

УДК 669.018+669.224

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ОТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА В ЦИКЛЕ ИСПЫТАНИЙ

© 2014 Е.А. Тихомирова¹, Е.Ф. Сидохин²,

¹Открытое акционерное общество «Климов», г. Санкт-Петербург

²Конструкторское бюро «Рентгеновские приборы», г. Санкт-Петербург

Анализ результатов термоциклических испытаний жаропрочных сплавов для лопаток турбин показывает значительно меньшую долговечность N_p в том случае, когда максимальная температура (T_{max}) диапазона испытаний ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$) выше 900°C. Рассмотрен термический цикл, включающий полуциклы охлаждения и нагрева, на протяжении которых возможно возникновение пластической деформации. Полуцикл охлаждения включает три температурных участка: интервал снятия напряжений сжатия от предшествующего полуцикла, интервал роста напряжений растяжения до уровня предела упругости (текучести) и интервал пластической деформации. Интервал снятия напряжений сжатия зависит от величины напряжений, которые достигнуты в полуцикле нагрева (при T_{max}) и равны $\sigma_{02}(T_{max})$. Для жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для лопаток турбин, при охлаждении от температур менее 900°C должны сниматься напряжения сжатия, которые почти на треть больше, чем при охлаждении от 1000°C, и вдвое больше, чем при 1100°C, что видно из графиков температурной зависимости предела текучести жаропрочных сплавов. Вследствие этого протяжённость интервала снятия напряжений сжатия в полуцикле охлаждения для температур T_{max} выше 900°C оказывается меньше. При этом на столько же возрастает интервал, в котором протекает пластическая деформация, достигаемая в ходе охлаждения ($\epsilon_{пл}$). В результате этого происходит снижение долговечности N_p .

Долговечность, полуцикл испытаний, предел текучести.

Термическая усталость, согласно существующим представлениям, есть растянутый во времени процесс разрушения, развивающийся вследствие стеснения свободной термической деформации материала при многократно повторяющихся теплосменах. Его рассматривают как последовательное, от цикла к циклу, накопление повреждений, приводящее материал к предельному состоянию, за которым следует этап разрушения [1]. Хотя понятие этих «мифических» повреждений определение не дано, его справедливо связывают с пластической деформацией, которая от цикла к циклу изменяет состояние субструктуры материала, формируя условия, благоприятные для зарождения и развития трещин [2]. Эмпирическая зависимость Коффина связывает долговечность материала (число циклов до разрушения N_p) с суммарной пластической деформацией $\epsilon_{пл}$ в цикле [1]: деформации сжатия при нагреве и растяжения при охлаждении. Однако при этом «суммируются» очень разные состояния субструк-

туры материала: продукт высокотемпературного сжатия и низкотемпературного растяжения. Ситуация в каждом из полуциклов представляется ещё сложнее: деформация растяжения развивается в материале с субструктурой, которая сформировалась в ходе высокотемпературного сжатия, а высокотемпературное сжатие - в материале с дефектной структурой, достигнутой при растяжении. Особенно существенно это должно проявляться, когда при термоциклических (ТЦ) испытаниях температурный диапазон цикла включает температуру резкого падения предела текучести σ_{02} . У жаропрочных никелевых сплавов такое падение наблюдается в районе 900°C. В качестве примера на рис.1 показано изменение σ_{02} с температурой у сплавов ЖС32 [3] и ВКНА-1В.

При анализе результатов термоциклических испытаний жаропрочных сплавов для лопаток турбин, например, ЖС32 [4], ЖС36 [5] и ВКНА-1В [6], обращает на себя внимание значительно меньшая долговечность N_p в том случае, когда макси-

мальная температура (T_{max}) диапазона испытаний ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$) выше 900°C . В табл. 1, 2 приведены некоторые результаты испытаний монокристаллов этих сплавов с кристаллографической ориентировкой оси около [001], поскольку именно

она регламентирована у лопаток турбин. При этом заметим, что испытания сплавов ЖС32, ЖС36 (табл.1), с одной стороны, и сплавов ВКНА-1В, ЖС6Ф (табл.2), с другой, отличаются по характеру осуществления пластической деформации.

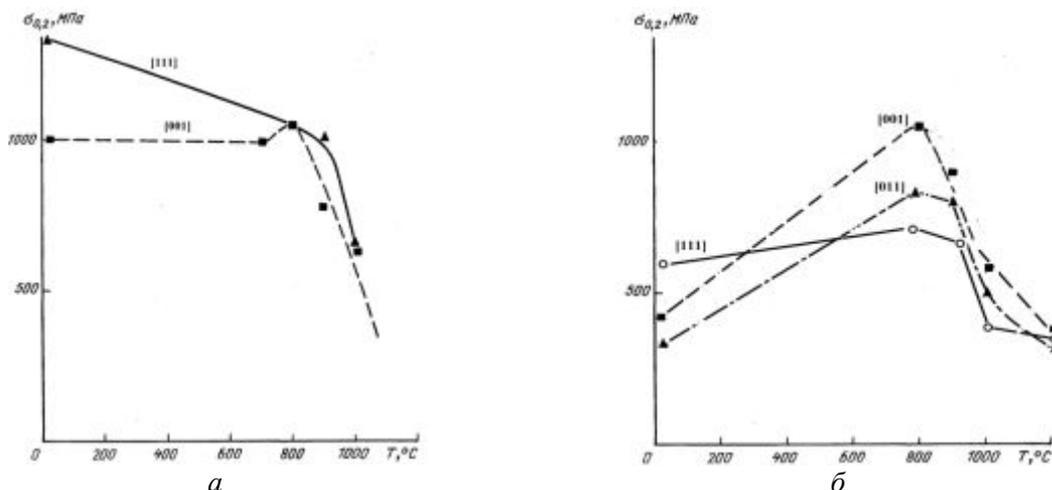


Рис.1. Температурная зависимость предела текучести σ_{02} монокристаллов жаропрочных сплавов ЖС32 (а) и ВКНА-1В (б)

Таблица 1 - Влияние максимальной температуры цикла T_{max} на долговечность корсетных образцов

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

Таблица 2 - Влияние максимальной температуры цикла T_{max} на долговечность цилиндрических образцов

N п/п	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	ВКНА-1В [6] $T_{min}=100^{\circ}\text{C}$					
		$\Delta\varepsilon$	N_P (ср)	$\Delta\varepsilon^*$	N_P (ср)	$\Delta\varepsilon^{**}$	N_P (ср)
1	850	1.12	1270	-	4580	-	7120
2	1050	1.52	61	-	872	-	3517
3	1100	1.6	242	-	1324	-	1920

$\Delta\varepsilon^*$ и $\Delta\varepsilon^{**}$ - значения $\Delta\varepsilon$ не приведены в [6], но $\Delta\varepsilon^*$ соответствует $C < \infty$, а $\Delta\varepsilon^{**}$ - $C < < \infty$

Сплавы ЖС32, ЖС36 испытывали при полном стеснении ($C \sim \infty$) плоских корсетных образцов и величине упругопластической деформации в цикле ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{пл} + \varepsilon_{упр}$, где $\varepsilon_{упр}$ - упругая деформация), достигавшей нескольких процентов. Сплав ВКНА-1В испытывали на цилиндрических образцах методом варьирования жёсткости нагружения, создавая при полном стеснении упругопластическую деформацию $\Delta\varepsilon = 1,12\%$ при $T_{max} = 850^{\circ}\text{C}$;

1,52% при 1050°C и 1,6% при 1100°C (по нашей оценке).

По нашему мнению, меньшая долговечность N_P в испытаниях жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) в том случае, когда T_{max} превышает 900°C , происходит не только из-за того, что шире интервал $\Delta T = T_{max} - T_{min}$, но также вследствие отмеченного выше существенного падения предела текучести σ_{02} . Этот эффект имеет ту же самую природу, что и снижение N_P в испытаниях с выдержкой при верхней

температуре цикла [7]. Как показано в [7], снятие достигнутых в полцикле нагрева напряжений сжатия (и $\epsilon_{упр}^{сж}$), вследствие релаксации во время выдержки при T_{max} , увеличивает в следующем затем полцикле охлаждения продолжительность температурного интервала $\Delta T_{пл}$, в котором происходит пластическая деформация, и, соответственно, увеличивает $\epsilon_{пл}$ в дополнение к тому, что получено из-за преобразования $\epsilon_{упр} \rightarrow \epsilon_{пл}$ при релаксации. В результате такого общего увеличения $\epsilon_{пл}$ долговечность N_p должна снижаться согласно принципу Коффина [7]. Аналогично по своей сути предлагаемое нами объяснение того, почему в ТЦ испытаниях ЖНС (без выдержки при T_{max}) долговечность N_p оказывается ниже, если T_{max} цикла выше 900°C . Рассмотрим схему, приведенную на рис.2, где показано изменение протяжённости температурных интервалов в полцикле охлаждения от различных T_{max} .

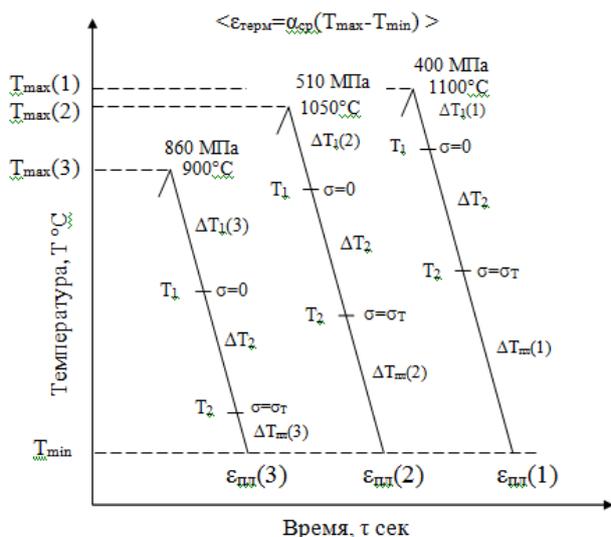


Рис.2. Схема, поясняющая увеличение продолжительности температурного интервала пластической деформации $\Delta T_{пл}$ и величины пластической деформации $\epsilon_{пл}$ при увеличении T_{max} в цикле [$\epsilon_{пл}(1) > \epsilon_{пл}(2) > \epsilon_{пл}(3)$]

Скорость изменения температуры в полциклах такова, что деформация, развивающаяся вследствие стеснения, протекает со скоростью $10^{-3} - 10^{-4}$ сек $^{-1}$. Это примерно соответствует скорости деформации изотермических механических испытаний и их последовательной упругой и пластической деформации. Принципиаль-

ным отличием неизотермических условий является сопутствующее температуре изменение предела текучести и модуля упругости испытываемого материала, что оказывается причиной многих особенностей процесса термической усталости. Полцикл охлаждения $\Delta T = T_{max} - T_{min}$, как и нагрева, включает три температурных интервала: интервал $\Delta T_1 = T_{max} - T_1$, на протяжении которого снимаются и уменьшаются до нуля напряжения сжатия от предшествующего полцикла нагрева; интервал $\Delta T_2 = T_1 - T_2$, когда напряжения растяжения растут до уровня предела упругости σ_{005} (или σ_{02}) и начала пластической деформации, и интервал $\Delta T_{пл} = T_2 - T_{min}$, когда протекает пластическая деформация, которая заканчивается по достижении T_{min} . Интервал ΔT_2 отличается при разных T_{max} (но немного) и почти одинаков при охлаждении и нагреве. Протяжённость же интервала ΔT_1 целиком зависит от величины напряжений $\sigma_{сж}$ в конце полцикла нагрева, практически равных $\sigma_{02}(T_{max})$, поскольку упрочнение при таких температурах не изменяет их сколь-нибудь существенно. Величина напряжений сжатия $\sigma_{сж}$, которые снимаются при охлаждении от разных T_{max} , у ЖНС отличается весьма существенно. Когда T_{max} менее 900°C , они почти на треть больше, чем при охлаждении от 1000°C , и вдвое больше, чем от 1100°C . Вследствие этого продолжительность интервала ΔT_1 для температур T_{max} , которые выше 900°C , оказывается меньше, но при этом на столько же возрастает интервал $\Delta T_{пл}$ (поскольку $\Delta T = \text{const}$) и увеличивается $\epsilon_{пл}$, достигаемая в ходе охлаждения. В результате этого в ТЦ испытаниях с $T_{max} = 900^\circ\text{C}$ долговечность N_p должна быть ниже в соответствии с эмпирической зависимостью Коффина. В качестве примера рассмотрим ТЦ испытания монокристаллов сплава ВКНА-1В с ориентировкой оси по [111] в интервале температур $100 \leftrightarrow 850^\circ\text{C}$ и $100 \leftrightarrow 1050^\circ\text{C}$, где, по нашей оценке, упругопластическая деформация $\Delta \epsilon$ в цикле составляла 1,2 и 1,52%, соответственно. При режиме испытаний

100↔850°C долговечность N_p была 1997 циклов, а 100↔1050°C $N_p=107$. Процесс нагрева при цикле испытаний завершался этапом пластической деформации, и можно полагать, что напряжения в конце цикла достигали $\sigma_{сж}=\sigma_{02}=670$ МПа при 850°C и 360 МПа при 1050°C, а в конце полуцикла охлаждения при 100°C - 590 МПа.

Произведя оценку $\epsilon_{пл}$, как предложено в [1], получаем, что в интервале испытаний 100↔850°C величина $\epsilon_{пл}(850) = 0,65\%$, а в 100↔1050°C - $\epsilon_{пл}(1050) = 1,15\%$. Разница между ними (0.5%) включает увеличение $\epsilon_{пл}$ на 0,4%, вследствие большей на 200°C длины интервала испытаний $\Delta T=T_{max}-T_{min}$, и добавку в 0,1% в связи с увеличением на 80°C длины интервала $\Delta T_{пл}$ из-за такого же сокращения ΔT_1 , т.к. при охлаждении от 1050°C снимаются более низкие напряжения (360 МПа). Казалось бы, добавка невелика, но она примерно равна тому, что получается в результате релаксации напряжений в случае выдержки при T_{max} , которая, как известно [1], приводит к снижению долговечности.

Следует обратить внимание, что эффект снижения долговечности наблюдается как при испытаниях как цилиндрических, так корсетных образцов (табл.1 и табл.2). Больше того, как видно из табл.2, он проявляется независимо от величины задаваемой упругопластической деформации в цикле $\Delta\epsilon$, что объясняется возрастанием доли пластической деформации при охлаждении. Интересен результат, полученный на сплаве ЖС36, но он единственный (табл.1): повышение верхней температуры цикла от 900°C до 1000°C привело к снижению долговечности почти в 6 раз, хотя температурный интервал испытаний был одинаковым (750°C) в обоих испытаниях.

Для проверки предложенного объяснения можно: 1) провести испытания в температурной области, не содержащей резкого изменения предела текучести, например, сравнить данные, получаемые для $T_{max}=900^\circ\text{C}$ и более низкой температуры при одинаковом ΔT ; 2) в испытаниях с $T_{max}=1050^\circ\text{C}$ или 1100°C поднять минимальную температуру цикла, сохраняя ΔT .

У эффекта возрастания $\epsilon_{пл}$ в полуцикле охлаждения при одинаковой величине $\Delta\epsilon$ для температур T_{max} , превышающих 900°C, имеется негативное последствие: $\epsilon_{пл}$ в полуцикле охлаждения оказывается существенно больше, чем в полуцикле нагрева, что отражается на динамике роста односторонне накопленной деформации.

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.

На основании анализа результатов термоциклических испытаний при исследовании термической усталости жаропрочных никелевых сплавов установлено, что одной из причин снижения долговечности при высоких значениях максимальных температур цикла может быть увеличение протяженности интервала пластической деформации в цикле охлаждения вследствие достаточно резкого падения предела текучести этих сплавов в высокотемпературной области. Важность этого эффекта состоит в том, что пластическая деформация в ходе охлаждения протекает при высоком уровне растягивающих напряжений и её увеличение способствует возникновению и распространению трещин и разрушению.

Библиографический список

1. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.
2. Розенберг В.М. Ползучесть металлов. М.: Металлургия, 1967. 242 с.
3. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Моно-

кристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 299 с.

4. Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Семенов А.С., Григорьев А.В., Тихомирова Е.А. Сопротивление деформированию и разрушению монокристаллических сплавов при статическом и термоциклическом нагружении // Надёжность и безопасность энергетики. 2012. № 3(18). С. 53-62.

5. Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Семенов А.С. Прогрессирующее деформирование материалов при термоциклическом нагружении // Труды НПО ЦКТИ «Прочность материалов и ресурс элементов энергообо-

рудования». Выпуск 296. СПб.: НПО ЦКТИ, 2009. С. 105-119.

6. 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 // Вестник двигателестроения. 2011. № 2. С. 244-248.

7. Тихомирова Е.А, Азизов Т.Н., Сидохин Е.Ф. Влияние высокотемпературной выдержки на термическую усталость жаропрочных сплавов // Технология металлов. 2013. № 6. С. 34-37.

Информация об авторах

Тихомирова Елена Александровна, кандидат технических наук, ОАО «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург. E-mail: tikhomirova00@mail.ru. Область научных интересов: материаловедение жаропрочных сплавов.

Сидохин Евгений Федорович, инженер, ООО «Конструкторское бюро Рентгеновских приборов», г. Санкт-Петербург. E-mail: esidohin@yandex.ru. Область научных интересов: рентгеновское материаловедение, физика металлов.

THE INFLUENCE OF MAXIMUM TEMPERATURE OF HEATING ON THE THERMAL FATIGUE OF NICKEL HEAT-RESISTANT ALLOYS UNDER THERMOCYCLIC TESTS

© 2014 E.A. Tikhomirova¹, E.F. Sidokhin²,

¹Open Joint-Stock Company “KLIMOV”, Saint-Petersburg, Russian Federation

²Joint-Stock Company «KB X-ray Instruments», Saint-Petersburg, Russian Federation

The analysis of high temperature resistance alloys thermocyclic tests show that the lifetime N_p is less when maximum temperature T_{max} in test cycles ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$) is more 900°C. In most test cases thermal cycle contents the plastic deformation. The cooling half-cycle includes three temperature intervals: first – where heating half-cycle compression stress decrease take place, second – where tension stresses are increased to yield stress σ_{02} and plastic deformation begin, and third interval - plastic deformation region, which is finished at minimum temperature of cycle T_{min} . The stress decrease interval length depends from value of stress, which is reached in precede heating half-cycle and, as we consider, equal $\sigma_{02}(T_{max})$. High temperature resistance alloys are characterized by yield stress σ_{02} sharp decrease at temperatures which is more 900°C. Because at cooling from temperatures, which is lower 900°C, stresses, which must to decrease, are larger on one third them at 1000°C and on half them at 1100°C. Therefore third temperature interval is shorter at cooling from temperature which is more 900°C, plastic deformation is more and lifetime N_p smaller.

Thermal deformation, elastic-plastic deformation, thermal fatigue.

References

1. Dulnev R.A., Kotov P.I. Termicheskaya ustalost metallov [Thermal fatigue of metals] Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 200 p.
2. Rozenberg V.M. Polzuchest metallov [Creep of metals] Moscow: Metallurgiya Publ., 1967. 242 p.
3. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B., Toloraiya V.N., Gavrilin E.B. Monokristally nikelovykh garoprochnykh splavov [Single crystals of base-Ni superalloys]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1997. 336 p.
4. Gecov L.B., Rubnikov A.I., Semenov A.S., Grigorev A.V., Tikhomirova E.A. The deformation resistance and fracture of single crystals at static and thermal-cyclic tests // Nadezhnost' i Bezopasnost' Energetiki. 2012. No. 3(18). P. 53-62. (In Russ.)
5. Gecov L.B., Rubnikov A.I., Semenov A.S. Material development deformation at thermal-cyclic tests // Trudy NPO CKTI «Prochnost materialov I resurs elementov energooborudovaniya. V. 296. SPb.: NPO TsKTI Publ., 2009. P. 105-119. (In Russ.)
6. Golubovskiy E.R., Bychkov N.G., Khamidullin A.Sh., Bazyleva O.A. The experimental estimation of thermal fatigue crystallographic anisotropy of Ni₃Al single-crystals for high-temperature details of AGTD // Vestnik dvigatelestroeniya. 2011. No. 2. P. 244-248. (In Russ.)
7. Tikhomirova E.A., Azizov T.N., Sidokhin E.F. The influence of high temperature stand on heat resistance alloys thermal fatigue // Tekhnologiya metallov. 2013. No. 6. P. 34-37. (In Russ.)

About the authors

Tikhomirova Elena Aleksandrovna, Candidate of Science (Engineering), engineer, Open Joint-Stock Company “KLIMOV”, Saint-Petersburg. E-mail: tixomirova00@mail.ru. Area of Research: the metallurgy of high resistance alloys.

Sidokhin Evgeni Fedorovich, engineer, Joint-Stock Company «KB X-ray Instruments», Saint-Petersburg. E-mail: esidohin@yandex.ru. Area of Research: the physic of metals.