

УДК 669.018, 669.224

Канд. техн. наук Т. Н. Азизов<sup>1</sup>, Е. Ф. Сидохин<sup>2</sup>,  
Е. А. Тихомирова<sup>3</sup>, Ф. А. Сидохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ММП имени В.В. Чернышева», Москва, РФ

<sup>2</sup>ООО «КБ Рентгеновские приборы», С.-Петербург, РФ

<sup>3</sup>ОАО «Климов», С.-Петербург, РФ

## О ВЛИЯНИИ ВЕРХНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЦИКЛА ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

*Анализ опубликованных сведений о результатах и технике термоциклических испытаний жаропрочных никелевых сплавов позволил установить, что значительное падение долговечности в том случае, когда максимальная температура  $T_{max}$  в цикле испытаний превышает 900 °С, связано с увеличением степени пластической деформации в полуцикле охлаждения вследствие существенного уменьшения предела текучести сплавов в высокотемпературной области.*

**Ключевые слова:** долговечность, полуцикл испытаний, предел текучести.

Термическая усталость, согласно существующим представлениям, есть растянутый во времени процесс разрушения, развивающийся вследствие стеснения термической деформации материала при многократно повторяющихся тепло-сменах. Его рассматривают, как последовательное от цикла к циклу накопление повреждений, приводящее материал к предельному состоянию, за которым следует этап разрушения [1, с. 14, 17]. Хотя понятию повреждение определение не дано, его справедливо связывают с пластической деформацией, которая от цикла к циклу изменяет субструктурное состояние материала, формируя благоприятные условия для зарождения и развития трещин [2]. Эмпирическая зависимость Коффина связывает долговечность материала (число циклов до разрушения  $N_p$ ) с суммарной деформацией в цикле [1, с. 56]. При этом суммируются очень разные состояния субструктуры материала: продукт высокотемпературного сжатия и низкотемпературного растяжения. Однако ситуация в каждом из полуциклов представляется еще сложнее: деформация растяжения развивается в материале с субструктурой, которая сформировалась в ходе высокотемпературного сжатия, а высокотемпературное сжатие в субструктуре, достигнутой при растяжении. Особенно существенно это проявляется, когда при термоциклических (ТЦ) испытаниях температурный

диапазон цикла включает температуру резкого падения предела текучести  $\sigma_{0,2}$  наблюдаемого у жаропрочных никелевых сплавов в районе 900 °С. Например, у сплава ЖС32  $\sigma_{0,2} = 980$  МПа при 20 °С; 860 при 900 °С и 620 при 1000 °С; 400 при 1100 °С [3].

При анализе результатов термоциклических испытаний сплавов ЖС32 [4], ЖС36 [5] и ВКНА-1В [6], ЖС6Ф [7] обращает на себя внимание значительно меньшая долговечность  $N_p$  сплавов в том случае, когда максимальная температура ( $T_{max}$ ) диапазона испытаний ( $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ ) выше 900 °С. В таблицах 1 и 2 приведены некоторые результаты испытаний для монокристаллов с кристаллографической ориентировкой оси около [001], поскольку именно она регламентирована у лопаток турбин. При этом заметим, что испытания сплавов ЖС32, ЖС36, с одной стороны, и сплавов ВКНА-1В, ЖС6Ф, с другой, проведены в существенно разных условиях. Сплавы ЖС32, ЖС36 испытывали при полном стеснении ( $C \sim \infty$ ) плоских корсетных образцов и величине упругопластической деформации в цикле ( $\Delta \epsilon$ ), составляющей несколько процентов. Испытания сплавов ВКНА-1В, ЖС6Ф выполняли на цилиндрических образцах с варьированием жесткости нагружения, обеспечивая  $\Delta \epsilon = 0,6; 1,0$  и  $1,3$  %, где  $\Delta \epsilon = 1,3$  % соответствует полному стеснению ( $C \sim \infty$ ).

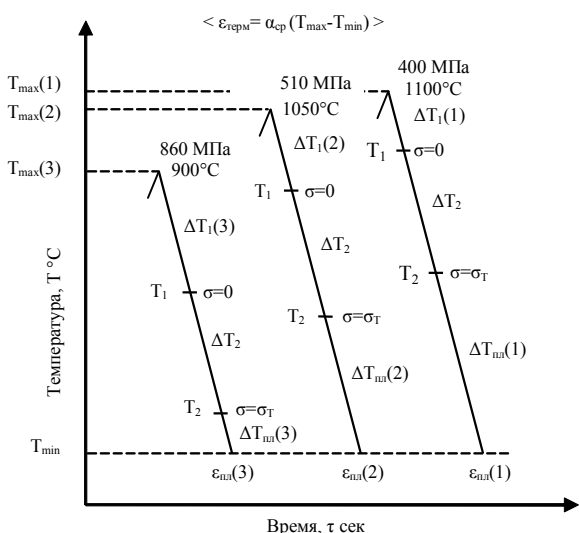
**Таблица 1** – Влияние максимальной температуры цикла на долговечность корсетных образцов

№ п/п	ЖС32-ВИ [4] (корсетный образец)			ЖС36 [5] (корсетный образец)		
	$T_{min}$	$T_{max}$	$N_p(ср)$	$T_{min}$	$T_{max}$	$N_p$
1	150	900	2204	150	900	560
2	200	1050	33	250	1000	95
3	200	1100	24	-	-	-

**Таблица 2** – Влияние максимальной температуры цикла на долговечность цилиндрических образцов

№ п/п	ВКНА-1В $T_{min} = 100\text{ }^\circ\text{C}$		ЖС6Ф $T_{min} = 100\text{ }^\circ\text{C}$	
	$T_{max}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$N_p\text{ (стр)}$	$T_{max}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$N_p\text{ (стр)}$
Упругопластическая деформация в цикле $\Delta\varepsilon = 1,3\text{ }%$				
1	850	1270	950	1546
2	1050	61	-	-
3	1100	242	-	-
Упругопластическая деформация в цикле $\Delta\varepsilon = 1,0\text{ }%$				
4	850	4580	950	4693
5	1050	872	-	-
6	1100	1324	-	-
Упругопластическая деформация в цикле $\Delta\varepsilon = 0,6\text{ }%$				
7	850	7120	950	27800
8	1050	3517	-	-
9	1100	1920	-	-

По нашему мнению, снижение долговечности  $N_p$  в том случае, когда  $T_{max}$  превышает  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , происходит не только из-за увеличения интервала  $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ , но также вследствие существенного падения предела текучести жаропрочных никелевых сплавов. Этот эффект имеет ту же самую природу, что и снижение  $N_p$  в испытаниях с выдержкой при верхней температуре цикла. А именно: увеличение продолжительности температурного интервала, в котором происходит пластическая деформация в полуцикле охлаждения, и, соответственно, увеличение пластической деформации есть следствие уменьшения продолжительности температурного интервала, в котором снимаются напряжения сжатия от предшествующего полуцикла [8]. Предложенное объяснение иллюстрирует схема, представленная на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема, поясняющая увеличение продолжительности температурного интервала  $\Delta T_{nl}$  и величины пластической деформации  $\varepsilon_{nl}$  при увеличении  $T_{max}$  ( $\varepsilon_{nl(1)} > \varepsilon_{nl(2)} > \varepsilon_{nl(3)}$ )

Полуцикл охлаждения  $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ , как и нагрева, включает три температурных интервала: интервал  $\Delta T_1$  от  $T_{max}$  до  $T_1$ , на протяжении которого снимаются-уменьшаются до нуля ( $\sigma = 0$ ) напряжения сжатия от предшествующего полуцикла нагрева [1, с. 19]; интервал  $\Delta T_2 = T_2 - T_1$  роста напряжений растяжения до уровня предела упругости и предела текучести ( $\sigma = \sigma_{02}$ ) и начала пластической деформации и интервал  $\Delta T_{nl}$ , где протекает пластическая деформация, заканчивающаяся по достижении  $T_{min}$ . Интервал  $T_2$  отличается совсем немного при разных  $T_{max}$  и почти одинаков при охлаждении и нагреве. Протяженность же интервала  $T_1$  целиком зависит от величины напряжений  $\sigma_{сж}$ , которые достигнуты в конце полуцикла нагрева и практически равны  $\sigma_{02}(T_{max})$ , поскольку упрочнение при таких температурах не изменяет их сколь-нибудь существенно. При охлаждении от  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , в силу известной температурной зависимости  $\sigma_{02}$ , должны сниматься напряжения сжатия, которые почти на треть больше, чем при охлаждении от  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , и вдвое больше, чем при  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ . Вследствие этого продолжительность интервала  $T_1$  для температур  $T_{max}$ , которые выше  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , оказывается меньше, но при этом на столько же возрастает интервал  $T_{nl}$ , поскольку  $T = \text{const}$ , и увеличивается пластическая деформация в ходе охлаждения ( $\varepsilon_{nl}$ ). В результате этого и происходит снижение долговечности  $N_p$ , хотя бы в соответствии с известной эмпирической зависимостью Коффина. Следует обратить внимание, что эффект снижения долговечности наблюдается как при испытаниях цилиндрических, так корсетных образцов. Больше того, как видно из таблицы 2, он проявляется независимо от величины задаваемой упругопластической деформации в цикле  $\Delta\varepsilon$ . Представляло бы интерес проверить предложенное объяснение. Один из пу-

тей для этого – провести испытания в температурной области, не содержащей резкого изменения предела текучести, например, сравнить данные, получаемые для  $T_{\max} = 900$  °С и более низкой температуры. Второй вариант – в испытаниях с  $T_{\max} = 1050$  или  $1100$  °С поднять минимальную температуру цикла. Опубликованные данные для сплава ВКНА-1В не дают возможности проверить предложенное объяснение, хотя информация могла бы быть весьма надежной, т. к. в этих испытаниях при разных значениях  $T_{\max}$  сохраняется  $\Delta\varepsilon$ . Косвенно о правильности объяснения дают возможность судить испытания на корсетных образцах, выполненные при  $T_{\max} = 1050$  и  $1100$  С, но  $T_{\min} = 500, 600$  и  $700$  °С [4]. Значения долговечности  $N_p$  при этих режимах испытаний получились существенно выше, чем в испытаниях с  $T_{\min} = 200$  °С, но приходится учитывать, что в этом случае одновременно с сокращением протяженности температурного интервала пластической деформации уменьшается задаваемая величина  $\Delta\varepsilon$ . Исключение составляет результат, полученный на сплаве ЖС36, но он единственный. Как видно из табл. 1, повышение верхней температуры цикла от  $900$  до  $1000$  °С привело к снижению долговечности почти в 6 раз, хотя температурный интервал испытаний ( $750$  °С), оставался неизменным.

Наконец, следует заметить, что согласно предложенной гипотезе, эффект падения долговечности должен наблюдаться только в том случае, если деформация в ходе термической усталости имеет характер упругопластической. Если же стеснение термической деформации протекает исключительно в упругой области, то условия для его появления отсутствуют. В этой связи для практики приобретает очень важное значение, решение вопроса – имеет ли место термическая усталость в условиях реальной работы лопаток и каков характер деформации.

#### Заключение

Опубликованные данные исследований термической усталости жаропрочных никелевых сплавов указывают на снижение долговечности, когда максимальная температура цикла испытаний превышает  $900$  °С. Анализ показал, что причиной снижения является не только увеличения температурного диапазона испытаний, но и падение предела текучести этих сплавов в температурной области выше  $900$  °С. Это дополнительное снижение долговечности объясняется тем, что

в полцикле охлаждения увеличивается продолжительность температурного диапазона протекающей пластической деформации и, следовательно, увеличивается достигаемая деформация, что происходит вследствие уменьшения диапазона снятия напряжений сжатия от предшествующего полцикла нагрева. Важность этого эффекта в том, что он дополняет пластическую деформацию, которая происходит при охлаждении, т. е. при высоком уровне растягивающих напряжений, которые способствуют возникновению и распространению трещин и разрушению.

#### Список литературы

1. Дульнев Р. А. Термическая усталость металлов / Дульнев Р. А., Котов П. И. – М. : Машиностроение, 1980. – С. 14–17, 19, 56.
2. Розенберг В. М. Ползучесть металлов / Розенберг В. М. – М. : Металлургия, 1967. – 242 с.
3. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / [Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др.]. – М. : Машиностроение, 1997. – 299 с.
4. Сопротивление деформированию и разрушению монокристаллических сплавов при статическом и термоциклическом нагружении / [Гецов Л. Б., Рыбников А. И., Семенов А. С. и др.]. // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 3, сент. – С. 53–62.
5. Гецов Л. Б. Прогрессирующее деформирование материалов при термоциклическом нагружении / [Гецов Л. Б., Рыбников А. И., Семенов А. С.] // Труды НПО ЦКТИ «Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования». – С.-Пб, 2009. – в. 296, – С. 105–119.
6. 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.
7. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава // Проблемы прочности. – 1988. – № 11. – С. 3–9.
8. Тихомирова Е. А. Влияние высокотемпературной выдержки на термическую усталость жаропрочных сплавов / Тихомирова Е. А., Азизов Т. Н., Сидохин Е. Ф. // Технология металлов. – 2013. – № 6. – С. 34–37.

Поступила в редакцию 11.07.2013

**Азізов Т.Н., Сідохін Є.Ф., Тихомірова О.О., Сідохін Ф.А. Про вплив верхньої температури циклу при термоциклічних випробуваннях нікелевих жароміцних сплавів на їх довговічність**

*Аналіз опублікованих відомостей про результати і техніці термоциклічних випробувань жароміцних нікелевих сплавів дозволив встановити, що значне падіння довговічності в тому випадку, коли максимальна температура  $T_{max}$  в циклі випробувань перевищує  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , пов'язано із збільшенням ступеня пластичної деформації в напівциклі охолодження внаслідок істотного зменшення межі текучості сплавів у високотемпературній області.*

**Ключові слова:** довговічність, напівцикл випробувань, межа текучості.

**Azizov T., Sidohin E., Tihomirova E., Sidohin F. On the influence of the upper cycle temperature in the temperature cycling tests of nickel superalloys their longevity**

*Analysis of the published information on the results and techniques cycling test heat-resistant nickel alloys revealed that a significant drop in durability when the maximum temperature  $T_{max}$  in the test cycle exceeds  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , due to the increasing degree of plastic deformation in the cooling half-cycle due to significant reduction of the yield strength alloys in the high temperature region.*

**Key words:** life time, testing half-cycle, yield stress.