

Планирование термоциклических испытаний материалов

Е. А. Тихомирова^{а,1}, Е. Ф. Сидохин^{б,2}

^а ОАО “Климов”, Санкт-Петербург, Россия

^б ООО “КБ Рентгеновские приборы”, Санкт-Петербург, Россия

¹ tixomirova00@mail.ru

² esidohin@yandex.ru

Для планирования исследований термической усталости материалов и анализа результатов предлагается использовать карты термоциклических испытаний, которые позволяют проследить динамику развития деформации в термическом цикле. На картах представлены графики температурной зависимости упругой деформации, соответствующей пределу текучести материала, и изменения стесненной свободной деформации. Приведены методика построения карт термоциклических испытаний для нескольких материалов и необходимые для этого сведения об их физико-механических свойствах. Полезная информация, которая может быть получена с помощью карт термоциклических испытаний, иллюстрируется на примерах нескольких жаропрочных сплавов, используемых для изготовления лопаток газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: термическая усталость, стеснение свободной термической деформации, карты термоциклических испытаний.

Введение. Многие изделия в эксплуатации подвергаются циклическому нагреву, что становится причиной их разрушения, получившего название термической усталости [1]. Этот сложный неоднозначный процесс, который развивается, как правило, в течение продолжительного времени, является следствием пластической деформации ($\epsilon_{пл}$) [2], вызывающей необратимые изменения субструктуры материала и формирование состояния, благоприятного для зарождения и роста трещин. Эти изменения субструктуры – результат “конкуренции” высокотемпературной пластической деформации сжатия в полцикле нагрева и низкотемпературной деформации при охлаждении. В условиях эксплуатации изделий процесс разрушения может происходить при двух видах деформирования, протекающих одновременно. При первом виде термоциклического нагружения деформация развивается в условиях изменения температуры вследствие стеснения свободной термической деформации из-за механических ограничений, различия между термическим расширением сопряженных элементов, а также разницы между температурой соседних участков детали, при втором – деформирование происходит по достижении конечных температур цикла, имеет достаточное время для протекания и связано с достигнутым уровнем термических напряжений и внешнего силового воздействия.

Поведение материалов изделий в условиях первого вида деформирования исследуют при термоциклических испытаниях путем циклического нагрева, при котором воспроизводят термический режим эксплуатации $T_{min} \leftrightarrow T_{max}$ (минимальная и максимальная температуры цикла) и варьируют упругопластическую деформацию в цикле $\Delta\epsilon = \epsilon_{упр} + \epsilon_{пл}$. Полученные при испытаниях данные о долговечности N (число циклов до разрушения) и величины $\Delta\epsilon$ служат для построения зависимости $N = F(\epsilon_{пл})$, по которой оценивают сопротивление испытываемого материала термической усталости [3]. Эта схема испытаний предложена Коффиным на основании установленной им зависимости N от $\epsilon_{пл}$ [2]. Изменение термического режима в схеме является

способом варьирования $\Delta\epsilon$, если этого нельзя сделать другими методами, например, варьируя жесткость нагружения [3, 4] или подбирая для устройства стеснения материал с подходящим коэффициентом термического расширения $\alpha_{\text{ср}}$ [5]. Однако при такой постановке эксперимента совершенно не принимается во внимание динамика развития деформации в ходе изменения температуры в цикле испытаний, хотя она может существенно различаться при одном и том же режиме испытаний $T_{\text{min}} \Leftrightarrow T_{\text{max}}$. Для понимания природы происходящего в термическом цикле следовало бы задавать параметры T_{min} , T_{max} и $\Delta\epsilon$ иным образом, т.е. так, чтобы они способствовали проявлению предполагаемых эффектов [6].

При термоциклических испытаниях методом Коффина [2] образец в условиях полного ($\epsilon_0 = \Delta\epsilon$) или частичного ($\epsilon_0 > \Delta\epsilon$) стеснения нагревают преимущественно пропуская электрический ток, задавая пилообразную форму цикла нагрева с выдержкой при T_{max} в случае необходимости. Длительность полуцикла нагрева (сжатие) обычно составляет ~ 10 с, полуцикла охлаждения (растяжение) – около 100 с. Этому соответствует скорость изменения температуры ~ 100 град/с, а скорость деформации $\sim 10^{-3}$ с $^{-1}$. Такая скорость деформации характерна для механических испытаний материалов, где согласно [7] осуществляется активное нагружение образца, которое при термоциклических испытаниях происходит в результате изменения температуры. Полагаем, что нет оснований рассчитывать на иные механизмы деформации (ползучесть или релаксацию напряжений) как средство компенсации ϵ_0 при скорости деформации $\sim 10^{-3}$ с $^{-1}$, тем более при охлаждении. В каждом из полуциклов термических напряжений деформация развивается в той же последовательности, что и при механических испытаниях: рост упругой деформации после снятия ее с противоположным знаком от предшествующего полуцикла, за которой следует пластическая деформация.

Карты термоциклических испытаний с полным стеснением свободной термической деформации. Наглядное представление о последовательности, протяженности и развитии событий по мере изменения температуры в цикле испытаний могут дать карты термоциклических испытаний (ТЦ-карты), на которых совмещены графики температурной зависимости $\Delta\epsilon$, а также $\epsilon_{\text{упр}}(\sigma_{0,2})$ или $\epsilon_{\text{упр}}(\sigma_{0,05})$, где $\epsilon_{\text{упр}}(\sigma_{0,2}) = \sigma_{0,2}(T)/E(T)$ – упругая деформация, которая соответствует пределу текучести материала $\sigma_{0,2}(T)$ при данной T . При полном стеснении имеем $\Delta\epsilon = \epsilon_0 = \alpha_{\text{ср}}(T)\Delta T$. На рис. 1 приведены примеры ТЦ-карт, построенных для монокристаллов сплава ВКНА-1В с ориентировкой осей $\langle 001 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$. Такой выбор обусловлен большим интересом к термической усталости жаропрочных сплавов, используемых для изготовления монокристаллических лопаток турбин. Однако ТЦ-карты могут быть построены и применены к исследованию термической усталости любых других материалов, в том числе в поликристаллическом состоянии. Испытания сплава проводили при полном стеснении образцов ($\epsilon_0 = \Delta\epsilon$) по режиму $T_{\text{min}} = 100^\circ\text{C} \Leftrightarrow T_{\text{max}} = 850, 1050$ и 1100°C с нагружением образцов в 0-полуцикле при промежуточных температурах $T_F = 0,5(T_{\text{min}} + T_{\text{max}})$, т.е. 475, 575 и 600°C [8].

Построение ТЦ-карт демонстрирует диаграмма развития процесса в 0-полуцикле испытаний монокристаллов с ориентировкой $\langle 001 \rangle$ (принятые обозначения одинаковые для всех ТЦ-карт) – рис. 2: линии a и b представляют зависимость $\epsilon_{\text{упр}}(\sigma_{0,2}) \sim f(T)$ в области нагрева–сжатия и охлаждения–растяжения соответственно. Линии c, d, f, g соответствуют изменению $\Delta\epsilon \sim \varphi(T)$ в случае нагрева образца в стесненном состоянии от $T = 100, 475, 575$ или 600°C , где d, f, g – изменение $\Delta\epsilon$ в 0-полуцикле вышеуказанных испытаний, а c – изменение $\Delta\epsilon$ в процессе нагрева после полуцикла охлаждения, один из которых представлен линией h . Участки между осью T и линиями a и b соответствуют области упругой деформации сжатия (ниже оси T) и растяжения (выше нее), а те, что выше и ниже кривых a и b – областям пластической деформации.

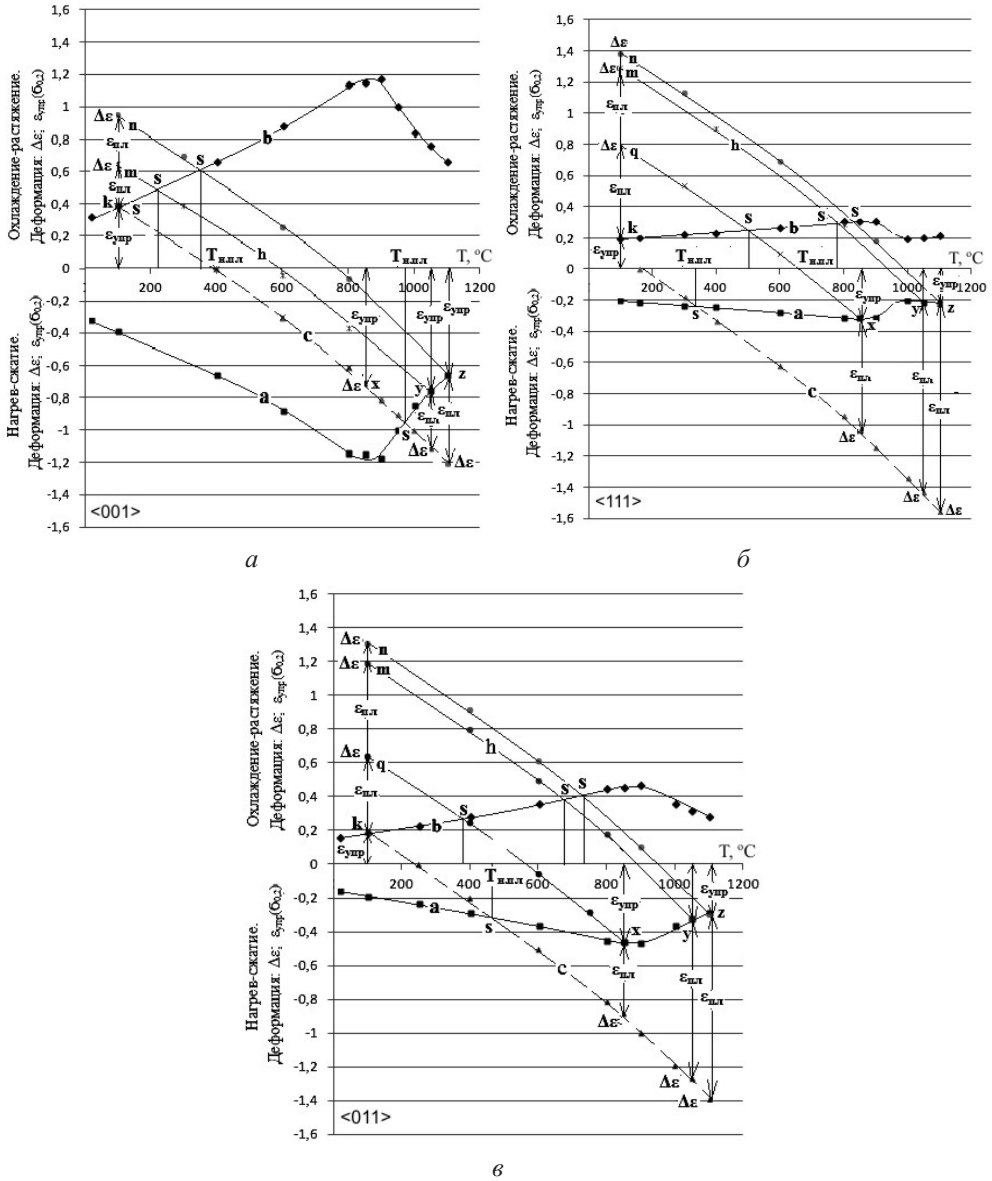


Рис. 1. ТЦ-карты испытаний монокристаллов сплава ВКНА-1А с ориентировкой осей <001> (а), <111> (б) и <011> (в).

Какими причинами руководствовались, выбирая для нагружения в 0-полуцикле температуры $T_F = 0,5(T_{\min} + T_{\max})$, в работе [7] не указано. Однако с помощью ТЦ-карт (рис. 1,а) можно показать, что этот выбор не влияет на динамику развития деформации в циклах испытаний по основным режимам $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$. Например, если образец нагружать при 600°C, то в ходе нагрева до $T_{\max} = 1100^\circ\text{C}$ деформация $\Delta\epsilon$ следует по кривой g, и вплоть до пересечения с кривой a происходит рост упругой деформации $\epsilon_{\text{упр}}$ ($\Delta\epsilon = \epsilon_{\text{упр}}$) – рис. 2. При дальнейшем повышении T пластическая деформация $\epsilon_{\text{пл}}$ должна плавно увеличиваться, при этом в образце из-за температурной зависимости $\sigma_{0,2}(T)$ и $E(T)$ одновременно уменьшается упругая деформация $\epsilon_{\text{упр}}$, которая в конечном итоге принимает значение $\epsilon_{\text{упр}}(\sigma_{0,2}(1100^\circ\text{C}))$.

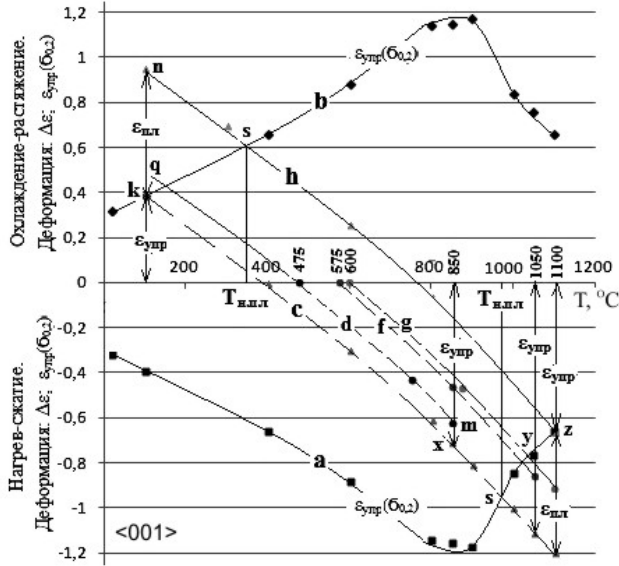


Рис. 2. ТЦ-карта 0-полуцикла с нагружением монокристаллов с ориентировкой оси <001> при $T_F = 0,5(T_{\min} + T_{\max})$.

На этом в проводимых испытаниях 0-полуцикл заканчивается, поскольку следующий полуцикл (охлаждение) начинается от точки z . В полуцикле охлаждения $\Delta\epsilon = \epsilon_0 = \alpha_{ср}(T)\Delta T$ происходит по кривой h до точки n , при этом $\Delta\epsilon = \epsilon_{упр}$ – до точки s , затем растет $\epsilon_{пл}$ и поэтому $\epsilon_{упр}$ уменьшается до $\epsilon_{упр}(\sigma_{0,2}(100^\circ\text{C}))$, а $\Delta\epsilon = \epsilon_{упр} + \epsilon_{пл}$.

Полуцикл нагрева по основному режиму начинается при $T_{\min} = 100^\circ\text{C}$ от точки k и следует по линии c до точки s (снятие $\epsilon_{упр}$ растяжения и рост $\epsilon_{упр}$ сжатия), где $T = T_{н.пл} \approx 970^\circ\text{C}$, а затем до $T_{\max} = 1100^\circ\text{C}$, где происходит рост $\epsilon_{пл}$ и уменьшение $\epsilon_{упр}$ сжатия. Очередной полуцикл охлаждения начинается опять от точки z , и далее картина повторяется от цикла к циклу. Аналогичная динамика, как показывают ТЦ-карты, имеет место для монокристаллов с ориентировкой оси <111>, а также для других материалов, в том числе поликристаллических, так как на участке, где протекает пластическая деформация $\epsilon_{пл}$, изменение $\epsilon_{упр}$ заканчивается величиной $\epsilon_{упр}(T_{\max})$ или $\epsilon_{упр}(T_{\min})$, и далее начинается следующий полуцикл.

Заметим, что в нашем случае не учитывалось деформационное упрочнение. При $T \approx T_{\max}$ деформационное упрочнение сплава ВКНА-1В практически отсутствует, но оно весьма значительно при низких T . В результате этого наклон кривой b после точки s должен измениться, вследствие чего $\epsilon_{упр}(T_{\min})$ окажется больше, чем в точке k , и достигаемая в полуцикле охлаждения величина $\epsilon_{пл}$ будет меньше (рис. 2). Однако и в полуцикле нагрева $\epsilon_{пл}$ будет меньше, поскольку кривая c начинается от $\epsilon_{упр}(T_{\min})$, которое больше, чем в точке k . Следовательно, при наличии деформационного упрочнения $\epsilon_{пл}$ в цикле должна быть меньше, а долговечность N , согласно принципу Коффина, больше. Данный эффект следует учитывать при анализе зависимости $N = F(\epsilon_{пл})$.

Изменение напряжений в термическом цикле. Рассмотрим эффекты, которые дает анализ динамики развития деформации с помощью ТЦ-карт в отношении изменения напряжений σ в термическом цикле испытаний. Из рис. 2 следует, что при всех T_{\max} цикла испытаний изменение $\Delta\epsilon$ в ходе нагрева образцов конкретного материала представляет одна и та же кривая c (продлевается при повышении T_{\max}). Кривая c начинается в точке k , где $T = T_{\min}$ (в данном случае 100°C), $\epsilon_{упр} = \epsilon_{упр}(\sigma_{0,2}(T_{\min}))$, а напряжения растяжения $\sigma_p = \epsilon_{упр}E(100^\circ\text{C})$. Ее пересечение с

кривой a независимо от T_{\max} происходит в одной и той же точке s (при $T = T_{\text{н.пл}}$), т.е. пластическая деформация начинается при одной и той же температуре $T_{\text{н.пл}}$. При испытаниях до различных значений T_{\max} протяженность участков $\Delta T = T_{\max} - T_{\text{н.пл}}$ и соответственно достигаемые к T_{\max} величины $\varepsilon_{\text{пл}}$ различаются. Изменение напряжений σ в монокристалльных образцах сплава ВКНА-1В с тремя ориентировками при изменении T от T_{\min} до T_{\max} представлено в виде схемы на рис. 3,б (участок снятия σ_p не показан). По завершении снятия $\sigma_p(T_{\min})$ с повышением температуры происходит рост напряжений сжатия $\sigma_{\text{сж}} = \Delta\varepsilon(T)E(T)$ вплоть до $T = T_{\text{н.пл}}$. При $T > T_{\text{н.пл}}$ ход кривой $\sigma_{\text{сж}}(T)$ повторяет температурную зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}(T)$ или $\sigma_{0,05}(T)$ – рис. 3,а. Отметим, что в процессе нагрева напряжения $\sigma_{\text{сж}}$ в монокристаллах сплава ВКНА-1В каждой из ориентировок достигают одной и той же максимальной величины при одной и той же температуре независимо от T_{\max} испытаний. Это может служить критерием для оценки правильности определения максимальных напряжений $\sigma_{\text{сж}}$, которые обычно измеряют при термоциклических испытаниях, как, например, в работе [8].

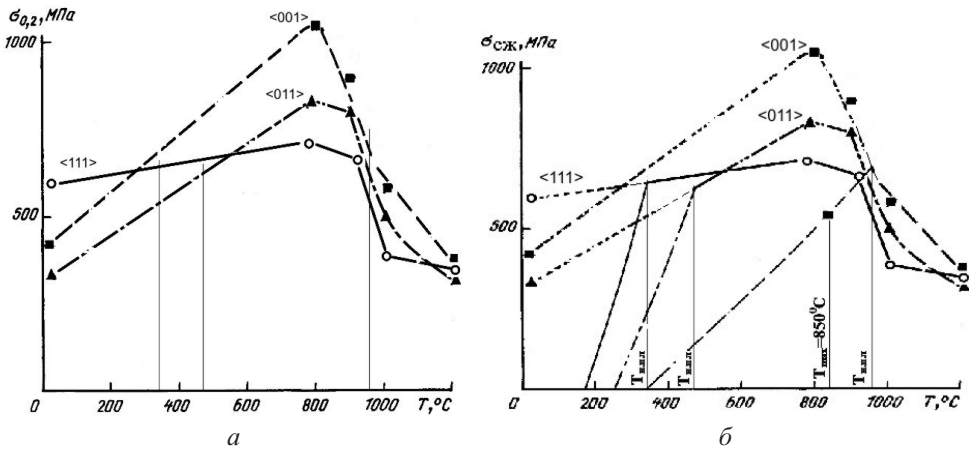


Рис. 3. Температурная зависимость $\sigma_{0,2}(T)$ монокристаллов сплава ВКНА-1В (а) и схема изменения напряжений сжатия в полуцикле нагрева с полным стеснением $\varepsilon_0 = \Delta\varepsilon$ (б).

Иначе развивается деформация в полуцикле охлаждения. Кривые $\Delta\varepsilon = \varphi(T)$, например линии h , начинаются в разных точках n, m, q , следуют эквидистантно и пересекают кривую b в точках s при разных $T_{\text{н.пл}}$, где σ_p могут различаться (рис. 1). При дальнейшем уменьшении T пластическая деформация происходит в температурных интервалах с различной протяженностью ($T_{\text{н.пл}} - T_{\min}$). Одновременно изменяется $\varepsilon_{\text{упр}}(T)$ сообразно изменению $\sigma_{0,2}(T)$ и $E(T)$, но независимо от T_{\max} , и в итоге $\varepsilon_{\text{упр}}(T)$ достигает величины $\varepsilon_{\text{упр}} = \varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{0,2}(T_{\min}))$ и $\sigma_p = \sigma_{0,2}(T_{\min})$.

Интересная ситуация наблюдается при испытаниях образцов с ориентировкой оси $\langle 001 \rangle$ по режиму $100 \Leftrightarrow 850^\circ\text{C}$. Из ТЦ-карты видно, что при нагреве ($100 \Leftrightarrow 850^\circ\text{C}$) образец деформируется исключительно упруго, а в полуцикле охлаждения его пластическая деформация невелика ($\sim 0,2\%$) – рис. 1,а или рис. 2. Из рис. 2 видно, что это происходит из-за выбора $T_F = 475^\circ\text{C}$. Если образец нагружать в 0-полуцикле при температуре, например, $\sim 300^\circ\text{C}$, то кривая $\Delta\varepsilon = \varphi(T)$ в полуцикле охлаждения не пересечет кривую b , и деформация будет упругой $\varepsilon_{\text{упр}}$ и при охлаждении. Поэтому при циклическом нагреве по режиму $100 \Leftrightarrow 850^\circ\text{C}$ с промежуточной температурой $T_F \approx 300^\circ\text{C}$ деформация будет упругой в обоих полуциклах. Это позволяет исследовать термическую усталость в условиях отсутствия $\varepsilon_{\text{пл}}$ в цикле при изменении

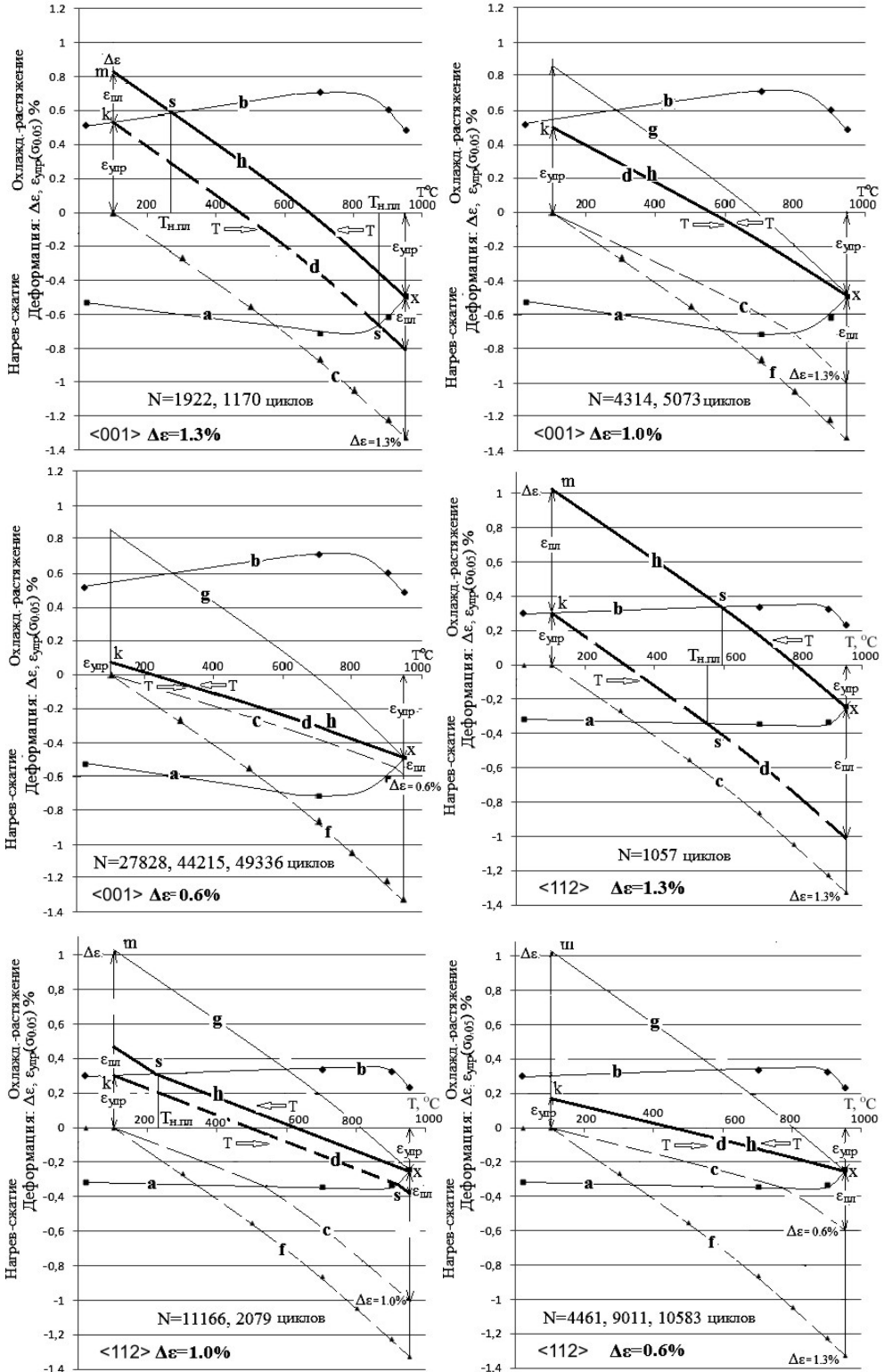


Рис. 4. ТЦ-карты испытаний монокристаллов сплава ЖС6Ф с ориентировкой осей $\langle 001 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ в условиях полного ($\epsilon_0 = \Delta\epsilon = 1,3\%$) и частичного ($\epsilon_0 > \Delta\epsilon = 1,0$ и $0,6\%$) стеснения.

упругой деформации $\varepsilon_{\text{упр}}$ подобно тому, как это происходит при испытаниях на изотермическую усталость. Аналогично можно выбирать режим испытаний с упругим нагружением, без $\varepsilon_{\text{пл}}$ в других температурных областях. В то же время ТЦ-карты показывают, что при термоциклических испытаниях с заданной величиной $\varepsilon_{\text{пл}}$ нельзя произвольно варьировать уровень напряжений в цикле, так как их величину задает испытываемый материал.

Карты термоциклических испытаний с частичным стеснением свободной термической деформации. При испытаниях с частичным стеснением свободной термической деформации образца, где $\Delta\varepsilon < \varepsilon_0$, на участках упругой деформации (до точек s) кривые $\Delta\varepsilon = \varphi(T)$ в обоих полуциклах на ТЦ-картах имеют меньший наклон к оси T , чем при полном стеснении. Там, где имеет место пластическая деформация, характер кривых $\Delta\varepsilon = \varphi(T)$ такой же, как при испытаниях с полным стеснением $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0$, если ход кривых $\varepsilon_{\text{упр}} = \varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{0,2}(T))$ на линии a или b не зависит от T (рис. 1). В противном случае ход кривых $\Delta\varepsilon = \varphi(T)$ необходимо корректировать с учетом зависимости $\varepsilon_{\text{упр}}(T)$.

ТЦ-карты испытаний с частичным стеснением ε_0 демонстрируют развитие деформации в жаропрочном сплаве ЖС6Ф, монокристаллы которого подвергали циклическому нагреву по режиму $100 \Leftrightarrow 950^\circ\text{C}$ (рис. 4) [9]. Отметим, что в тех случаях, где задаваемая величина $\Delta\varepsilon$ составляет 1,0 и 0,6%, деформация растяжения в полуцикле охлаждения упругая, а в полуцикле нагрева имеет место пластическая деформация сжатия $\varepsilon_{\text{пл}} = 0,2\%$. Эта картина противоположна той, которая наблюдалась для сплава ВКНА-1В с ориентировкой оси $\langle 001 \rangle$ при испытаниях по режиму $100 \Leftrightarrow 850^\circ\text{C}$, где такой же по величине была деформация растяжения, и можно предположить, что долговечность в этих двух случаях не может быть одинаковой. Имеются и другие примеры подобного развития деформации. Заметим, что если при испытаниях принимают во внимание только термический режим ($T_{\text{min}} \Leftrightarrow T_{\text{max}}$) и $\Delta\varepsilon$, то указанные выше особенности, которые обнаруживаются на ТЦ-картах и должны влиять на долговечность, остаются неучтенными.

Среди преимуществ ТЦ-карт необходимо отметить возможность отслеживать величину пластической деформации $\varepsilon_{\text{пл}}$ в полуциклах, устанавливать температуру перехода к пластической деформации $T_{\text{н.пл}}$, температурный интервал протекания $\varepsilon_{\text{пл}}$ и его положение относительно T_{min} и T_{max} , температуру, при которой заканчивается снятие упругой деформации предшествующего цикла, и др. Учет этих параметров термического цикла открывает дополнительные возможности, наряду с величиной $\varepsilon_{\text{пл}}$, для понимания тех факторов, от которых зависит долговечность N .

Выводы

1. ТЦ-карты демонстрируют динамику развития деформации в цикле изменения температуры образца, термическая деформация которого ограничена полностью или частично свободная.

2. ТЦ-карты дают возможность осмысленно подходить к выбору условий проведения термоциклических испытаний и их планированию таким образом, чтобы с помощью полученных результатов стали понятны явления, ответственные за развитие разрушения при циклических нагревах.

3. Применение ТЦ-карт позволяет по-иному взглянуть на установленную Коэффициентом зависимость долговечности от пластической деформации в цикле испытаний.

Резюме

Із метою правильного планування термоциклічних випробувань при дослідженні термічної втоми матеріалів пропонується використовувати карти термоциклічних випробувань, які показують динаміку розвитку деформації в термічному циклі. На

цих картах показано графіки температурної залежності пружної деформації, що відповідає границі плинності матеріалу, і зміни обмеженої вільної деформації. Наведено методику побудови карт термоциклічних випробувань для деяких матеріалів і необхідні для цього відомості про їх фізико-механічні властивості. Корисна інформація, яка може бути отримана за допомогою карт термоциклічних випробувань, проілюстрована на прикладах декількох жароміцних сплавів, що використовуються для виготовлення лопаток газотурбінних двигунів.

1. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость металлов. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.
2. Coffin L. F., Jr. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metals. *Trans. ASME*. 1954. **76**. P. 931–950.
3. Серенсен С. В., Котов П. И. Об оценке сопротивления термической усталости по методу варьiruемой жесткости нагружения. *Завод. лаб.* 1962. № 10. С. 1233–1238.
4. Тихомирова Е. А., Азизов Т. Н., Сидохин Ф. А., Сидохин Е. Ф. О термоциклических испытаниях по методу варьiruемой жесткости нагружения. *Материаловедение*. 2014. № 7. С. 13–16.
5. Пат. Россия № 138634. Устройство для испытания сопротивления материалов термической усталости / Е. А. Тихомирова, Ф. А. Сидохин, Т. Н. Азизов, Е. Ф. Сидохин. Опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8.
6. Третьяченко Г. Н., Карпинос Б. С., Барило В. Г. Разрушение материалов при циклических нагревах. Киев: Наук. думка, 1993. 288 с.
7. Орлов А. Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высш. шк., 1983. 144 с.
8. Голубовский Е. Р., Бычков Н. Г., Хамидуллин А. Ш., Базылева О. А. Экспериментальная оценка кристаллографической анизотропии термической усталости монокристаллов сплава на основе Ni₃Al для высокотемпературных деталей АГТД. *Вестн. двигателестроения*. 2011. № 2. С. 244–248.
9. Дульнев Р. А., Светлов И. Л., Бычков Н. Г. и др. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава. *Пробл. прочности*. 1988. № 11. С. 3–9.

Поступила 08. 09. 2017