

УДК 669.018.44:669.245

*М.С. Беляев<sup>1</sup>, М.А. Горбовец<sup>1</sup>, М.М. Бакрадзе<sup>1</sup>***ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ НА МЦУ ПРИ ЖЕСТКОМ НАГРУЖЕНИИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ175**

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-4-4

*Исследована малоцикловая усталость жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 при заданной полной деформации и коэффициенте асимметрии цикла  $R=0$ , амплитуде деформации  $\varepsilon_a=0,4-0,6\%$  и температурах 20 и 650°C. Рассмотрены параметры циклического упругопластического деформирования сплава при выбранных условиях.*

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость, кривые циклического изменения напряжений, упругопластический гистерезис, никелевый сплав ВЖ175.

*The LCF behavior for Ni-base superalloy VZh175 was investigated for a given total strain, ratio  $R=0$  and strain amplitude  $\varepsilon_a=0,4-0,6\%$  at test temperatures 20 and 650°C. Parameters of elastic-plastic strain were observed in this article.*

**Keywords:** low-cycle fatigue (LCF), alteration curves of cyclic stress, elastic-plastic hysteresis, Ni-base superalloy VZh175.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Исследование сопротивления малоцикловой усталости (МЦУ) проводят для конструкционных материалов, подвергающихся в процессе эксплуатации усталостному нагружению. В качестве характеристики прочности материала МЦУ востребована с различными целями – при разработке материала, квалификации серийно производимого сплава, при расчетах деталей конструкции на прочность и ресурс [1–8]. Отличительной чертой испытаний на МЦУ является то, что в процессе испытаний прикладываемые нагрузки превышают предел текучести материала, реализуется циклическое упругопластическое деформирование. Для аналитического описания такого процесса используют два параметра – напряжение и деформацию ( $\sigma$ – $\varepsilon$ ). Один из них выбирают в качестве независимого при проведении испытаний. Независимый параметр задается, контролируется и поддерживается постоянным (или изменяемым по некоторой программе), а другой изменяется в процессе испытаний сложным образом, особенно в условиях действия высокой температуры. В данной работе в условиях испытаний на МЦУ при независимой заданной общей деформации никелевого жаропрочного сплава ВЖ175 проведено исследование изменения напряжений в образце, петли упругопластического гистерезиса.

Отметим, что в отечественной научной литературе недостаточно публикаций по исследованию МЦУ в условиях заданной деформации [4, 9]. В то же время за рубежом имеется достаточно много публикаций по МЦУ сплавов на никелевой основе [10–14].

### Материалы и методы

В качестве материала для исследования использован жаропрочный никелевый сплав ВЖ175, применяемый для изготовления дисков турбин и других деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и стационарных газотурбинных установок (ГТУ). Сплав ВЖ175 представляет собой дисперсионно-твердеющий сплав на никелевой основе со сложной системой легирования (кобальт, хром, вольфрам, молибден, алюминий, титан и др.) [15–18]. Упрочнение сплава осуществляется интерметаллидной  $\gamma'$ -фазой, а также карбидными (Nb, Ti)C и боридными фазами (типа  $Me_3B_2$ ). Для достижения высоких механических свойств разработан многоступенчатый технологический процесс производства [15, 19]. Основные механические свойства сплава ВЖ175 приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Механические свойства сплава ВЖ175

Температура испытания, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Удлинение, %
20	1600	1190	14
650	1530	1080	12

Испытания на МЦУ проведены на сервогидравлических испытательных машинах LFV-100 фирмы Walter+Bai в условиях постоянной общей (упругой и пластической) деформации за цикл нагружения –  $\epsilon_a$ . Управление процессом испытания, замер общей деформации и запись параметров (величина напряжений, петли механического гистерезиса) проводили при помощи экстензометра фирмы Epsilon с базой 12,5 мм. Испытывали гладкие цилиндрические образцы с длиной рабочей части 15 мм и  $\varnothing 5$  мм, частота нагружения составляла 1 Гц, цикл нагружения – асимметричный (циклическое растяжение), коэффициент асимметрии цикла  $R_\epsilon=0$ . Испытания проводили при различных значениях амплитуды заданной деформации ( $\epsilon_a=0,4-0,6\%$ ), при температурах 20 и 650°С, при этом долговечность до разрушения изменялась в интервале  $10^3 \div 1,3 \cdot 10^4$  циклов.

### Результаты

Для исследования параметров упругопластического деформирования проведены испытания шести образцов на МЦУ при различных температурах, количестве циклов до разрушения и заданной общей деформации (табл. 2).

Таблица 2

#### Результаты испытаний сплава ВЖ175 на малоцикловую усталость

Температура испытания, °С	Амплитуда деформации, %	Количество циклов до разрушения $N$
20	0,6	2483
	0,4	10251
650	0,5	894
	0,5	1040
	0,4	4222
	0,4	13063

В процессе испытаний каждого образца при заданном значении амплитуды деформации записаны петли упругопластического гистерезиса от первого до последнего цикла испытания. Это дало возможность проанализировать изменение петель гистерезиса, а также значений максимальных и минимальных напряжений цикла в ходе испытаний. Установлено, что при заданной знакопостоянной циклической деформации растяжения ( $R_\epsilon=0$ ) происходит знакопеременное изменение цикла напряжений.

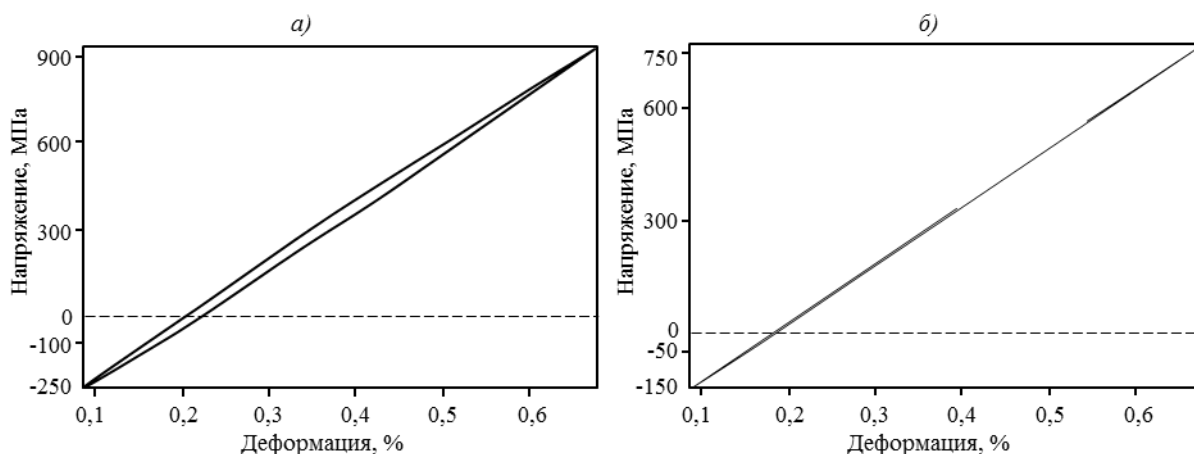


Рис. 1. Влияние температуры испытания на параметры петли гистерезиса в пятом цикле деформирования при  $\epsilon_a=0,4\%$  при 20 (а) и 650°С (б)

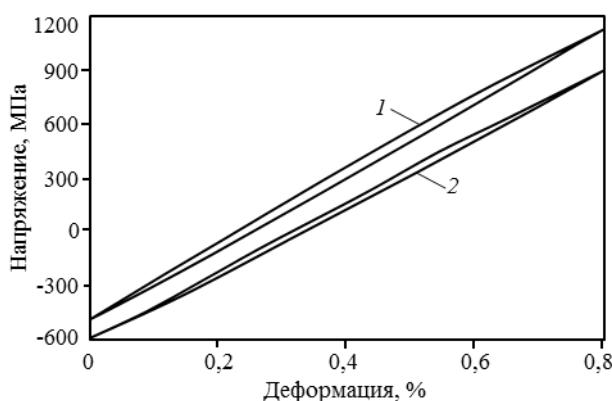


Рис. 2. Петли упругопластического гистерезиса при  $\epsilon_a=0,4\%$  и долговечностях  $N=0,5N_p$ : 1 –  $T=20^\circ\text{C}$ ,  $N=5100$  циклов; 2 –  $T=650^\circ\text{C}$ ,  $N=6500$  циклов

На рис. 1 и 2 приведены петли упругопластического гистерезиса, полученные в ходе испытаний при  $\epsilon_a=0,4\%$  и температурах 20 и 650°С. На рис. 1 приведены петли для пятого цикла испытаний. Видно, что при обеих температурах напряжения растяжения существенно (в 3,5–5 раз) превосходят напряжения сжатия. Однако по мере увеличения числа циклов испытания соотношение меняется. На рис. 2 приведены типичные петли механического гистерезиса при числе циклов испытания  $N=0,5N_p$  ( $N_p$  – число циклов до разрушения). Отметим, что различие по числу циклов испытания  $N$  является небольшим. Показано, что при обеих температурах испытания напряжения растяжения больше, чем напряжения сжатия, но различие это значительно меньше, чем при пятом цикле испытания. Значения напряжений растяжения-сжатия в цикле составляют:

Температура, °С	Напряжение, МПа
20 .....	-500÷+1100
650 .....	-600÷+900

### Обсуждение и заключения

В целом процесс изменения напряжений при испытаниях на МЦУ в условиях заданной общей деформации можно описать следующим образом. В течение первых 100 циклов испытания (возможно – несколько меньше) осуществляется нестационарный процесс одновременного нарастания напряжений растяжения и сжатия в каждом цикле испытаний. После достижения максимальных значений напряжений растяжения

и сжатия (в последнем случае по абсолютной величине) реализуется стационарный режим испытаний либо режим с плавным изменением напряжений растяжения и сжатия. Максимальное, минимальное и среднее значения цикла напряжений существенно не меняются в течение испытаний – до  $\sim 0,7N_p$ . Для всех испытанных образцов среднее напряжение цикла является напряжением растяжения, т. е. имеет положительную величину. Численные значения величин напряжений зависят от величины заданной деформации, температуры испытания и изменяются в интервале от +1400 до -1000 МПа.

Когда число циклов испытания превышает значение  $0,7N_p$ , начинается снижение напряжений растяжения и увеличение по абсолютной величине напряжений сжатия, что продолжается до разрушения. По мере приближения к разрушению образца этот процесс нарастает (рис. 3 и 4).

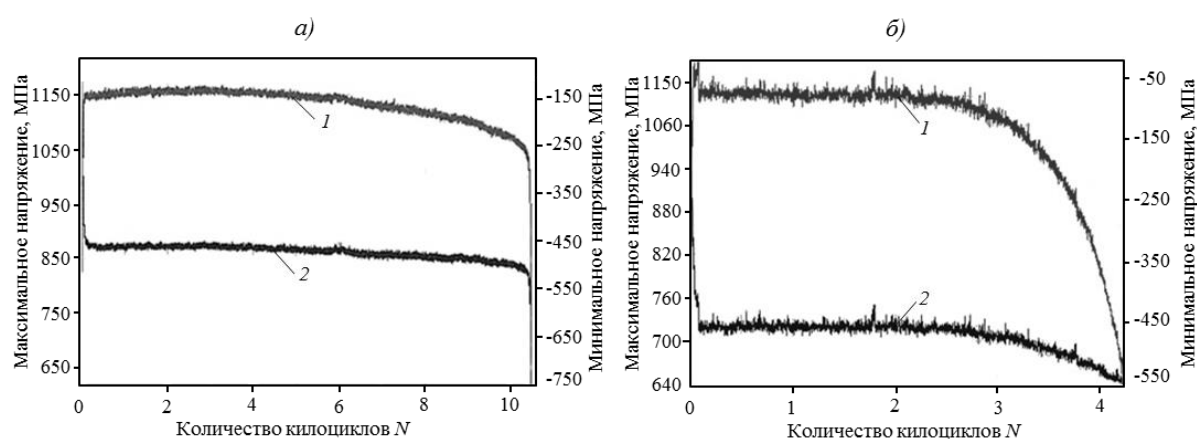


Рис. 3. Изменение напряжений в образце в зависимости от числа циклов  $N$  при испытаниях в условиях циклической деформации  $\varepsilon_a=0,4\%$  при температуре 20 (а) и 650°C (б):

1 – максимальные напряжения (растяжение); 2 – минимальные напряжения (сжатие)

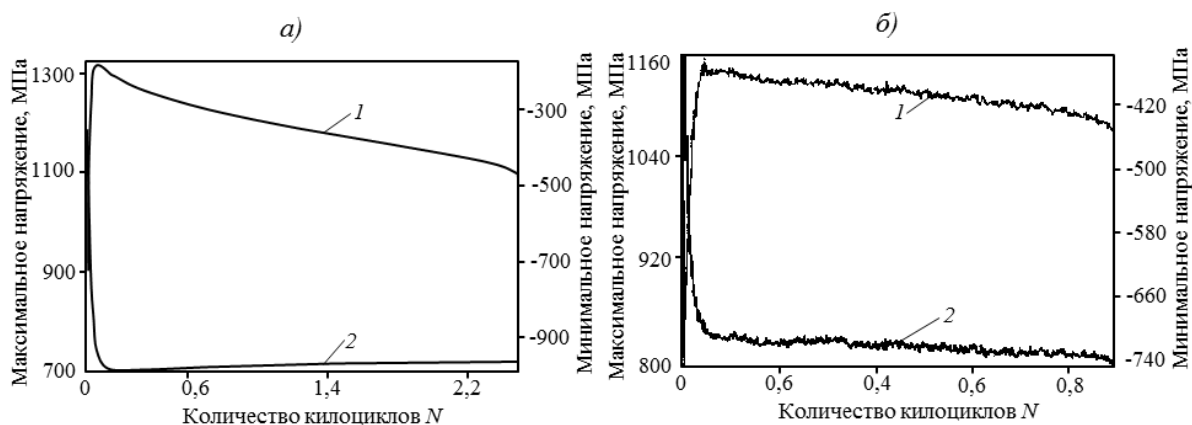


Рис. 4. Изменение напряжений в образце в зависимости от числа циклов  $N$  при испытаниях в условиях циклической деформации  $\varepsilon_a=0,6\%$  (а; 20°C) и  $\varepsilon_a=0,5\%$  (б; 650°C):

1 – максимальные напряжения (растяжение); 2 – минимальные напряжения (сжатие)

Эта схема не всегда жестко реализуется в описанном виде. На стабильном участке возможно плавное изменение напряжений растяжения и сжатия (рис. 4). Однако этот участок всегда качественно отличается от двух других тем, что характеризуется

более низкой скоростью изменения напряжений в зависимости от числа циклов испытания.

Анализ показал, что на стабильном участке испытаний параметры петли упруго-пластического гистерезиса (максимальное и минимальное напряжение, ширина петли  $\varepsilon_n$ ) существенно не изменяются. Видно, что при комнатной температуре величина накопленной деформации  $\varepsilon_n$  больше и составляет 0,03%, тогда как при 650°C  $\varepsilon_n=0,02\%$ . Большого различия по величине угла наклона петли к оси числа циклов не наблюдается, хотя угол наклона несколько больше при комнатной температуре (рис. 2). Циклическое накопление остаточной деформации в процессе испытаний, характеризуемое шириной петли гистерезиса, определяет усталостное повреждение материала. Отметим, что у отечественного сплава ВЖ175 ширина петли гистерезиса приблизительно на порядок меньше, чем у зарубежных никелевых жаропрочных сплавов [10, 13].

Представляет интерес определение влияния температуры испытания (20 и 650°C) на величину и изменение напряжений в образце в процессе испытаний на МЦУ при равных значениях амплитуды деформации  $\varepsilon_a$ . Образцы испытаны при  $\varepsilon_a=0,4\%$  и прошли до разрушения соизмеримое и достаточно большое число циклов:  $N=10500$  циклов при 20°C и  $N=13000$  циклов при 650°C (табл. 3).

Таблица 3

**Влияние температуры испытания на величину напряжений, возникающих в образце, при амплитуде заданной деформации  $\varepsilon_a=0,4\%$**

Температура испытания, °С	Вид нагрузки	Напряжение, МПа, при числе циклов испытания $N \cdot 10^3$										
		0,1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
20	Растяжение	1150	1150	1140	1130	1120	1120	1025	Образец разрушен			
	Сжатие	460	480	480	485	485	490	500	То же			
650	Растяжение	930	930	930	930	930	930	930	930	920	910	
	Сжатие	600	600	600	600	600	600	600	600	600	620	

В зависимости от температуры испытания напряжения в образцах после прохождения начального участка нагружения (~100 циклов) различаются по размаху и величине. Различие по размаху относительно небольшое: 1610 МПа при 20°C и 1530 МПа при 650°C. Различие максимальных напряжений растяжения и сжатия более значительное, чем различие по размаху. Максимальные напряжения растяжения на 200 МПа выше при комнатной температуре, тогда как максимальные напряжения сжатия выше на 115 МПа при температуре 650°C. Среднее напряжение в обоих случаях положительное и составляет 325 и 115 МПа соответственно.

Установлено, что при заданной знакопостоянной циклической деформации растяжения ( $R_e=0$ ) происходит знакопеременное изменение цикла напряжений, при обеих температурах испытания напряжения растяжения несколько превышают напряжения сжатия. Циклическое накопление остаточной деформации в процессе испытаний, характеризуемое шириной петли упругопластического гистерезиса, определяет усталостное повреждение материала. На стабильном участке испытаний параметры петли гистерезиса (максимальное и минимальное напряжение, ширина петли  $\varepsilon_n$ ) существенно не изменяются. Величина накопленной деформации  $\varepsilon_n$  имеет более высокое значение при комнатной температуре и составляет 0,03%, тогда как при температуре 650°C  $\varepsilon_n=0,02\%$ .

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-12084.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
2. Биргер И.А., Балашов Б.Ф., Дульнев Р.А. и др. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение. 1981. 222 с.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
4. Иноземцев А.А., Ратчиев А.М., Нихамкин М.Ш. и др. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин //Тяжелое машиностроение. 2011. №4. С. 30–33.
5. Schijve J. Fatigue of structures and materials. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2009. 185 с.
6. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
8. Способ получения изделия из деформируемого жаропрочного никелевого сплава: пат. 2387733 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
9. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах //Деформация и разрушение материалов. 2009. № 8. С. 41–48.
10. Tobias J., Chlupova A., Petrenec M. et al. Low Cycle Fatigue and Analysis of the Cyclic Stress-Strain Response in Superalloy Inconel 738LC /In: 18-th International Conference «Engineering Mechanics 2012». Svatka. 2012. P. 1407–1411.
11. Nagesha A., Goyal Sunil, Nandagopal M. et al. Dynamic strain ageing in Inconel Alloy 783 under tension and low cycle fatigue //Mater. Sci. and Eng. A. 2012. V. 546. P. 34–39.
12. Levkovitch V., Sievert R., Svendsen B. Simulation of deformation and lifetime behavior of a FCC single cristal superalloy at high temperature under low-cycle fatigue loading //Int. J. Fatigue. 2006. V. 28 (12). P. 1791–1802.
13. Wright J.K., Carroll L.J., J.A. Simpson J.A. et al. Low Cycle Fatigue of Alloy 617 at 850°C and 950°C //J. of Eng. Mat. and Tech. 2013. V. 135. №7. P. 031005-1–031005-8.
14. Subramanya Sarma V., Sundararaman M., Padmanabhan K.A. Effect of  $\gamma'$  size on room temperature low cycle fatigue behavior of a nickel base superalloy //Material Science and Technology. 1998. V. 14. №7. P. 669–675.
15. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
16. Бакрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД //Труды ВИАМ. 2013. №9. Ст. 01 (viam-works.ru).
17. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.
18. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 129–141.
19. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.