

А.Н. ПЕТУХОВ

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И.Баранова», «ЦИАМ», Россия

ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МЦУ И МНЦУ ДЕФОРМИРУЕМЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДИСКОВ ГТД ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Приведен анализ экспериментальных исследований результатов испытаний на малоцикловую усталость МЦУ при частоте нагружения $f \leq 10$ Гц и многоцикловую усталость МнЦУ при частоте нагружения ≥ 10 Гц деформируемых и гранулированных никелевых сплавов для дисков турбин ГТД при наличии концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 1,03 \dots 3,5$ в широком диапазоне температур от 20 до 800 °С и асимметрии цикла нагружений от $R = -1$ до $R = 0$. Показано, что режимы термообработки (снижение температуры старения, увеличение длительности термообработки) существенно влияют на кратковременные характеристики прочности сплава. Для долговечностей $N = 5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^7$ при $T_{исп} = 650^\circ$ принципиальной разницы в кривых МнЦУ для гладких образцов в условиях асимметрии цикла нагружения $R = 0$ и $R = -1$ и МЦУ для $R = -1$ не наблюдается.

Ключевые слова: малоцикловая усталость МЦУ, многоцикловая усталость МнЦУ, деформируемые сплавы, гранулированные сплавы, концентрация напряжений, асимметрия цикла нагружения, предел выносливости МнЦУ, предельная амплитуда напряжений МЦУ для заданной долговечности σ_N .

Введение

Диски турбин ГТД относятся к основным деталям ГТД, разрушение которых сопровождается образованием фрагментов, удержание которых корпусом не гарантируется. При расчетах на прочность часто пользуются характеристиками свойств, применяемых материалов, получаемых при испытаниях стандартных образцов, изготовленных из прутков, а не из заготовок.

1. Механические характеристики

В статье приводятся результаты испытаний сплавов при разных видах нагружения, характерных для дисков (растяжение, изгиб) и разных степенях асимметрии цикла нагружения ($R = 0$; $R = -1$) и долговечностях: МЦУ до $N = 10^5$ циклов, МнЦУ не менее $N = 5 \cdot 10^7$ циклов в диапазоне температур 20–800°. В табл. 1 приведены данные о механических характеристиках жаропрочного сплавов ЭИ698 и

ЭП741НП. Порошковый сплав применяется до температуры 750 °С. Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что с повышением температуры испытаний снижается величина предела выносливости, но при этом уменьшается и чувствительность к концентрации напряжений у сплава ЭИ698.

Таблица 1 – Механические характеристики прочности сплава ЭП741НП из прутка

$T_{исп}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	НВ
20	1300	900	14	-	3.15-45

Значения этих характеристик у сплава ЭИ698 выше, чем у сплава ЭИ437БУ, эксплуатируемого при до $T_g < 700$ °С. В табл. 2 приведены механические свойства жаропрочного порошкового сплава ЭП741П, полученные при в температурах $T_{исп} = 20$ и 750 °С. Образцы вырезались из заготовки Ш 480 мм для диска турбины.

Таблица 2 – Механические характеристики прочности сплавов типа ЭП741П при температурах $T_{исп} = 20$ и 750 °С (из заготовки диска $\varnothing 480$ мм)

$T_{исп}$	σ_B	$\sigma_{пл}$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	НВ	a_n
20	1350...1400	690...710	820...850	25...33	29...34	3.2...3.4	-
750	1000...1030	610...640	750...780	30...38	33...40	-	7.5

Механические характеристики прочности (σ_B , $\sigma_{\text{пл}}$, $\sigma_{0,2}$, δ_5 , ψ) для образцов, вырезанных из заготовки диска из сплава ЭП741П, оказались выше (табл.3).

Таблица 3 – Механические характеристики прочности сплава ЭП741П (ХН60КМВТЮБ) при температурах $T_{\text{исп}} = 20$ и 650 °С в зависимости от режимов термообработки, полученные на образцах, вырезанных из шайбы $\varnothing 480$ мм

Термообработка	$T_{\text{исп}}$, °С	σ_B , МПа	$\sigma_{\text{пл}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	НВ, Ø мм	a_H
Старение $T = 910$ °С, 2 ч	0	1250-1350	680-620	820-850	20-25	20-25	3.2-3.45	4-7
	650	1000-1030	600-620	750-780	18-20	18-22	-	6
Старение $T = 870$ °С, 32 ч	20	1250-1350	850-1020	950-1000	15-22	18-20	3.2-3.4	4-6
	650	1100-1150	-	900-950	0	20	-	-

Показано, что режимы термообработки (снижение температуры старения, увеличение длительности термообработки) существенно влияют на кратковременные характеристики прочности сплава. При температуре старения в течение 32 ч при $T = 870$ °С незначительно изменяются σ_B , НВ и a_H , снижаются δ_5 и ψ , но растут значения $\sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{0,2}$.

2. Чувствительность к концентрации напряжений

В таблице 4 приведены сведения о чувствительности к концентрации напряжений сплавов ЭИ698 и ЭП741НП при симметричном изгибе с вращением (МнЦУ) в диапазоне температур $T_{\text{исп}} = 20...650$ °С.

Таблица 4 – Данные о чувствительности к концентрации напряжений сплавов ЭИ698 и ЭП741НП для МнЦУ при симметричном изгибе с вращением: $f = 200$ Гц, $N_0 = 5 \cdot 10^7$ циклов в диапазоне температур $T_{\text{исп}} = 20...650$ °С

Сплав	$T_{\text{исп}}$, °С	σ_{-1} , МПа	α_σ	K_σ	q_σ
ЭИ698	20	410	1.0	1.0	—
			1.5	1.64	> 1.0
			3.0	2.48	0.74
	400	315	1.0	1.0	—
			1.5	1.285	0.57
			3.0	1.70	0.35
	600	360	1.0	1.0	—
			1.5	1.44	0.88
			3.0	1.89	0.45
ЭП741НП	20	470	1	1	—
	550	445	1	1	—
	650	500	1	1	—
			3	2.08	0.54

Сравнивая данные, представленные в таблице 4, можно отметить, что при $T_{\text{исп}} = 600$ °С сплавы ЭИ698 и ЭП741НП, а при $T_{\text{исп}} = 650$ °С сплав ЭП741НП по чувствительности к концентрации напряжений близки.

3. Влияние асимметрии цикла на МЦУ и МнЦУ

Гладкие образцы и образцы с надрезом, изготовленные из заготовки диска (сплав

ЭП741П) были испытаны на МЦУ и на установке типа УРС 10-30000 были выполнены при отнулевом (мягком) цикле нагружения $R = 0$ и температурах 20 °С, 650 °С, 750 °С и при 800 °С. Результаты испытаний при 650 °С гладких образцов из сплава ЭП741 на малоцикловую усталость (МЦУ) при отнулевом цикле нагружения $R = 0$ показали, что долговечность образцов при максимальных напряжениях $\sigma_N = 960$ МПа составила $N = 5.10^3$ циклов, а при снижении напряжений до $\sigma_N = 940$ МПа, т.е. менее чем на 5%, хотя долговечность возросла до $N = 10^4$ циклов. Из результатов испытаний, представленных на рис. 1, следует, что при $T_{\text{исп}} = 600$ °С и невысокой концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 1.9$, чувствительность к концентрации напряжений у сплава проявляется лишь при долговечности $N > 10^3$ циклов, снижаясь по параметру σ_N для $N = 10^3$ примерно на 10%, а для $N = 10^4$ около 20%.

При $T_{\text{исп}} = 750$ ° и 800 °С чувствительность к концентрации напряжений у сплава для $\alpha_\sigma = 1.9$ и значения σ_N одинаковы.

Аналогичное явление наблюдается у сплава при концентрации напряжений для $\alpha_\sigma = 3.35$ температурах 600 ° и 750 °С.

На установке типа УРС 10-30000 для сплава ЭП741П получены кривые МЦУ и МнЦУ при $R = 0$ и $R = -1$ на образцах гладких и с надрезом (см. рис. 2), которые свидетельствуют о том, что для долговечностей $N = 10^3$ и $N = 3 \cdot 10^4$ при отнулевом цикле $R = 0$ МЦУ значения σ_N примерно на 40% выше, чем для симметричного цикла $R = -1$.

Для долговечностей $N = 5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^7$ при $T_{\text{исп}} = 650$ °С принципиальной разницы в кривых МнЦУ для гладких образцов в условиях асимметрий цикла нагружения $R = 0$ и $R = -1$ и МЦУ для $R = -1$ не наблюдается.

Из анализа результатов испытаний на МЦУ и МнЦУ, представленных на рис. 2 следует, что в условиях симметричного цикла $R = -1$ при $T_{\text{исп}} = 650$ °С вид кривых для гладких образцов

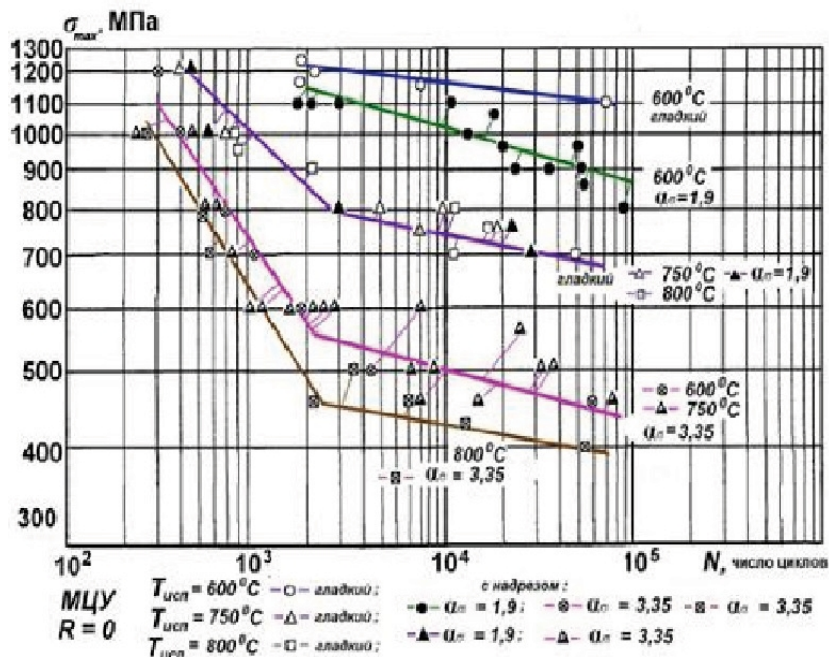


Рис. 1. Кривые МЦУ сплава ЭП741П, полученные при $R = 0$, для образцов гладких и с надрезом

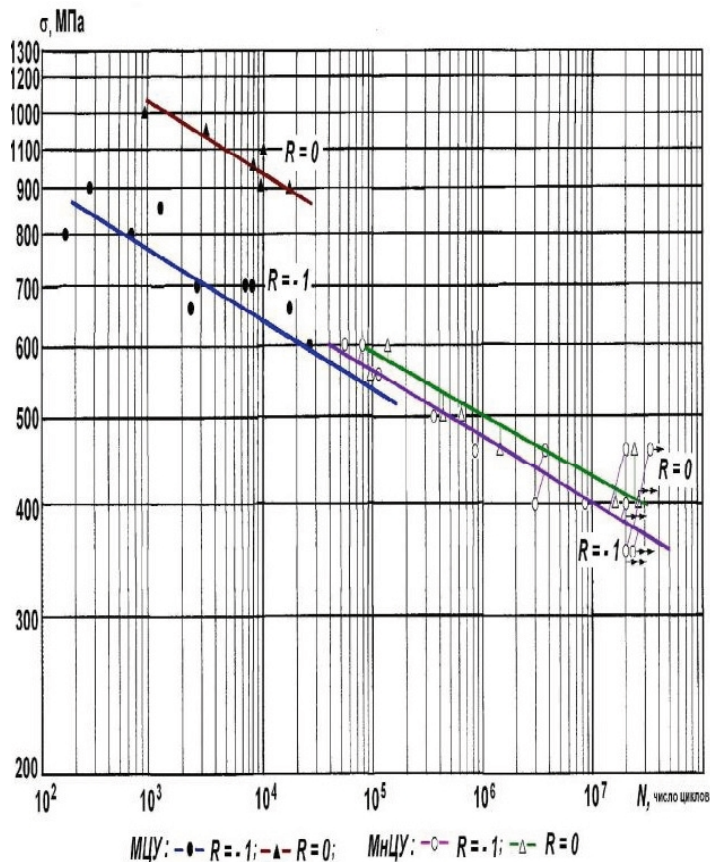


Рис. 2. Кривые МЦУ и МнЦУ для гладких образцов из сплава ЭП741 для $R = 0$ и $R = -1$ при $T_{исп} = 650^\circ\text{C}$

($\alpha_\sigma=1.0$) не изменяется, хотя в тех же условиях значения пределов выносливости для МЦУ при концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 3.35$ при долговечностях $10^5 \dots 10^8$ циклов снижаются примерно в 3 раза следует:

- для 20°C предельная амплитуда для долговечности $N = 5 \cdot 10^3$ циклов составила $\sigma_N = 1300$ МПа, а для $N = 10^4$ циклов предельная амплитуда составила $\sigma_N = 1200$ МПа, т.е. снизилась менее чем на 10%;

- для 650°C для долговечности $N = 5 \cdot 10^3$ циклов предельная амплитуда составила $\sigma_N = 920$ МПа;

- для долговечности $N = 10^4$ циклов предельная амплитуда составила $\sigma_N = 840$ МПа, т.е. снизилась менее чем на 10%;

- для 750°C для долговечности $N = 5 \cdot 10^3$ циклов предельная амплитуда составила $\sigma_N = 800$ МПа;

- для долговечности $N = 10^4$ циклов предельная амплитуда составила $\sigma_N = 730$ МПа, т.е. снизилась менее чем на 9%.

Можно отметить, что наиболее резкое снижение, примерно на 40%, величины предельной амплитуды σ_N наблюдается с повышением температуры испытаний от 20 до 650°C , а при росте $T_{\text{исп}}$ от 650 до 750°C снижение σ_N составляет 10...15 %.

В табл. 5 приведены α_σ данные об испытаниях на МЦУ образцов (гладких $\alpha_\sigma = 1,0$ и с надрезом $\alpha_\sigma = 1,9$ и $\alpha_\sigma = 3,35$) из более жаропрочного

сплава ЭП741НП для цикла нагружения $R = 0$, типичного для дисков, и $T_{\text{исп}} = 20, 600, 650, 750$ и 800°C . Из анализа результатов испытаний (табл. 5) на малоцикловую усталость (МЦУ) гладких образцов из сплава ЭП741НП при отнулевом цикле нагружения ($R = 0$) при температурах испытаний $T_{\text{исп}} = 20 \dots 750^\circ\text{C}$ следует, что при $T_{\text{исп}} = 650^\circ\text{C}$ и 750°C с увеличением N от $5 \cdot 10^3$ до 10^4 цикл значения величины σ_N снижаются менее, чем на 10%.

Значения предельных амплитуд σ_N для $T_{\text{исп}} = 20$ и 600°C при $R = 0$ и $\alpha_\sigma = 1.0$ для $N = 10^4$ циклов отличаются менее, чем на 10%. Различие σ_N предельных амплитуд для долговечности $N = 10^4$ при значениях $\alpha_\sigma = 1.0$ (гладкий образец) и $\alpha_\sigma = 1.9$ (с концентрацией напряжений) составляет менее 15%. В диапазоне значений $\alpha_\sigma = 1.0 \dots 1.9$ при 750°C в широком промежутке долговечностей от 10^3 до $5 \cdot 10^4$ циклов отличий в σ_N не наблюдается.

Однако с ростом величины коэффициента концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 3.35$ чувствительность сплава ЭП741НП к концентрации напряжений в условиях МЦУ резко увеличивается, что проявляется в снижении значений предельных амплитуд σ_N для всех исследованных температур $600 \dots 800^\circ\text{C}$ в диапазоне долговечностей от $N = 10^3$ до $5 \cdot 10^4$ циклов.

Таблица 5 – Результаты испытаний на МЦУ образцов (гладких и с надрезом) из сплава ЭП741НП при температурах $T_{\text{исп}} = 600 \dots 800^\circ\text{C}$ для степени асимметрии цикла нагружения $R = 0$

Тип образца	$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	Значения σ_N для чисел циклов $N = 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$				
		10^3	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	10^4	$5 \cdot 10^4$
гладкий	20	-	-	1300	1200	-
гладкий	600	1240	1220	1180	1170	1120
$\alpha_\sigma = 1.9$		1220	1150	1090	1020	910
$\alpha_\sigma = 3.35$		750	580	525	500	450
гладкий	650	-	-	920	830	-
$\alpha_\sigma = 3.35$		-	-	480	430	-
гладкий	750	1000	850	800-775	740-720	680
$\alpha_\sigma = 1.9$		1000	850	775	740	680
$\alpha_\sigma = 3.35$		750	580	530	500	450
гладкий	800	1000	850	780	740	680
$\alpha_\sigma = 3.35$		640	490	440	430	400

Результаты этих испытаний в виде кривых МЦУ представлены на рис. 1. На графике видно, что до $T_{\text{исп}} = 600^\circ\text{C}$ у кривых малоцикловой усталости для образцов с концентраторами напряжений $\alpha_\sigma = 1.0 \dots 1.9$ в диапазоне долговечностей $N = 10^3 \dots 10^5$ отсутствует перелом. Но, начиная с $T_{\text{исп}} = 750^\circ\text{C}$, в промежутке долговечностей

$N = 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$ циклов у кривой МЦУ появляется точка перелома. При повышении α_σ коэффициента концентрации напряжений до $\alpha_\sigma = 3.35$ в диапазоне температур испытаний $T_{\text{исп}} = 600 \dots 800^\circ\text{C}$ на долговечности $N = 2 \cdot 10^3$ циклов проявляется точка перелома кривой МЦУ.

Литература

1. Балашов Б.Ф. Усталостная прочность жаропрочных сплавов в связи с концентрацией напряжений, асимметрией цикла нагружения и поверхностным наклепом [Текст] / Б.Ф. Балашов, А.Н. Петухов // Проблемы прочности. - 1967. - №4. - С.82-86.
2. Балашов Б.Ф. Усталостная прочность дисков газовых турбин [Текст] / Б.Ф. Балашов, А.Н. Петухов // Прочность элементов роторов турбомашин. Тр. 2-го Республ. сем. - К.: Наук. думка. - 1980. - С.198-205.
3. Балашова Б.Ф. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей [Текст]: моногр. /Б.Ф. Балашова, И.А. Биргера, Р.А. Дульнев, Т.П. Захарова, Л.А. Козлов, А.Н. Петухов, Р.Н. Сизова // М.: Машиностроение, 1981. - 222 с.
4. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст]: моногр. /А.Н. Петухов // М.: Машиностроение, 1993. - 240 с.
5. Петухов А.Н. Актуальные проблемы конструкционной прочности, решаемые при создании современных ГТД и ЭУ [Текст]: /А.Н. Петухов.// Вопросы авиационной науки и техники: Сер. Авиационное двигателестроение. - 2003.- Вып.1(1323). - С.5-30. (ЦИАМ).
6. Петухов А.Н. Современные принципы проектирования дисков ГТД большого ресурса и методы обеспечения их прочности и надежности [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Петухов. - М.: ИЦ. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2003. - 50 с.
7. Петухов А.Н. Некоторые тенденции развития конструкций роторов ГТД, новых технологий и вопросы конструкционной прочности [Текст] /А.Н. Петухов // Вестник двигателестроения. -2003. - №3. - С. 130-134.
8. Петухов А.Н. Сопротивление многоциклового усталости и методы повышения пределов выносливости деталей ГТД и ЭУ[Текст] /А.Н. Петухов // Конверсия в машиностроении. - 2005. - №4-5 (71-72). - С. 83-88.
9. Conversion in machine building of Russia [text].- 2005. -№4-5 (71-72). - С. 83-88.
10. Захарова Т.П. Закономерности малоциклового усталости дисков авиационных двигателей [Текст] / Т.П. Захарова, В.В. Кутырев // Конверсия в машиностроении. - 2005.- №3. - С. 58-60.
11. Петухов А.Н. Требования к конструкционной прочности материалов и технологическим процессам, обеспечивающим в эксплуатации ГТД и ЭУ высокие надежность и ресурс [Текст] / А.Н. Петухов // Конверсия в машиностроении. - 2006. - №4 (77). - С. 63-65.
12. Кутырев В.В. Разрушение дисков турбомашин и обоснование допускаемых запасов прочности [Текст] /В.В. Кутырев // Конверсия в машиностроении. - 2006. - №4 (79); №6 - С.14-16.
13. Петухов А.Н. Многоцикловая усталость материалов и деталей ГТД. [Текст] / А.Н. Петухов // Надежность и долговечность машин и сооружений: Междунар. науч.-техн. сб: - К.: 2008. - № 30. -С.114-122.
14. Петухов А.Н. Актуальные вопросы многоциклового усталости конструкционных материалов для прогнозирования ресурса деталей ГТД [Текст] / А.Н. Петухов // Современные проблемы ресурса материалов и конструкций: Тр. III шк.-сем.- М.: МАМИ. - 2009.- С.105-118.

Поступила в редакцию 01.06.2013

А.М. Петухов. Особливості характеристик МЦВ і БЦВ сплавів, що деформуються та гранульованих сплавів для дисків ГТД за наявності концентрації напружень в широкому діапазоні температур

Наведено аналіз експериментальних досліджень результатів випробувань на малоциклово втому МЦВ при частоті навантаження $f \leq 10$ Гц та багатоциклово втому БЦВ при частоті навантаження ≥ 10 Гц сплавів, що деформуються та гранульованих нікелевих сплавів для дисків турбін ГТД при наявності концентрації напружень $\alpha_\sigma = 1, 0...3, 35$ в широкому діапазоні температур від 20 до 800 °С і асиметрії циклу навантажень від $R = -1$ до $R = 0$. Показано, що режими термообробки (зниження температури старіння, збільшення тривалості термообробки) суттєво впливають на короточасні характеристики міцності сплаву. Для довготривалостей $N = 5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^7$ при $T_{исп} = 650^\circ$ принципової різниці в кривих БЦВ для гладких зразків в умовах асиметрії циклу навантаження $R = 0$ і $R = -1$ і МЦВ для $R = -1$ не спостерігається.

Ключові слова: малоциклова втома МЦВ, багатоциклова втома БЦВ, сплави, що деформуються, гранульовані сплави, концентрація напружень, асиметрія циклу навантаження, границя стійкості БЦВ, гранична амплітуда напружень МЦВ для заданої довготривалості σ_N .

Anatoliy Petuhov. Characteristics and features LCF and HCF deformability and granular alloy wheels for GTE if stress concentration in a wide range of temperatures

The analysis of the test results of experimental studies on low-cycle fatigue LCF loading at a frequency of $f \leq 10$ Hz and high-cycle fatigue loading HCF at a frequency of ≥ 10 Hz deformed and granulated nickel alloys for turbine engine turbine disks in the presence of stress concentration $\alpha_\sigma = 1,0 \dots 3,35$ in a wide range of temperatures from 20 to 800 °C loading cycle and asymmetry of $R = -1$ to $R = 0$. It is shown that the conditions of heat treatment (aging temperature decrease, increasing the duration of heat treatment) is significantly affect short-term strength of the alloy characteristics. For durability $N = 5 \cdot 10^4$ to $2 \cdot 10^7$ at $T_{ev} = 650^\circ$ basic difference in HCF curves for smooth specimens in a loading cycle asymmetry $R = 0$ and $R = -1$ and LCF for $R = -1$ are observed.

Key words: low-cycle fatigue LCF, high-cycle fatigue HCF, wrought alloys, granular alloys, the stress concentration, the asymmetry of loading cycle, the endurance limit HCF, limiting the amplitude of voltage for a given LCF life σ_N .