

УДК 669.018, 669.224

Канд. техн. наук Е. А. Тихомирова<sup>1</sup>, Е. Ф. Сидохин<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «Климов», <sup>2</sup>ООО «КБ Рентгеновские приборы»; С.-Петербург, РФ

## ОБ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ»

*Рассмотрены результаты и выводы, представленные в статье «Экспериментальная оценка кристаллографической анизотропии термической усталости...» [1]. С помощью ТЦ-карт, отражающих динамику развития деформации в термическом цикле, показано, что при термоциклических испытаниях монокристаллов жаропрочного сплава ВКНА-1В в полциклах нагрева и охлаждения присутствует пластическая деформация. Поскольку результаты исследования не дают возможности разделить эффекты влияния пластической деформации и размаха напряжений на долговечность, выводы статьи о зависимости долговечности от напряжений нельзя признать обоснованными.*

**Ключевые слова:** термическая усталость, стеснение, напряжения, деформация.

Исследованиями ИПП АН Украины [2], показано, что при моделировании термической усталости, которая представляет собой «разрушение материала при циклических нагревах», «закономерности деформирования и разрушения должны изучаться на образцах, в которых в процессе испытаний обеспечивается и контролируется необходимый механизм деформирования». Однако на практике чаще всего, как, например, в обсуждаемой работе [1], «ставится задача исследования термической усталости монокристаллов сплава в диапазоне температур рабочих лопаток ТВД» и, планируя испытания, задают максимальную  $T_{\max}$ , минимальную температуру  $T_{\min}$  и упругопластическую деформацию  $\Delta\varepsilon$ , но вопрос о том, как развивается деформация в цикле, в расчет не принимают. В итоге, например, в поисках зависимости долговечности  $N$  от размаха напряжений  $\Delta\sigma = \sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{р}}$  [2] оставляют без внимания температуры, при которых зарегистрированы максимальные напряжения сжатия и растяжения при нагреве и охлаждении  $\sigma_{\text{сж}}$  и  $\sigma_{\text{р}}$ . Анализируя результаты работы [1], мы воспользовались ТЦ-картами [3], которые представляют динамику развития деформации в полциклах нагрева и охлаждения термоциклических испытаний (ТЦ) методом Коффина.

Циклическому нагреву реальных изделий таких, как лопатки турбин, в условиях эксплуатации присущи два этапа развития разрушения в ходе теплосмен, протекающие одновременно. Один из них включает явления, которые происходят при верхней температуре цикла и связаны с достигнутыми термическими напряжениями и внешним воздействием. Другой протекает в то время, когда при запусках и отключениях двига-

теля происходит изменение температуры ( $T$ ). Он развивается вследствие стеснения свободной термической деформации материала  $\varepsilon_0$ , которую полностью или частично компенсирует его упругопластическая деформация  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{пл}}$ . Причиной прогрессирующего разрушения в обоих случаях является пластическая деформация  $\varepsilon_{\text{пл}}$ , которая инициирует необратимые изменения субструктуры материала, ведущие к зарождению и росту трещин.

В термоциклических испытаниях, применяемых при исследовании термической усталости материалов [4], имитируют второй этап, производя циклический нагрев стесненного образца. Циклический нагрев образца по заданному режиму  $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max}$  в условиях полного или частичного стеснения  $\varepsilon_0 = \alpha_{\text{ср}} \Delta T$  ( $\alpha_{\text{ср}}$  – средний коэффициент термического расширения,  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ ) в цикле изменения  $T$  продолжают до разрушения и определяют долговечность, как число циклов до разрушения  $N$  [4]. О сопротивлении материала термической усталости судят, согласно принципу Коффина [5], на основании зависимости  $N = f(\varepsilon_{\text{пл}})$ , построенной по экспериментальным данным [6], полученным в серии испытаний с различными величинами  $\varepsilon_{\text{пл}}$  в цикле. Задание  $\varepsilon_{\text{пл}}$  в цикле осуществляют различными способами, например, варьируя жесткость стеснения с помощью упругих элементов (пружины, мембраны) в цепи нагружения [2, 6], но во всех случаях изменение  $\Delta\varepsilon$  достигается из-за изменения  $\varepsilon_{\text{пл}}$  в цикле при почти неизменной величине  $\varepsilon_{\text{упр}}$  [7].

Однако в условиях циклических нагревов реальных изделий пластической деформации  $\varepsilon_{\text{пл}}$  может не быть, но о разрушении вследствие цик-

лического изменения  $\varepsilon_{\text{упр}}$  известно (изотермическая усталость). Поэтому интерес авторов статьи [2] к зависимости долговечности  $N$  от напряжений  $\sigma$  при периодических теплосменах вполне обоснован. Мы разделяем этот интерес, но не согласны с методическим подходом к решению вопроса.

Испытания в работе [2], как указывают авторы, производились методом Коффина на тех же установках, что в работе [8]. Долю стесняемой свободной термической деформации  $\varepsilon_0 = \alpha_{\text{ср}} \Delta T$  варьировали с помощью мембран различной жесткости, с целью «исследования термической усталости монокристаллов сплава ВКНА-1В в диапазоне температур рабочих лопаток ТВД»:  $T_{\text{min}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{max}} = 850, 1050$  или  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , с нагружением образца при температуре  $T_f = 0,5(T_{\text{min}} + T_{\text{max}})$ . В отличие от работы [8], где варьировали  $\Delta\varepsilon$ , которая здесь [2] даже не упоминается, в таблицу 2 [2] режимов испытаний включены значения максимальных напряжений  $\sigma_{\text{max}}$  в полуцикле нагрева  $\sigma_{\text{сж}}$  (сжатие) и охлаждения  $\sigma_{\text{р}}$  (растяжение). Сообщается, что «заданный режим изменения нагрузки (напряжений) достигался через 9–10 циклов», но не сообщается, каким образом режим задавали.

Вроде бы просматривается аналогия с испытаниями изотермической усталости. Однако, если там испытания проводят исключительно в области упругой деформации материала, то особенности деформации в термическом цикле в статье [2] не обсуждаются, что совсем не безразлично для трактовки получаемой информации о долговечности.

Для анализа развития деформации в термическом цикле и того, как изменяются напряжения в ходе изменения температуры, воспользуемся ТЦ-картами сплава ВКНА-1В, построенными для монокристалльных образцов с ориентировкой оси нагружения [001], [011] и [111] [3]. ТЦ-карта – это диаграмма, на которой совмещены графики зависимости  $\Delta\varepsilon \sim \varphi(T)$  и  $\varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{02}) \sim f(T)$  (либо  $\varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{005}) \sim f(T)$ ), где  $\varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{02}) = \sigma_{02}(T)/E(T)$  – упругая деформация, соответствующая пределу текучести материала  $\sigma_{02}(T)$  при данной  $T$ , а  $E(T)$  его модуль упругости. На рис. 1 приведены ТЦ-карты, образцов сплава ВКНА-1В, который испытывали в условиях полного стеснения ( $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0$ ) с нагружением в 0-полуцикле при температурах  $T_f = 0,5(T_{\text{min}} + T_{\text{max}})$  [2]. Развитие деформации в 0-полуцикле демонстрирует ТЦ-карта, приведенная на рис. 1, а. Линии а и б на ней представляют зависимость  $\varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{02}) \sim f(T)$  в области нагрева-сжатия (а) и в области охлаждения-растяжения (б). Линии с, d, f, g демонстрируют изменение  $\Delta\varepsilon \sim \varphi(T)$  в случае нагрева от  $T = 100, 475, 575$  или  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , где d, f, g – изменение  $\Delta\varepsilon$  в 0-полуцикле ТЦ испытаний. Линия (с) по-

казывает изменение  $\Delta\varepsilon$  в ходе нагрева, следующего после полуцикла охлаждения, один из которых представлен линией (h). Поля диаграммы между осью  $T$  и линиями а и б соответствуют области упругой деформации сжатия (ниже оси  $T$ ) и области растяжения (выше нее). Поля же выше и ниже кривых а и б – это области пластической деформации. На рис. 1, б–г приведены ТЦ-карты испытаний монокристаллов сплава ВКНА-1В ориентировки [011], [001] и [111] по вышеуказанным режимам с полным стеснением [2]. К сожалению, не представляется возможным воспользоваться обширными данными работы [2] для испытаний с неполным стеснением, т. к. не указаны значения  $\Delta\varepsilon$ .

Главный вывод, который следует из ТЦ-карт (рис. 1) состоит в том, что в обоих полуциклах испытаний монокристалльных образцов каждой из 3-х ориентировок сплава ВКНА-1В при всех режимах  $T_{\text{min}} \leftrightarrow T_{\text{max}}$  происходит пластическая деформация ( $\varepsilon_{\text{пл}}$ ). Величина ее зависит от режима испытаний  $T_{\text{min}} \leftrightarrow T_{\text{max}}$ , но весьма внушительна, как в полуциклах нагрева, так и охлаждения. Ее роль в разрушении нельзя пренебрегать.

Поскольку влияние  $\varepsilon_{\text{пл}}$  на  $N$  хорошо известно [4, 5], а ее присутствие на ТЦ-картах не вызывает сомнений, с выводами статьи о том, что  $N$  зависит от  $\sigma$ , трудно согласиться. Авторам следовало исключить возможность появления  $\varepsilon_{\text{пл}}$  в проводимых испытаниях либо найти способ учесть ее влияние на результаты. Наличие связи между максимальными напряжениями  $\sigma_{\text{max}}$  ( $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $\sigma_{\text{р}}$ ), а тем более их размахом  $\Delta\sigma = \sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{р}}$  и долговечностью  $N$  требует доказательств и физических обоснований.

Далее рассмотрим ТЦ-карты в отношении того, как изменяется  $\sigma$  с температурой и с какими характерными точками в полуциклах могут быть связаны максимальные напряжения ( $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $\sigma_{\text{р}}$ ), зарегистрированные в работе [2].

1. Начнем с полуциклов нагрева. Прежде всего обратим внимание на то, что в полуцикле нагрева кривые с, представляющие зависимость  $\Delta\varepsilon \sim \varphi(T)$  ( $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 = \alpha_{\text{ср}} \Delta T$ ) в не нулевых полуциклах, независимо от  $T_{\text{max}}$  следуют одинаково у монокристаллов каждой из ориентировок. Кривые с, соответствующие разным  $T_{\text{max}}$ , пересекают кривую а ( $\varepsilon_{\text{упр}}(\sigma_{02}) \sim f(T)$ ) при одной и той же  $T = T_{\text{н,пл}}$ , где начинается пластическая деформация  $\varepsilon_{\text{пл}}$ , которая далее постепенно растет по мере повышения  $T$  до  $T_{\text{max}}$ . Изменение напряжений  $\sigma$  на участках до и после  $T_{\text{н,пл}}$  протекает по-разному. После того, как в точке пересечения кривой с и оси  $T$  заканчивается снятие напряжений растяжения от предшествующего полуцикла, начинается рост упругой деформации  $\varepsilon_{\text{упр}}$  и соответствующих ей напряжений сжатия  $\sigma(T) = \varepsilon_{\text{упр}} E(T)$ . Он продолжается до точки

с, где при  $T = T_{н.пл}$  включается пластическая деформация, при этом  $\varepsilon_{упр} = \varepsilon_{упр}(\sigma_{02}(T_{н.пл}))$ , а  $\sigma = \sigma_{02}(T_{н.пл})$  (или  $\sigma_{005}$ ). Дальнейшее изменение  $\sigma$  после  $T_{н.пл}$  зависит от хода кривой а, т. е. от температурной зависимости предела текучести сплава (рис. 2, а; отмечены  $T = T_{н.пл}$  в полуцикле нагрева для каждой из ориентировок образцов).

Как видим (рис. 2, б), после  $T_{н.пл}$  изменение  $\sigma_{02}$  у монокристаллов ориентировки [011] и [111] и ориентировки [001] происходит по-разному. У монокристаллов [011] и [111] напряжения увеличиваются с температурой до  $\sim 850^\circ\text{C}$ , где у сплава ВКНА-1В достигается наиболее высокий предел текучести  $\sigma_{02}(850^\circ\text{C})$ , который затем

уменьшается до  $\sigma_{02}(T_{max})$ . Следовательно, у этих монокристаллов максимальные напряжения сжатия  $\sigma_{max}$  в полуцикле нагрева не зависят от  $T_{max}$  и равны  $\sim \sigma_{02}(850^\circ\text{C})$ . У монокристаллов же [001] в полуцикле нагрева по режимам  $100 \rightarrow 1050$  и  $1100^\circ\text{C}$  напряжения сжатия достигают максимальной величины в точке s при  $T = T_{н.пл} = 970^\circ\text{C}$  и  $\sigma_{сж}$  соответствует  $\sigma_{02}(T_{н.пл})$ . В испытаниях по режиму  $100 \rightarrow 850^\circ\text{C}$ , как видно из ТЦ-карты (рис. 1, б), деформация развивается исключительно в упругой области и  $\sigma_{max} = \varepsilon_{упр}(850^\circ\text{C})E(850^\circ\text{C}) = E(850^\circ\text{C})\alpha_{ср}\Delta T$ .

Экспериментальные данные работы [2] и данные из ТЦ-карт представлены в таблице 1.

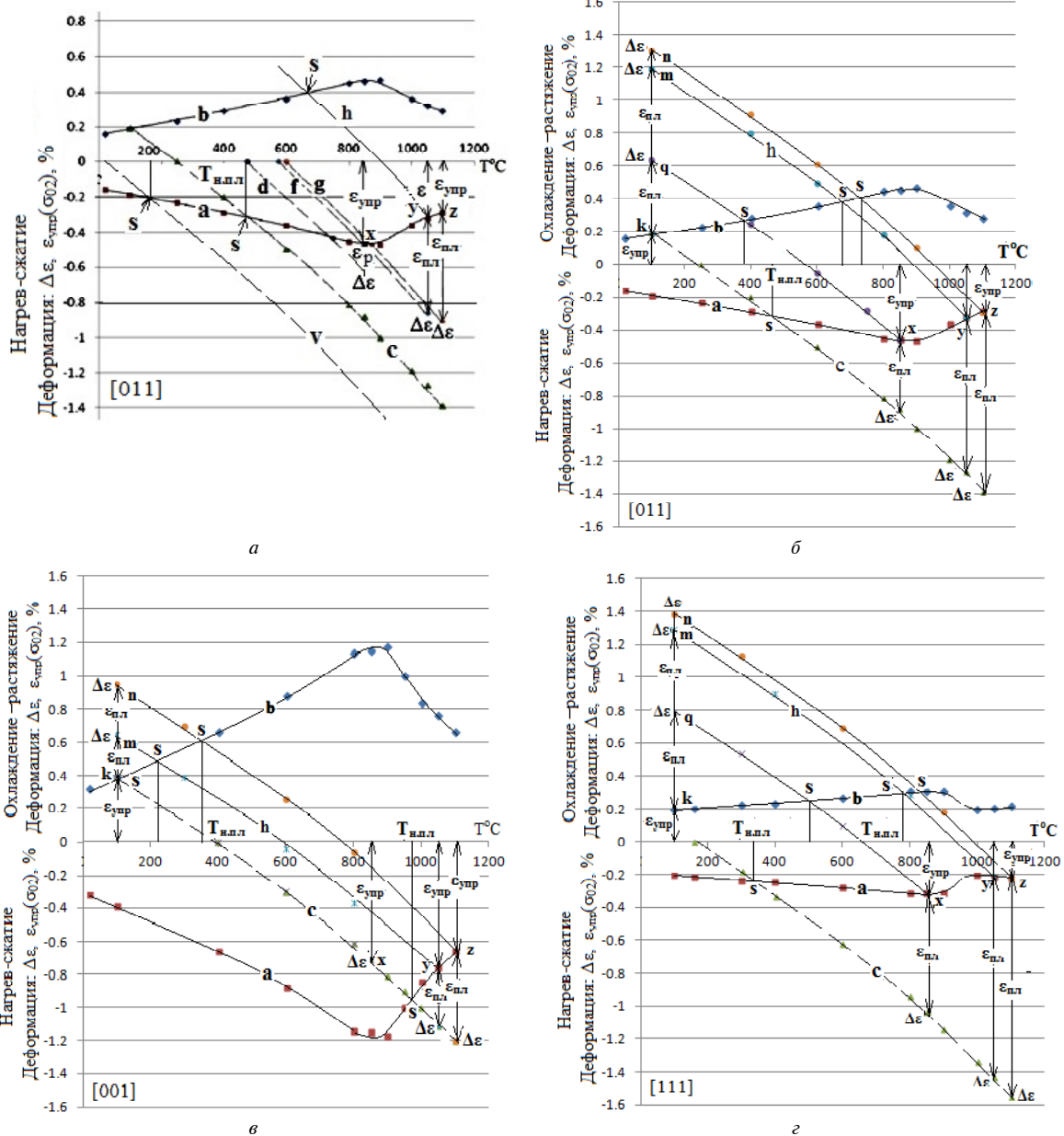


Рис. 1. ТЦ-карты монокристаллов сплава ВКНА-1В ориентировки: а – [011] – 0-полуцикл с нагружением при  $T_f$  °C; б – [011]; в – [001]; г – [111]

Таблица 1 – Данные о напряжениях в полуциклах нагрева

100→T <sub>max</sub> , °C	N [3], цикл	σ <sub>сж</sub> [3], МПа	T <sub>н.пл</sub> , °C	σ <sub>н.пл</sub> , МПа	σ <sub>02</sub> (850), МПа	σ(T <sub>max</sub> ), МПа
Ориентировка оси нагружения [001]						
100→850	1276	<b>570</b>	-	-	-	596
100→1050	61	<b>460</b>	970	610		505
100→1100	242	<b>410</b>				415
Ориентировка оси нагружения [111]						
100→850	1997	<b>570</b>	330	628	705	670
1050→100	107	<b>500</b>				360
1100→100	225	<b>580</b>				360
Ориентировка оси нагружения [011]						
100→850	428	<b>800</b>	480	676	795	768
100→1050	204	<b>430</b>				454
100→1100	171	<b>430</b>				392

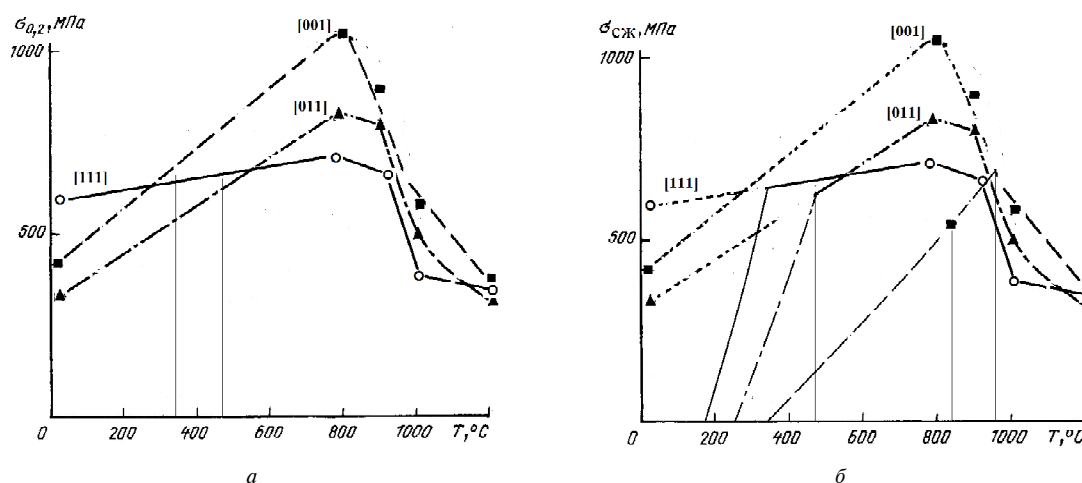


Рис. 2. а – температурная зависимость предела текучести  $\sigma_{02}(T)$  монокристаллов жаропрочного сплава ВКНА-1В; б – схема изменения напряжений сжатия в полуцикле нагрева при полном стеснении  $\epsilon_0$

Сделать по результатам сравнения однозначные выводы, каким напряжениям соответствуют измеренные  $\sigma_{сж}$ , не представляется возможным. Практически все значения  $\sigma_{сж}$  много меньше, чем  $\sigma_{02}(850)$  и  $\sigma_{н.пл}$ . Исключением является результат с хорошего совпадения  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma(T_{max})$  в полуцикле испытаний монокристаллов [001] по режиму 100→850 °C, где деформация была только упругой. Другой позитивный результат состоит в том, что значения  $\sigma_{сж}$  у монокристаллов одной ориентировки были почти одинаковыми при всех трех режимах нагрева 100→T<sub>max</sub>. Это согласуется с данными ТЦ-карт и с логичным предположением, что изменение  $\Delta\epsilon \sim \varphi(T)$  в полуцикле нагрева с большей величиной T<sub>max</sub> повторяет ее изменение в полуцикле с меньшей T<sub>max</sub> до этой температуры.

2. Далее рассмотрим развитие деформации в полуциклах охлаждения (табл. 2). Как видно из ТЦ-карт (рис. 1, б–д), кривые изменения  $\Delta\epsilon \sim \varphi(T)$  пересекают кривые б ( $\epsilon_{упр}(\sigma_{02}) \sim f(T)$ ), соответствующие монокристаллам ориентировок [011],

[001] и [111], при разных  $T = T_{н.пл}$ , где  $\sigma = \sigma_{н.пл}$  (см. табл. 2). Затем в каждом случае по ходу уменьшения T от T<sub>н.пл</sub> до 100 °C напряжения  $\sigma = \sigma_{02}$  только уменьшаются. Поэтому можно полагать, что максимальные напряжения  $\sigma_{max}$  в полуцикле охлаждения должны быть хотя бы равны  $\sigma_p = \sigma_{н.пл}$ . Другие варианты не просматриваются. Однако, как видно из табл. 2, измеренные значения  $\sigma_p$  [2], существенно ниже  $\sigma_{н.пл}$ , хотя следовало бы ожидать даже более высокие напряжения, чем  $\epsilon_{02}(T_{н.пл})$ , т. к. из-за достаточно большой величины пластической деформации  $\epsilon_{пл}$  (до 1%) при охлаждении от T<sub>н.пл</sub> должно быть сильное деформационное упрочнение, присущее сплаву ВКНА-1В в этой области T.

Исключение составляют результаты испытаний монокристаллов [111] при режимах 850 и 1050→100 °C, где совпадение можно считать вполне хорошим. Однако значение  $\sigma_p = 320$  МПа, которое является средним по трем образцам, полученное в испытаниях по режиму 1100→100 °C, совершенно не объяснимо.

Таблица 2 – Данные о напряжениях в полуциклах охлаждения

100→T <sub>max</sub> , °C	N [3], цикл	σ <sub>p</sub> [3], МПа	T <sub>н.пл</sub> , °C	σ <sub>н.пл</sub> , МПа	σ (100), МПа
Ориентировка оси нагружения [001]					
850→100	1276	<b>560</b>	100	478	473
1050→100	61	<b>450</b>	220	572	
1100→100	242	<b>390</b>	350	673	
Ориентировка оси нагружения [111]					
850→100	1997	<b>700</b>	500	657	591
1050→100	107	<b>900</b>	760	700	
1100→100	225	<b>320</b>	820	690	
Ориентировка оси нагружения [011]					
850→100	428	<b>460</b>	380	574	403
1050→100	204	<b>420</b>	670	701	
1100→100	171	<b>420</b>	740	738	

Таким образом, приходится признать, что между результатами эксперимента и данными, полученными из ТЦ-карт, нет соответствия. Данные с ТЦ-карт, конечно же, не могут претендовать на точность, но представляемая ими последовательность появления величин и событий кажется логичной. По нашему мнению, для разрешения противоречий необходим тщательный анализ применявшейся методики испытаний [2], поскольку не представляется возможным найти объяснение многим экспериментальным данным. Например, как объяснить, что у монокристаллов ориентировки [011] зафиксированные σ<sub>сж</sub> = 800 МПа в полуцикле нагрева по режиму 100→850 °С, но только 460 МПа, когда в режиме испытаний T<sub>max</sub> = 1050 или 1100 °С. В ходе нагрева 100→1050 °С развитие деформации повторяет динамику диапазона 100→850 °С однако присущие ему σ<sub>сж</sub> = 800 МПа оказались не замеченными. Второй необъяснимый пример касается разницы значений σ<sub>p</sub> при охлаждении образцов [111] по режиму 1050→100 °С, где σ<sub>p</sub> = 900 МПа, и по режиму 1100→100 °С, где σ<sub>p</sub> = 320 МПа, хотя их кривые Δε ~ φ(T) проходят параллельно и вблизи друг друга.

Наконец, вопрос о величине измеренных в работе [2] максимальных напряжений σ<sub>сж</sub> и σ<sub>p</sub>, которые практически все существенно ниже значений предела текучести материала в средней части термических полуциклов нагрева и охлаждения. В статье [2] показано, что скорость нагрева в полуцикле составляет ~100, а охлаждения ~ 20 град/с. При полном стеснении ε<sub>0</sub> им соответствует скорость деформации образца ВКНА-1В с α<sub>ср</sub> ≈ 15\*10<sup>-6</sup>град<sup>-1</sup>, равная ~10<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup>, т. е. примерно такая же, как при механических испытаниях, где, по определению А. Н. Орлова [9], осуществляется активное нагружение образца, двигателем которого в ТЦ испытаниях служит изменение температуры. Рассчитывать на ползучесть и релаксацию напряжений, как средство компен-

сации ε<sub>0</sub> не приходится, хотя бы в полуцикле охлаждения. Измеренные величины напряжений σ<sub>сж</sub> и σ<sub>p</sub> не совместимы с присутствием пластической деформации в цикле испытаний уже хотя бы потому, что соответствующая им упругая деформация не обеспечивает компенсации стесненной ε<sub>0</sub>, которая составляет ~ 1,3%.

Считаем необходимым обратить внимание на такой параметр термического цикла, как температура перехода от упругой деформации к пластической T<sub>н.пл</sub>, которая не упоминается в исследованиях термической усталости. Однако с ней связана протяженность диапазонов T<sub>max</sub>-T<sub>н.пл</sub> при нагреве и T<sub>н.пл</sub>-T<sub>min</sub> при охлаждении, в пределах которых развивается пластическая деформация. Сравним хотя бы T<sub>max</sub>-T<sub>н.пл</sub> в испытаниях монокристаллов ориентировки [001] и [111]. У монокристаллов [001] в режимах полуцикла 100→1050 и 1100 °С температура T<sub>н.пл</sub> = 970 °С и T<sub>max</sub>-T<sub>н.пл</sub> составляет ~ 100–150 °С, к тому же вблизи T<sub>max</sub>, а у [111] – много меньше, T<sub>н.пл</sub> = 330 °С и диапазон T<sub>max</sub>-T<sub>н.пл</sub> оказывается очень растянутым, достигая 700 °С. Это, конечно, очень разные условия формирования субструктуры в ходе пластической деформации и не могут не отражаться на долговечности. Параметры T<sub>н.пл</sub>, T<sub>max</sub>-T<sub>н.пл</sub> и T<sub>н.пл</sub>-T<sub>min</sub> следует иметь в виду, планируя условия термоциклических испытаний.

Авторы выражают свою признательность О. А. Базылевой и Н. Г. Бычкову за предоставленную информацию.

### Заключение

1. Анализ с помощью ТЦ-карт развития деформации в полуциклах испытаний монокристаллов сплава ВКНА-1А по режимам 100→850, 1050 и 1100 °С показал, что в условиях полного стеснения свободной термической деформации ε<sub>0</sub> в пределах термических полуциклов должна происходить пластическая деформация ε<sub>пл</sub>.

2. Наличие пластической деформации  $\epsilon_{пл}$  в цикле не дает возможности делать какие-либо выводы о зависимости долговечности  $N$  от размаха максимальных напряжений в цикле, в связи с тем, что известна ее зависимость от  $\epsilon_{пл}$ , принцип Коффина, а разделить эффекты не представляется возможным.

Однако исключать возможность влияния напряжений, развивающихся в материале в процессе упругой и пластической деформации в ходе изменения температуры, на долговечность нет оснований, поскольку оно может проявляться на завершающей стадии разрушения в зарождении и развитии трещин.

#### Список литературы

1. Экспериментальная оценка кристаллографической анизотропии термической усталости монокристаллов сплава на основе  $Ni_3Al$  для высокотемпературных деталей АГТД / [Голубовский Е. Р., Бычков Н. Г., Хамидуллин А. Ш., Базылева О. А.] // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 244–248.
2. Третьяченко Г. Н. Разрушение материалов при циклических нагревах / Третьяченко Г. Н., Карпинос Б. С., Барило В. Г. – К. : Наукова думка 1993. – 288 с.
3. Тихомирова Е. А. Метод анализа развития деформации материалов в термоциклических испытаниях с помощью ТЦ-карт / Тихомирова Е. А., Сидохин Е. Ф. // Авиационная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 51–55.
4. Дульнев Р. А. Термическая усталость металлов // Дульнев Р. А., Котов П. И. – М. : Машиностроение, 1980. – 200 с.
5. Coffin L. F. A Study of Cyclic-thermal Stress in Ductile Metal / Coffin L.F. // Transaction of the ASME, 1954. – Vol. 76. – P. 931–950.
6. Серенсен С. В. Об оценке сопротивления термической усталости по методу варьируемой жесткости нагружения / Серенсен С. В., Котов П. И. // Заводская лаборатория, 1962. – Т. 28, № 10. – С. 1233–1238.
7. Тихомирова Е. А. О термоциклических испытаниях по методу варьируемой жесткости нагружения // [Тихомирова Е.А., Азизов Т.Н., Сидохин Ф.А., Сидохин Е.Ф.]. – Материаловедение, 2014. – № 7. – С. 13–16.
8. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава / [Дульнев Р.А., Светлов И.Л., Бычков Н.Г. и др.] // Проблемы прочности, 1988. – № 11. – С. 3–9.
9. Орлов А. Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах / Орлов А. Н. – М. : Высшая школа, 1983. – 144 с.

Поступила в редакцию 14.01.2015

#### Тихомирова О.О., Сідохін Є.Ф. Про «експериментальну оцінку кристаллографічної анізотропії термічної втоми»

*Розглянуто результати і висновки, представлені в статті «Експериментальна оцінка кристаллографічної анізотропії термічної втоми ...» [1]. За допомогою ТЦ-карт, що відображають динаміку розвитку деформації в термічному циклі, показано, що при термоциклических випробуваннях монокристалів жароміцного сплаву ВКНА-1В в напівциклах нагрівання та охолодження присутня пластична деформація. Оскільки результати дослідження не дають можливості розділити ефекти впливу пластичної деформації й розмаху напружень на довговічність, висновки статті про залежність довговічності від напружень не можна визнати обґрунтованими.*

**Ключові слова:** термічна втома, стискання, напруга, деформація.

#### Tikhomirova E., Sidokhin E. About «the experimental estimation of thermal fatigue crystallographic anisotropy»

*Results and conclusions, which are presented in article named «The experimental estimation of thermal fatigue crystallographic anisotropy» [1], are considered by mean TC-maps, which show the deformation development at thermal cycles. It is shown that some plastic deformation is developed at half-cycles of VKNA-1V alloy thermal-cyclic tests. Because the test results did not allow separate plastic deformation and stresses effects on the material lifetime we can not to agree with stress-lifetime dependence existence.*

**Key words:** thermal fatigue, constrain, stresses, plastic deformation.