой деформации  $\varepsilon_{\text{упр}}=f(T)$ , соответствующей пределу упругости или пределу текучести исследуемого материала (при отсутствии данных о пределе упругости), и кривые изменения в ходе нагрева или охлаждения упругопластической деформации  $\Delta\varepsilon=\varphi(T)$ , в которую преобразуется полностью или частично стеснённая свободная термическая деформация  $\varepsilon_0=\varphi(T)$ . Упругопластическая деформация  $\Delta\varepsilon=\varphi(T)$  является суммой упругой  $\varepsilon_{\text{упр}}$  и пластической  $\varepsilon_{\text{пл}}$  деформации.

Метод построения ТЦ-карт и анализ с их помощью результатов термоциклических испытаний, выполняемых методом

Коффина, рассмотрим на примере сплава ВКНА-1В [7]. Испытания были проведены на монокристалльных образцах с ориентировкой оси нагружения [001], [111] и [011] в режиме полного стеснения свободной термической деформации ( $C \sim \infty$ )  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0$  с минимальной температурой цикла  $T_{\min} = 100^\circ\text{C}$  и максимальной  $T_{\max} = 850, 1050$  или  $1100^\circ\text{C}$ . Нагружение в нулевом полуцикле производили при температуре  $T_n = 0.5(T_{\max} + T_{\min})$ , т.е. при  $475, 575$  и  $600^\circ\text{C}$ .

Построение ТЦ-карт рассмотрим на примере образцов ориентировки [011]. Значения упругой деформации  $\varepsilon_{\text{упр}} = \sigma_{02}(T)/E(T)$ , соответствующие пределу текучести  $\sigma_{02}(T)$  и необходимые для построения зависимости  $\varepsilon_{\text{упр}} = f(T)$ , приведены в табл. 1, а её графики - на рис.1: при нагреве (а) и при охлаждении (б).

В табл. 2 приведены результаты расчёта свободной термической деформации

Таблица 1 - К расчёту  $\varepsilon_{\text{упр}} \sim f(T)$  для ориентировки оси нагружения [011]

|                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $T, ^\circ\text{C}$            | 20   | 100  | 250  | 400  | 600  | 800  | 850  | 900  | 1000 | 1050 | 1100 |
| $\sigma_{02}, \text{МПА}$      | 348  | 403  | 485  | 568  | 678  | 790  | 768  | 745  | 525  | 454  | 392  |
| $E, \text{ГПА}$                | 221  | 215  | 206  | 198  | 186  | 175  | 166  | 158  | 146  | 140  | 135  |
| $\varepsilon_{\text{упр}}, \%$ | 0.16 | 0.19 | 0.23 | 0.29 | 0.36 | 0.45 | 0.46 | 0.47 | 0.36 | 0.32 | 0.29 |

Таблица 2 - К расчёту  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 = \alpha_{\text{cp}}(T - 250^\circ\text{C})$ , где  $\alpha_{\text{cp}}$  в интервале ( $T \leftrightarrow 250^\circ\text{C}$ )

|  |    |      |     |      |      |       |       |      |       |       |       |
|--|----|------|-----|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| $T, ^\circ\text{C}$                          | 20 | 100  | 250 | 400  | 600  | 800   | 850   | 900  | 1000  | 1050  | 1100  |
| $\alpha_{\text{cp}}, 10^{-6} \text{Гр}^{-1}$ | -  | 12.7 | -   | 13.6 | 14.2 | 14.7  | 14.7  | 15.4 | 15.9  | 15.9  | 16.4  |
| $\Delta\varepsilon, \%$                      | -  | 0.19 | 0   | -0.2 | -0.5 | -0.81 | -0.88 | -1   | -1.19 | -1.27 | -1.39 |

Таблица 3 - К расчёту  $\Delta\varepsilon$  нулевых полуциклов нагрева от  $T_{\min} = 0.5(T_{\max} - 100)$

|  |              |       |       |               |       |       |               |       |       |
|--|--------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$          | 475 ↔ 850 °C |       |       | 575 ↔ 1050 °C |       |       | 600 ↔ 1100 °C |       |       |
| $T, ^\circ\text{C}$                          | 475          | 750   | 850   | 575           | 850   | 1050  | 600           | 875   | 1100  |
| $\alpha_{\text{cp}}, 10^{-6} \text{Гр}^{-1}$ | -            | 15.6  | 16.2  | -             | 16.5  | 18.1  | -             | 17.0  | 18.2  |
| $\Delta\varepsilon, \%$                      | 0            | -0.43 | -0.61 | 0             | -0.45 | -0.86 | 0             | -0.47 | -0.91 |

ТЦ-карты монокристалльных образцов сплава ВКНА-1В приведены на рис.2. Изменение  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0$  при охлаждении от  $T_{\max} = 850, 1050$  и  $1100^\circ\text{C}$  показывают кривые  $d, f, g$  (сплошные) на рис.2. Результаты расчёта даны в табл. 4.

Как видно из рис.1 и 2а, увеличение температуры  $T_n$ , при которой производили нагружение, сопровождается уменьшени-

$\varepsilon_0 = \alpha_{\text{cp}} \Delta T = \alpha_{\text{cp}}(T - 250^\circ\text{C})$ , которая целиком преобразуется в  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{пл}}$ , в ненулевом полуцикле испытаний при нагреве от  $T_{\min} = 100^\circ\text{C}$  до  $T_{\max} = 850, 1050$  и  $1100^\circ\text{C}$ . Приведены также значения среднего коэффициента линейного расширения  $\alpha_{\text{cp}}$  в интервале ( $T \leftrightarrow 250^\circ\text{C}$ ). Упругая деформация растяжения от предшествующего полуцикла охлаждения при  $T = 100^\circ\text{C}$  составляет  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} = \sigma_{02}(100^\circ\text{C})/E(100^\circ\text{C}) = 0.19\%$ . Она полностью снимается  $\Delta\varepsilon(250^\circ\text{C}) = 0$  при нагреве до  $250^\circ\text{C}$ . График  $\Delta\varepsilon = \varphi(T)$  ненулевого полуцикла нагрева представлен на рис.1 штриховой линией (с). Те же данные для нулевых полуциклов нагрева в диапазоне  $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$ :  $475 \leftrightarrow 850, 575 \leftrightarrow 1050$  и  $600 \leftrightarrow 1100^\circ\text{C}$  приведены в табл. 3 и в виде штриховых линий  $d, f, g$  на рис.1. Значения  $\alpha_{\text{cp}}$  соответствуют интервалам  $T_{\min} \leftrightarrow T$ .

ем величины  $\varepsilon_{\text{пл}}$  при  $T_{\max}$ . Поэтому, подбирая  $T_n$ , можно добиться, чтобы  $\varepsilon_{\text{пл}}$  была одинаковой в нулевом и последующих полуциклах, что позволит устранить влияние обычно сильно завышенной в нулевом полуцикле величины  $\varepsilon_{\text{пл}}$  на результаты испытаний – определяемую долговечность  $N$ . Отметим также, что динамика развития деформации в ненулевых полуциклах не зависит от  $T_n$ , т.к. положение

всех опорных точек диаграммы (а, b, с, k)  $T_n$ , а определяются свойствами испытуемого материала. на рис.2а и ход кривых  $\Delta\varepsilon=f(T)$  при нагреве и охлаждении (с, d, f, g) не зависят от

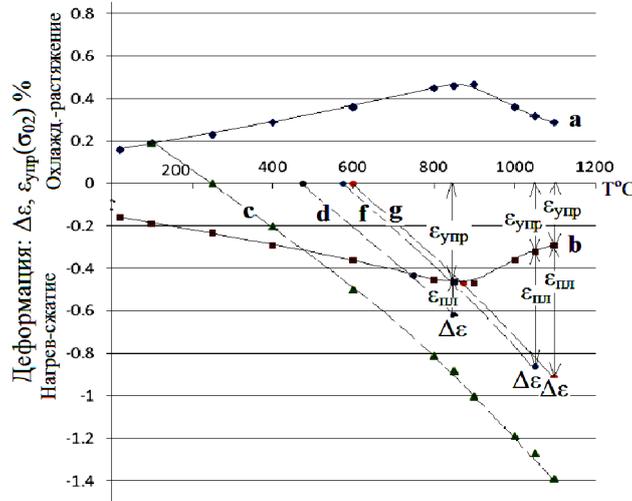


Рис.1. Деформация в нулевом полуцикле монокристаллов сплава ВКНА-1В ориентировки [011] с нагружением при  $T_n = 475, 575$  и  $600^\circ\text{C}$

Таблица 4 - К расчёту  $\Delta\varepsilon$  в первом полуцикле (охлаждение от  $T_{\max}$ )

| $T_{\max}, ^\circ\text{C}$ | $\varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{02})$ | $\Delta\varepsilon=f(T), \%$ |       |       |       |      |      |
|----------------------------|---|------------------------------|-------|-------|-------|------|------|
|                            |   | $T, ^\circ\text{C}$          | 850   | 750   | 600   | 400  | 100  |
| 850                        | -0.46                                   | $T, ^\circ\text{C}$          | 850   | 750   | 600   | 400  | 100  |
|                            |   | $\Delta\varepsilon, \%$      | -0.46 | -0.28 | -0.05 | 0.25 | 0.64 |
| 1050                       | -0.32                                   | $T, ^\circ\text{C}$          | 1050  | 800   | 600   | 400  | 100  |
|                            |   | $\Delta\varepsilon, \%$      | -0.32 | 0.18  | 0.5   | 0.8  | 1.19 |
| 1100                       | -0.29                                   | $T, ^\circ\text{C}$          | 1100  | 900   | 600   | 400  | 100  |
|                            |   | $\Delta\varepsilon, \%$      | -0.29 | 0.11  | 0.62  | 0.92 | 1.31 |

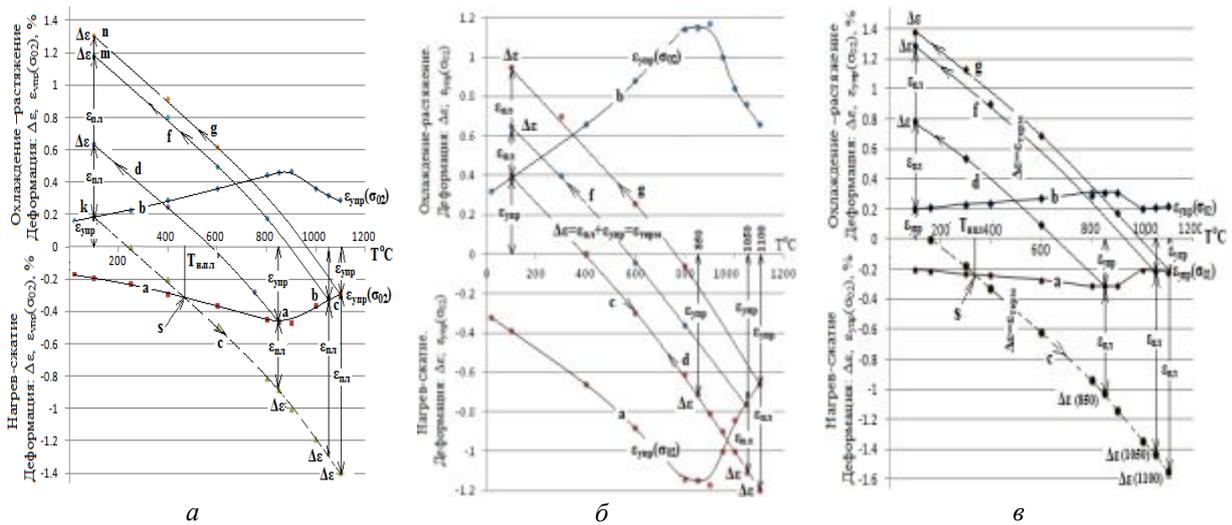


Рис.2. ТЦ-карты монокристаллических образцов сплава ВКНА-1В: [011] (а); [001] (б); [111] (в)

Из ТЦ-карт, приведённых на рис.2, и табл. 5 видно, что у образцов всех трёх ориентировок и при любых режимах цикла  $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$  деформации  $\varepsilon_{\text{пл}}$  при растяжении и сжатии мало отличаются. Однако

обращает на себя внимание, что у образцов ориентировки [001] величина  $\varepsilon_{\text{пл}}$  существенно меньше (почти в 2 раза), чем у остальных, тогда как долговечность  $N$  одного порядка с ними, а то и меньше.

Таблица 5 - К анализу результатов испытаний монокристаллов сплава ВКНА-1В

| $T_{max}$<br>°C | [001]              |                      |      | [111]              |                      |      | [011]              |                      |     |
|-----------------|--------------------|----------------------|------|--------------------|----------------------|------|--------------------|----------------------|-----|
|                 | $\epsilon_{пл}$ сж | $\epsilon_{пл}$ раст | $N$  | $\epsilon_{пл}$ сж | $\epsilon_{пл}$ раст | $N$  | $\epsilon_{пл}$ сж | $\epsilon_{пл}$ раст | $N$ |
| 850             | 0                  | 0.2                  | 1270 | 0.92               | 0.79                 | 1997 | 0.62               | 0.64                 | 428 |
| 1050            | 0.55               | 0.46                 | 61   | 1.42               | 1.29                 | 107  | 1.15               | 1.19                 | 204 |
| 1100            | 0.74               | 0.76                 | 242  | 1.53               | 1.38                 | 225  | 1.30               | 1.31                 | 171 |

Согласно установленной Коффиним зависимости между  $N$  и  $\epsilon_{пл}$  у этих образцов следовало бы ожидать значительно большую долговечность  $N$ , но данные работы [7] этого не подтверждают (табл. 5). Этот важный результат требует объяснения и специальных исследований, поскольку указывает на то, что развитие деформации и разрушение в условиях не-

изотермического нагружения определяется не только зависимостью  $N$  от  $\epsilon_{пл}$ .

На рис.3 для сравнения представлены ТЦ-карты нескольких сплавов: монокристаллов сплава ЖС32 ориентировки [001] и [111] и сплава ЖС36 ориентировки [001], а также поликристаллического сплава ЭИ867.

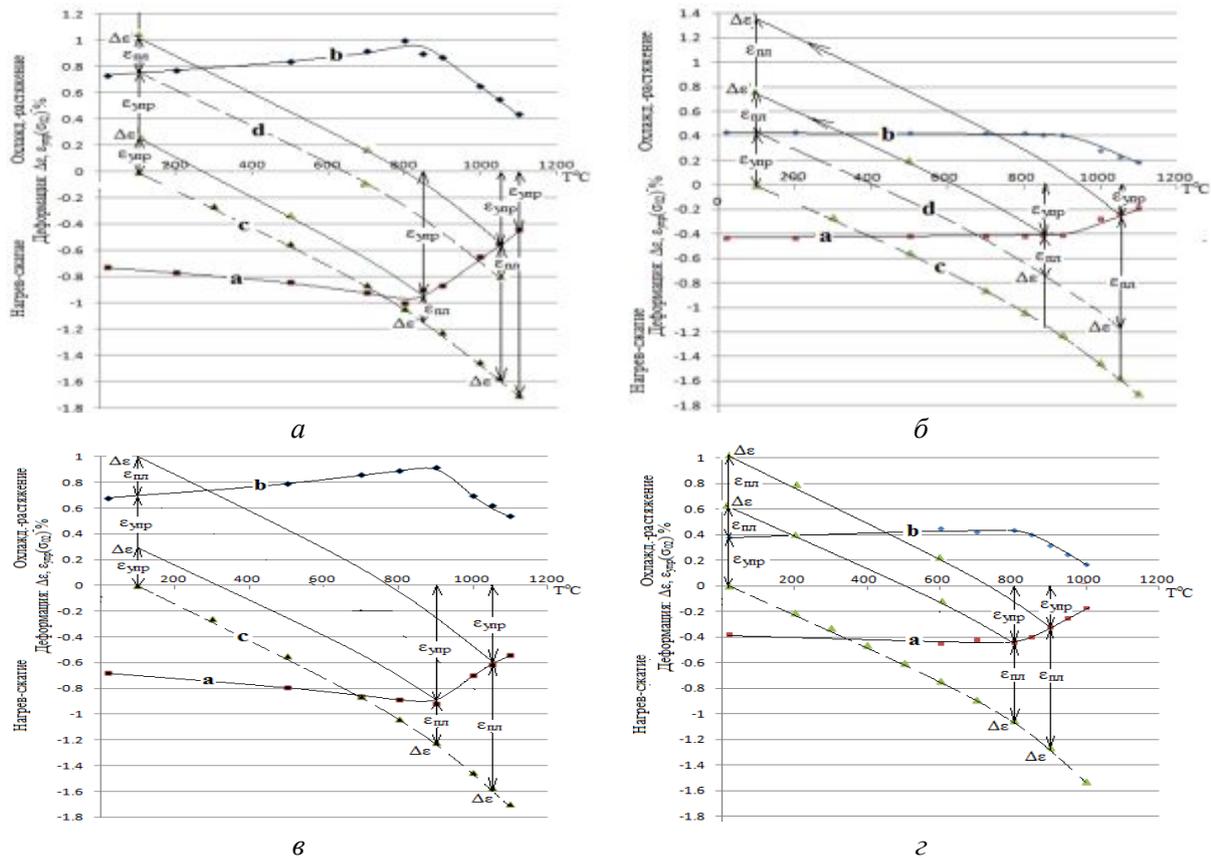


Рис.3. ТЦ карты жаропрочных сплавов: ЖС32 [001] (а), [111] (б); ЖС36 [001] (в); ЭИ867 (г)

Варьирование жёсткости нагружения [5] и тем самым стеснения преследует цель изменить величину  $\epsilon_{пл}$ , не меняя температурный диапазон испытаний  $T_{min} \leftrightarrow T_{max}$ . Деформация упругого элемента (мембрана, пружина), установленного в цепь нагружения образца, компенсирует вместе с упругой деформацией образца

часть его свободной термической деформации. При этом удлиняется температурный интервал, где происходит упругая деформация образца, и сокращается интервал протекания пластической деформации [6]. Присутствие упругого элемента в цепи нагружения проявляется на ТЦ-карте в уменьшении угла между кривой

$\Delta\varepsilon=\varphi(T)$  и осью  $T$  в области упругой деформации. Однако в интервале, где протекает пластическая деформация, т.е. после пересечения кривой  $\Delta\varepsilon=\varphi(T)$  с кривой  $\varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{02})=f(T)$ , упругий элемент не работает и кривая  $\Delta\varepsilon=\varphi(T)$  следует с таким же наклоном, как при полном стеснении.

На рис.4 представлены ТЦ-карты монокристаллов сплава ЖС6Ф, в испытаниях которых применяли варьирование жёсткости нагружения [1], создавая упругопластическую деформацию  $\Delta\varepsilon=1.3, 1.0$  и  $0.6\%$  в интервале температур  $100\leftrightarrow 950^\circ\text{C}$ .

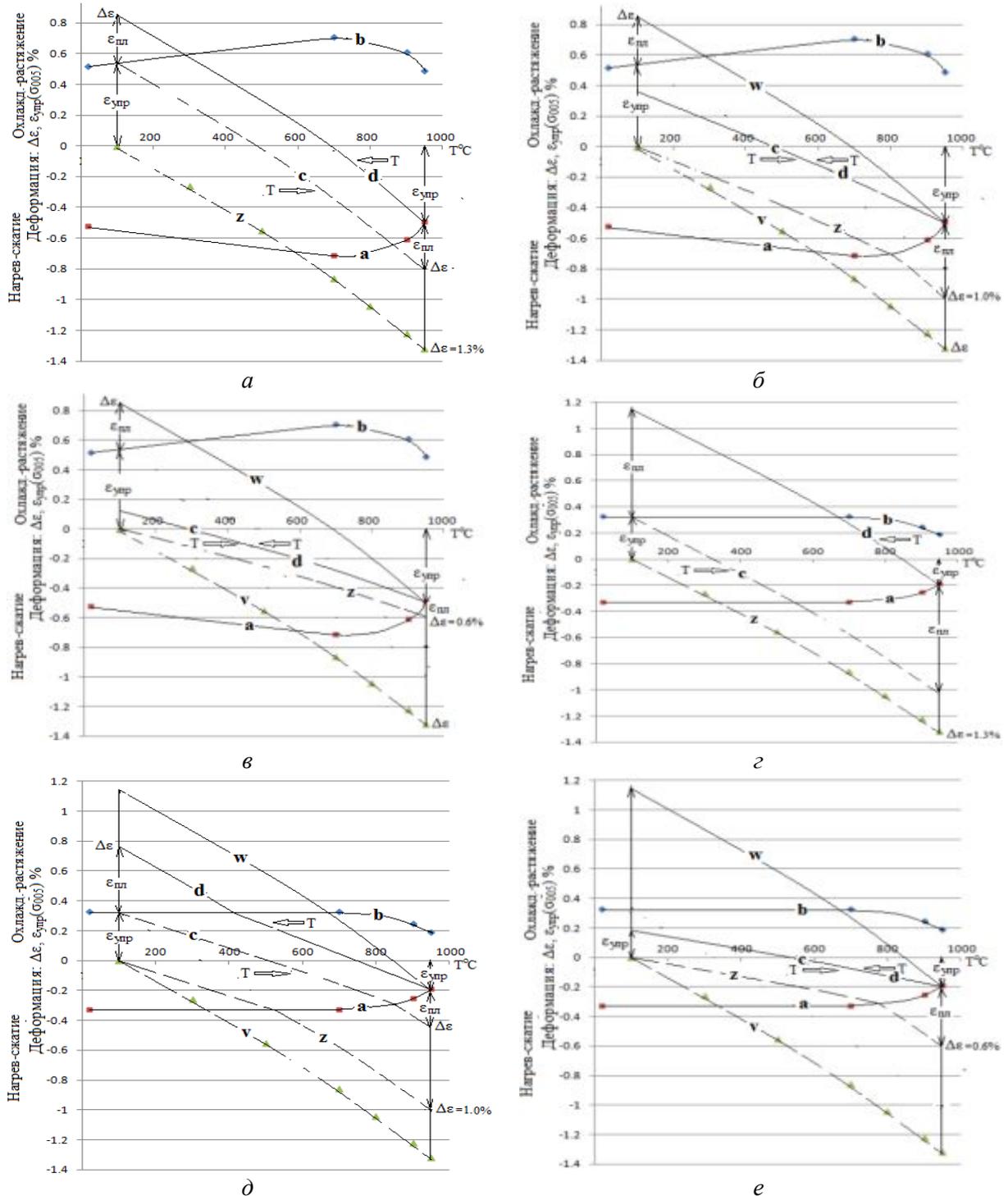


Рис.4. ТЦ карты монокристаллов сплава ЖС6Ф в испытаниях с варьируемой жёсткостью нагружения:  $\Delta\varepsilon=1.3\%$  (а,з),  $1.0\%$  (б,д) и  $0.6\%$  (в,е) в интервале  $100\leftrightarrow 950^\circ\text{C}$  [001] (а-в), [111] (з-е)

Видно, что имеются значительные различия в динамике развития деформации. Наиболее существенный момент, на который необходимо обратить внимание, состоит в том, что у образцов ориентировки [001] при  $\Delta\varepsilon=0.6$  и  $1.0\%$  и у [111] и [011] при  $\Delta\varepsilon=0.6\%$  вся деформация в цикле происходит в упругой области. Поэтому в данном случае построение зависимости долговечности  $N$  от  $\Delta\varepsilon$  бесперспективно, поскольку Коффиным установлена

связь между  $N$  и  $\varepsilon_{пл}$  в цикле испытаний, а здесь в одних опытах  $\Delta\varepsilon= \varepsilon_{упр}+\varepsilon_{пл}$ , тогда как в других  $\Delta\varepsilon=\varepsilon_{упр}$ . Поэтому было бы целесообразно по - новому проанализировать результаты обстоятельного исследования [1], но в рамках статьи провести такой анализ не представляется возможным. Тем не менее приводим табл. 6, где содержатся данные работы [1], а также значения  $\varepsilon_{пл}$  и напряжения  $\sigma$  в крайних точках цикла, найденные из ТЦ-карт.

Таблица 6 - Влияние  $\Delta\varepsilon$  на результаты испытаний [1]

| $\Delta\varepsilon$<br>% |                        | [001] |       |         | [111] |       |         | [011] |       |         |
|--------------------------|------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|
|                          |                        | 950°C | 100°C | $N$ [1] | 950°C | 100°C | $N$ [1] | 950°C | 100°C | $N$ [1] |
| 1.3                      | $\varepsilon_{пл}$ , % | 0.3   | 0.35  | 1922,   | 0.82  | 0.81  | 1323,   | 0.75  | 0.65  | 1033    |
|                          | $\sigma$ , МПа         | 476   | 719   | 1170    | 442   | 994   | 1151    | 504   | 729   |         |
| 1.0                      | $\varepsilon_{пл}$ , % | 0     | 0     | 4314,   | 0.25  | 0.42  | 5540,   | 0.05  | 0.05  | 3162,   |
|                          | $\sigma$ , МПа         | 476   | 466   | 5073    | 442   | 994   | 5472    | 504   | 729   | 2888    |
| 0.6                      | $\varepsilon_{пл}$ , % | 0     | 0     | 27828   | 0     | 0     | 32900   | 0     | 0     | 40303   |
|                          | $\sigma$ , МПа         | 476   | 160   | 49336   | 442   | 540   |         | 504   | 411   | 7154    |

В табл. 7 для сравнения представлены значения предела упругости  $\sigma_{005}$  этого сплава при  $T_{min}=100^\circ\text{C}$  и  $T_{max}=950^\circ\text{C}$  [11]. На ТЦ-картах (рис.4) приняты следующие обозначения: линия с показывает, как изменяется  $\Delta\varepsilon$  в ходе полуцикла нагрева, линия d – в полуцикле охлаждения, линия z демонстрирует ход зависимости  $\Delta\varepsilon=\varphi(T)$  в нулевом полуцикле, линии v, w являются вспомогательными и соответствуют режиму испытаний с полным стеснением (приведены для сравнения).

Таблица 7 - Предел упругости  $\sigma_{005}$  сплава ЖС6Ф [11]

| $T$ , °C                    | [001] | [111] | [011] |
|-----------------------------|-------|-------|-------|
| $T_{min}=100^\circ\text{C}$ | 719   | 994   | 729   |
| $T_{max}=950^\circ\text{C}$ | 476   | 442   | 504   |

### Заключение

Предложено использовать при исследовании термической усталости материалов методом термоциклических испытаний ТЦ-карты, включающие температурную зависимость упругой деформации, соответствующей пределу упругости или пределу текучести материала, и температурную зависимость свободной термической деформации. ТЦ-карты являются полезным инструментом исследований в связи с наглядностью представления динамики развития деформации в цикле и позволяют более осмысленно подходить к планированию экспериментов и анализу получаемых результатов.

### Библиографический список

1. Дульнев Р.А., Светлов И.Л., Бычков Н.Г., Рыбина Т.В., Суханов Н.Н., Гордеева Т.А., Доброхвалова Е.Н., Епишин А.И., Кривко А.И., Назарова М.П. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава // Проблемы прочности. 1988. № 11. С. 3-9.
2. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.
3. Третьяченко Г.Н., Карпинос Б.С., Барило В.Г. Разрушение материалов при циклических нагревах. Киев: Наукова думка, 1993. 288 с.

4. Coffin L.F. A Study of Cyclic-thermal Stress in Ductile Metal // Journal of Pressure Vessel Technology, Transaction of the ASME. 1954. V. 76. P. 931-950.

5. Серенсен С.В., Котов П.И. Об оценке сопротивления термической усталости по методу варьируемой жёсткости нагружения // Заводская лаборатория. 1962. Т. 28, № 10. С. 1233-1238.

6. Тихомирова Е.А., Азизов Т.Н., Сидохин Ф.А., Сидохин Е.Ф. О термоциклических испытаниях по методу варьируемой жёсткости нагружения // Материаловедение. 2014. № 7. С. 13-16.

7. Голубовский Е.Р., Бычков Н.Г., Хамидуллин А.Ш., Базылева О.А. Экспериментальная оценка кристаллографической анизотропии термической усталости монокристаллов сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al для

высокотемпературных деталей АГТД // Вестник двигателестроения. 2011. № 2. С. 244-246.

8. Баландин Ю.Ф. Термическая усталость металлов в судовом энергомашиностроении. Л.: Судостроение, 1967. 272 с.

9. Мэнсон С.С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. М.: Машиностроение, 1974. 213 с.

10. Тихомирова Е.А., Азизов Т.Н., Сидохин Е.Ф. Особенности деформации жаропрочных никелевых сплавов при термическом воздействии // Технология металлов. 2013. № 7. С. 14-18.

11. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 299 с.

### **Информация об авторах**

**Тихомирова Елена Александровна**, кандидат технических наук, ОАО «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург, E-mail: [tixomirova00@mail.ru](mailto:tixomirova00@mail.ru). Область научных интересов: материаловедение жаропрочных сплавов.

**Сидохин Евгений Фёдорович**, инженер, ООО «КБ Рентгеновских приборов», г. Санкт-Петербург. E-mail: [esidohin@yandex.ru](mailto:esidohin@yandex.ru). Область научных интересов: рентгеновское материаловедение, физика металлов.

## **ANALYSIS OF THE RESULTS OF THERMAL CYCLIC TESTS USING TC-MAPS AND PROBLEMS OF INVESTIGATING THERMAL FATIGUE OF MATERIALS**

© 2014 Е.А. Tikhomirova<sup>1</sup>, Е.Ф. Sidokhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Open Joint-Stock Company «Klimov», Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>ООО «КБ X-ray Instruments», Saint-Petersburg, Russian Federation

We present a method for the analysis of the progress of the deformation within a cycle by constructing the diagram TC-maps, where presented dependences of the temperature – free thermal deformation – elastic deformation, corresponding to the flow limit of the material. The diagram shows the magnitude of the plastic deformation attained at the maximal temperature ( $T_{max}$ ) and its changes in the cycles. The diagram allows permits one to choose the temperature mode required to obtain the desired deformation parameters in a test. An application of the diagram is presented in the case study analyzing the method and results of thermocyclic tests conducted on the high-heat resistant alloy used for the construction of the blades in the VNKNA-IV turbines. It has been concluded that under all possible modes the material is subject to plastic deformation within a cycle. Its presence does not allow one to conclude the dependence of the lifetime from the magnitude of the maximal stress registered within a cycle.

*Thermal fatigue; plastic deformation; thermo-cyclical testing.*

## References

1. Dulnev R.A., Svetlov I.L., Bychkov N.G., Rybina T.V., Sukhanov N.N., Gordeeva T.A., Dobrokhvalova E.N., Epishin A.I., Krivko A.I., Nazarova M.P. An orientation relationship of the thermal fatigue of nickel alloy single crystals // *Strength of Materials*. 1988. V. 20, no. 11. P. 1415-1421.
2. Dulnev R.A., Kotov P.I. *Termicheskaya ustalost metallov* [Thermal fatigue of metals] Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 200 p.
3. Tretyachenko G.N., Karpinos B.S., Barilo V.G. *Razrushenie materialov pri ciklicheskih nagrevakh* [The Material fracture at cyclic heats]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1993. 288 p.
4. Coffin L.F. A Study of Cyclic-thermal Stress in Ductile Metal // *Journal of Pressure Vessel Technology, Transaction of the ASME*. 1954. V. 76. P. 931-950.
5. Serensen S.V., Kotov P.I. About measuring of thermal fatigue resistance buy mean of the rigid load variation // *Zavodskaya laboratoriya*. 1962. V. 28, no. 10. P. 1233-1238. (In Russ.)
6. Tikhomirova E.A., Azizov T.N., Sidokhin F.A., Sidokhin E.F. About the thermal-cycle tests buy mean of the rigid load variation // *Materialovedenie*. 2014. No. 7. P. 13-16. (In Russ.)
7. Golubovskiy E.R., Bychkov N.G., Khamidullin A.Sh., Bazyleva O.A. The experimental estimation of thermal fatigue crystallographic anisotropy of Ni<sub>3</sub>Al single-crystals for high-temperature details of AGTD // *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2011. No. 2. P. 244-248. (In Russ.)
8. Balandin Yu.F. *Termicheskaya ustalost metallov v sydovom energomashinostroenii* [Thermal fatigue of metals in ship energy machine-building]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1967. 272 p.
9. Manson S.S. *Termicheskaie napryageniya i malociklovaya ustalost*. [The temperature stresses and low-cycle fatigue]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. 213 p.
10. Tikhomirova E.A., Azizov T.N., Sidokhin E.F. Specifics of base-Ni super-alloy single crystal deformation at thermal actions // *Tekhnologiya metallov*. 2013. No. 7. P. 14-18. (In Russ.)
11. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B., Toloraiya V.N., Gavrilin E.B. *Monokrystally nikelovykh garoprochnykh splavov* [Single crystals of base-Ni super-alloys]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1997. 336 p.

## About the authors

**Tikhomirova Elena Aleksandrovna**, Candidate of Science (Engineering), engineer, JSC “KLIMOV”, Saint-Petersburg. E-mail: [tixomirova00@mail.ru](mailto:tixomirova00@mail.ru). Area of Research: The metallurgy of high temperature resistance alloys.

**Sidokhin Evgeni Fedorovich**, engineer, JSC “CB X-ray Instruments », Saint-Petersburg. E-mail: [esidohin@yandex.ru](mailto:esidohin@yandex.ru). Area of Research: the physic of metals.