



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.07

УДК 620.178.3

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ЭП517Ш ПРИ ДВУХОСНОЙ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В УСЛОВИЯХ НОРМАЛЬНЫХ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Е.В. Ломакин¹, М.П. Третьяков², А.В. Ильиных², А.В. Лыкова²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 15 февраля 2019 г.
Принята: 20 марта 2019 г.
Опубликована: 30 марта 2019 г.

Ключевые слова:

экспериментальное исследование, малоцикловая усталость, циклическая долговечность, сложное нагружение, плоское напряженное состояние, двухосное деформирование, растяжение, кручение, температура испытания, форма цикла, ЭП517Ш.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик сопротивления малоцикловой усталости жаропрочной конструкционной стали ЭП517Ш (химический состав: С – 0,13 %; Cr – 12,5 %; Si – 0,05 %; Ni – 2,05 %; Mo – 1,50 %, W – 0,70 %; Nb – 0,20 %; V – 0,20 %) авиационного назначения при двухосном циклическом нагружении. Для проведения циклических испытаний использовалась специализированная двухосевая испытательная система Instron 8850, которая позволяет планировать циклические и статические испытания с произвольными законами нагружения при растяжении и кручении. Для измерения осевых и сдвиговых деформаций в экспериментах использовались двухосевые динамические датчики деформаций Epsilon 3550-010M для испытаний при нормальной температуре и Epsilon 3550HT-025M для испытаний в условиях повышенных температур. Приведена информация о методах испытаний при двухосном циклическом нагружении в условиях нормальных и повышенных температур, позволяющих анализировать механическое поведение и процессы разрушения конструкционной стали в условиях плоского напряженного состояния. Представлены результаты испытаний жаропрочной легированной стали ЭП517Ш на малоцикловую усталость при разных температурах и траекториях циклического деформирования с пропорциональным и не пропорциональным изменением осевой и сдвиговой деформаций. Для разных видов испытаний построены петли гистерезиса в виде зависимостей нормальных и касательных напряжений от осевых и сдвиговых деформаций соответственно. Показано, что при заданных параметрах цикла долговечность стали ЭП517Ш существенно зависит от траектории циклического деформирования, формы цикла и температуры испытания. В случае непропорционального деформирования циклический ресурс стали ЭП517Ш снижается в 1,5–2 раза по сравнению с пропорциональным нагружением при разных температурах испытаний. В зависимости от траектории деформирования отмечено значительное уменьшение циклической долговечности при температуре 600 °С на 17–44 % по сравнению с нормальной температурой.

© ПНИПУ

© Ломакин Евгений Викторович – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф., зав. каф., e-mail: evlomakin@msu.ru, ID: [0000-0002-8716-5363](https://orcid.org/0000-0002-8716-5363)

Третьяков Михаил Павлович – к.ф.-м.н., доц., e-mail: cem_tretyakov@mail.ru, ID: [0000-0001-6146-6769](https://orcid.org/0000-0001-6146-6769)

Ильиных Артем Валерьевич – к.т.н., доц., e-mail: ilinih@yandex.ru, ID: [0000-0001-9162-1053](https://orcid.org/0000-0001-9162-1053)

Лыкова Анастасия Владимировна – аспирантка, e-mail: cem.lykova@gmail.com, ID: [0000-0003-4873-6351](https://orcid.org/0000-0003-4873-6351)

Evgeny V. Lomakin – Corresponding Member of the RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: evlomakin@msu.ru, ID: [0000-0002-8716-5363](https://orcid.org/0000-0002-8716-5363)

Mikhail P. Tretyakov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru, ID: [0000-0001-6146-6769](https://orcid.org/0000-0001-6146-6769)

Artem V. Ilinykh – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ilinih@yandex.ru, ID: [0000-0001-9162-1053](https://orcid.org/0000-0001-9162-1053)

Anastasiya V. Lykova – PhD Student, e-mail: cem.lykova@gmail.com, ID: [0000-0003-4873-6351](https://orcid.org/0000-0003-4873-6351)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

MECHANICAL BEHAVIOR OF X15CRNI12-2 STRUCTURAL STEEL UNDER BIAXIAL LOW-CYCLE FATIGUE AT NORMAL AND ELEVATED TEMPERATURES

E.V. Lomakin¹, M.P. Tretyakov², A.V. Ilinykh², A.V. Lykova²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 15 February 2019

Accepted: 20 March 2019

Published: 30 March 2019

Keywords:

experimental study, low-cycle fatigue, fatigue life, complex loading, plane stress, biaxial deformation, tension, torsion, test temperature, cycle shape, X15CrNi12-2.

ABSTRACT

The results of the experimental studies of the low-cycle fatigue characteristics of heat-resistant structural X15CrNi12-2 steel for aircraft purposes (chemistry: C – 0.13%; Cr – 12.5%; Si – 0.05%; Ni – 2.05%; Mo – 1.50%, W – 0.70%; Nb – 0.20%; V – 0.20%) under biaxial cyclic loading are presented. For cyclic tests a specialized Instron 8850 two-axes testing system was used which allows the planning of cyclic and static tests with an arbitrary stress sequence under the conditions of tension and torsion. The Epsilon 3550-010M dual-axis dynamic strain sensors for testing at normal temperatures and the Epsilon 3550HT-025M for testing at high temperatures were used to determine the values of axial and shear strains during the experiments. The test methods for biaxial cyclic loading under normal and elevated temperatures are described which allows to analyze the mechanical behavior and structural steel destruction processes under plane stress conditions. The tests results of X15CrNi12-2 heat-resistant alloy under low-cycle fatigue at different temperatures and cyclic strain paths with proportional and non-proportional changes in axial and shear deformations are presented. For different types of tests hysteresis loops are represented in the form of dependences of normal and shear stresses on axial and shear deformations, respectively. It is shown that the durability of X15CrNi12-2 steel in these parameters significantly depends on the cyclic strain path, the shape of the cycle and the test temperature. In the case of non-proportional deformation, the fatigue life of X15CrNi12-2 steel decreases 1.5-2 times as compared with the proportional loading at different test temperatures. Depending on the strain path, a significant decrease in fatigue life at a temperature of 600 °C by 17-44% in comparison with the room temperature was observed.

© PNRPU

Введение

Анализ публикаций отечественных и зарубежных авторов свидетельствует об актуальности экспериментальных исследований мало- и многоциклового усталости в условиях многоосного нагружения для различных конструкционных сталей и сплавов, в том числе авиационного назначения [1–7]. Необходимость проведения экспериментальных исследований при многоосной усталости обусловлена особенностями процесса циклического разрушения в местах сложной геометрии ответственных элементов конструкций газотурбинных двигателей, в которых реализуется сложное напряженно-деформированное состояние. Результаты испытаний используются для изучения закономерностей механического поведения, исследования процессов накопления повреждений, разработки теоретических моделей для расчета усталостной долговечности [8–12].

Для оценки разрушения деталей от действия циклически изменяемых нагрузок при сложном напряженном состоянии используются различные методы расчета ресурса, основанные на линейных и нелинейных моделях накопления повреждений. Результаты расчетов сравниваются с данными экспериментальных исследований [13–15]. В основу критериев расчета на усталость элементов авиационных конструкций при многоосном циклическом нагружении закладывается переход от

сложного напряженного состояния к некоторым величинам амплитуды напряжений или деформаций (например, максимальное главное или касательное напряжение, интенсивность напряжений или деформаций и др.). Для определения циклической долговечности рассчитанную величину эквивалентного напряжения сравнивают с аналогичным значением для соответствующей точки на кривой усталости, которая строится в большинстве случаев на основе результатов одноосных испытаний при растяжении-сжатии [5, 10, 12, 16].

Одним из факторов, существенно снижающих долговечность конструкционных сталей, является повышенная температура [17–22]. Температурные условия нагружения помимо снижения циклического ресурса, как правило, изменяют характер механического поведения и процессов накопления повреждений материала. Наиболее отчетливо эти изменения отражаются на характеристиках петель гистерезиса и зависимости максимальных и минимальных напряжений от числа циклов в случае жесткого нагружения. Подобные зависимости механических свойств конструкционных материалов от температуры связаны со структурными изменениями, такими как деформационное старение, рекристаллизация, полигонизация и др. Если при циклическом нагружении реализуется неблагоприятная комбинация параметров цикла (высокий уровень нагрузок и температуры, большое время цикла, наличие длительных выдержек и др.), то на долго-

вечность металлов и сплавов влияют также явления ползучести и релаксации.

В отличие от испытаний на многоцикловую усталость, при малоцикловой усталости характерным является наличие значительных пластических деформаций в цикле, для анализа и контроля которых требуется использование динамических экстензометров [8, 13, 22–26]. Использование датчиков деформаций в экспериментах на малоцикловую усталость позволяет планировать и проводить испытания в условиях либо жесткого, либо мягкого циклического нагружения, когда в процессе испытаний контролируются параметры цикла либо по деформациям, либо по напряжениям соответственно. Для экспериментального исследования механического поведения конструкционных сталей используются простые или комбинированные программы нагружения, в которых контролируемый параметр цикла (для случая жесткого циклического нагружения используются, например, амплитуды общей или пластической деформации, скорость пластического деформирования и др.) задается по произвольному закону. Характер циклического поведения материала отслеживается по изменяемому параметру цикла на основе анализа зависимостей максимальных и минимальных значений от числа циклов в испытании.

Представленный обзор публикаций отечественных и зарубежных авторов показывает, что для изучения механического поведения и процессов разрушения конструкционных сталей при малоцикловой усталости важным и актуальным является проведение комплексных экспериментальных исследований характеристик сопротивления усталости конструкционных сталей в условиях сложного напряженного состояния в широком диапазоне температур.

1. Методики испытаний

Испытания на малоцикловую усталость проводили в Центре экспериментальной механики ПНИПУ с использованием двухосной испытательной системы Instron 8850, внешний вид которой представлен на рис. 1, а. Два независимых гидравлических привода и современная система управления параметрами испытаний установки позволяют реализовать различные комбинации циклических и статических воздействий, что дает широкие возможности для проведения комплексных экспериментов в условиях плоского напряженного состояния при простых и сложных режимах циклического нагружения, а также позволяет планировать испытания для оценки механических свойств материала в условиях повышенных температур и комбинированных термосиловых воздействий [27–29].

В составе испытательной системы для измерения прикладываемых усилий и моментов в процессе испытания используется двухосевой датчик нагрузки Dynacell с предельными измеряемыми значениями нагрузок ± 160 кН при растяжении или сжатии и ± 1 кНм

при кручении. Точность силового датчика равняется 0,4 % от измеряемой величины.

Для измерения деформаций в ходе экспериментов на малоцикловую усталость при разных значениях температуры применялись динамические двухосевые экстензометры фирмы Epsilon 3550-010M и 3550HT-025M с базами измерения 10 и 25 мм, диапазонами измерений осевых деформаций ± 5 и ± 10 % и углов закручивания ± 4 и $\pm 2,5^\circ$ соответственно. На рис. 1, б и в показаны установленные в испытательную машину образцы, датчики деформаций и высокотемпературная печь. Двухосевые экстензометры позволяют проводить циклические испытания с контролем деформационных параметров цикла и реализовать различные траектории жесткого нагружения при пропорциональном и непропорциональном изменении осевых и сдвиговых деформаций. На основе показаний двухосевого датчика деформаций для каждого цикла записываются диаграммы деформирования, анализ которых позволяет определять комплекс параметров петель гистерезиса, характерных для режима малоцикловой усталости, и изучать закономерности механического поведения конструкционных сталей и сплавов [23–25]. Перед проведением испытаний датчики деформаций калибровались на двухосевом стенде с поверенными микрометрическими головками. После установки образца в захватах испытательной системы с целью определения качества закрепления экстензометров на поверхности рабочей части производилось предварительное циклирование в упругой области, при котором на нескольких циклах определялись упругие модули при растяжении и кручении и оценивалась линейность показаний датчиков деформаций.

В соответствии со стандартом ГОСТ 25.502–79 для проведения циклических испытаний на растяжение-сжатие и кручение можно использовать сплошные или трубчатые образцы. Преимуществом использования тонкостенных трубчатых образцов является близкое к однородному напряженно-деформированное состояние, которое реализуется в кольцевом поперечном сечении рабочей части образца, что удобно для последующей интерпретации результатов испытаний. В отличие от трубчатых в сплошных образцах в поперечном сечении реализуется неоднородное напряженное состояние из-за зависимости величины касательных напряжений от расстояния между центром и рассматриваемой точкой сечения.

На рис. 2 представлены эскизы образцов с кольцевым поперечным сечением рабочей части, форма которых разработана с учетом требований стандартов ASTM E2207-02, ГОСТ 25.505–85 и ГОСТ 25.502–79 и особенностей испытательного оборудования (геометрия клиновидных захватов, база измерения двухосевых экстензометров, размеры высокотемпературной печи). При изготовлении образцов подобных типов необходимо уделять повышенное внимание, во-первых, качеству внешней и внутренней поверхностей образца, на которых должны отсутствовать концентраторы напряжений

в виде рисок от обрабатывающего инструмента, которые могут привести к существенному снижению долговечности, и, во-вторых, равномерности толщины стенки рабочей части образцов в окружном направлении, обеспечивающей близкое к однородному плоское напряженное состояние в поперечном сечении. Для проведения испытаний при повышенной температуре использо-

вались удлиненные трубчатые образцы, позволяющие разместить высокотемпературную печь между захватными частями испытательной машины. По сравнению с более короткими образцами у удлиненных образцов больше длина рабочей части на 14 мм (см. рис. 2), что необходимо для установки высокотемпературного датчика деформаций с базой 25 мм.

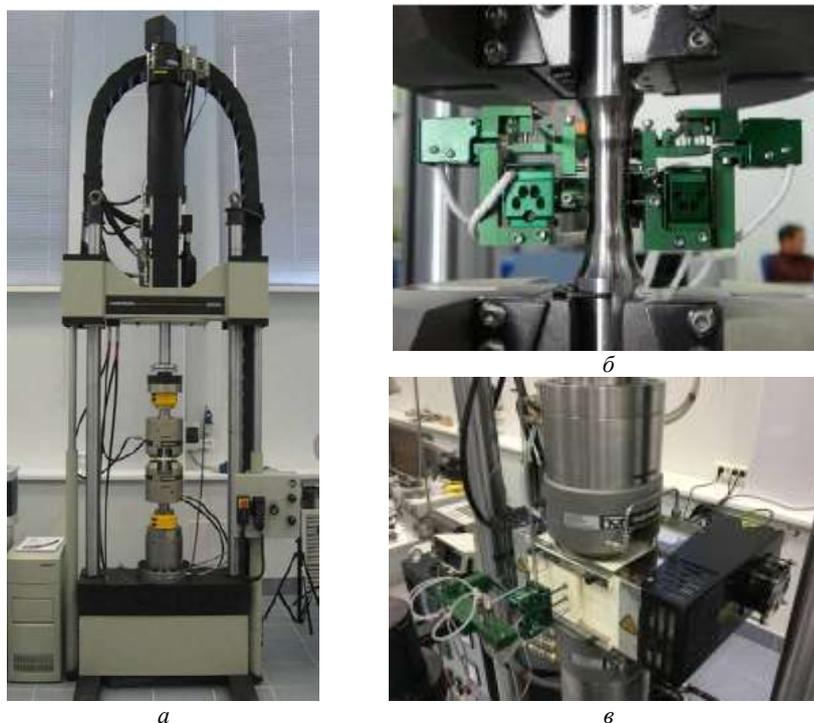


Рис. 1. Сервогидравлическая испытательная система Instron 8850 (а) и установленные на образец двухосевые датчики деформаций для проведения испытаний при комнатной (б) и повышенной (в) температурах

Fig. 1. Servohydraulic test system Instron 8850 (a). Dual-axis strain sensors installed on the sample for testing at normal (b) and high temperatures (c)

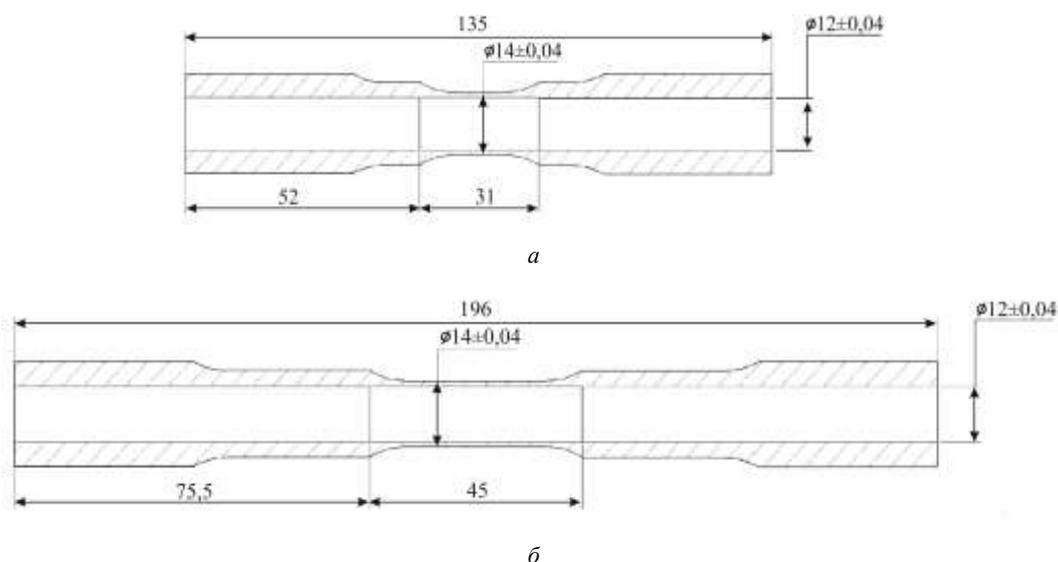


Рис. 2. Эскизы тонкостенных трубчатых образцов для циклических испытаний на растяжение с кручением при нормальной (а) и повышенной (б) температурах

Fig. 2. Thin-walled tubular samples sketches for cyclic tests under tension and torsion at normal (a) and high temperatures (b)

При экспериментальном исследовании характеристик малоциклового усталости в условиях повышенных температур на поверхность рабочей части образца крепились две термопары, позволяющие контролировать нагрев до заданной температуры. Показания с термопар снимались посредством контроллера Omega MDSi8A. Для минимизации движения потоков нагретого воздуха заглушивалось внутреннее отверстие образца, и укладывалась теплоизоляция из минеральной ваты по нижней и верхней поверхностям обкладки высокотемпературной печи.



а

б

Рис. 3. Образец с прикрепленными термопарами (а) и уложенной теплоизоляцией на верхней поверхности высокотемпературной печи (б)

Fig. 3. Samples with attached thermal couples (a) and heat insulation laid down on the upper surface of the high-temperature furnace (b)

На рис. 3 показаны фотографии образца с закрепленными термопарами и уложенная между захватами

испытательной машины и высокотемпературной печью термоизоляцией. Перед началом испытаний в течение двух часов проводилась выдержка, обеспечивающая нагрев рабочей части образца до заданной температуры и достижение теплового равновесия в системе «печь–образец–захваты».

2. Результаты испытаний

Эксперименты на малоцикловую усталость при нормальной и повышенной температуре конструкционной стали ЭП517Ш проводили в режиме жесткого нагружения, когда в процессе двухосного деформирования контроль параметров цикла осуществляется по осевым и сдвиговым деформациям одновременно. Изменение деформаций в цикле задавали по линейным законам, позволяющим обеспечить постоянную скорость деформирования в осевом и в окружном направлениях. Скорости осевой и сдвиговой деформации составляли: $\dot{\epsilon} = 0,005 \text{ c}^{-1}$ и $\dot{\gamma} = 0,0033 \text{ c}^{-1}$, а максимальные значения деформаций в цикле равнялись: $\epsilon = 0,526 \%$ и $\gamma = 0,35 \%$. Циклические испытания проводили по трем программам нагружения, представленным на рис. 4. Схемы на рис. 4, а и б соответствуют пропорциональному изменению осевых и сдвиговых деформаций (простое нагружение с треугольной и М-образной формами цикла соответственно), а на рис. 4, в – непропорциональному (сложное нагружение). Коэффициенты асимметрии цикла $R_{\epsilon} = R_{\gamma} = 0$.

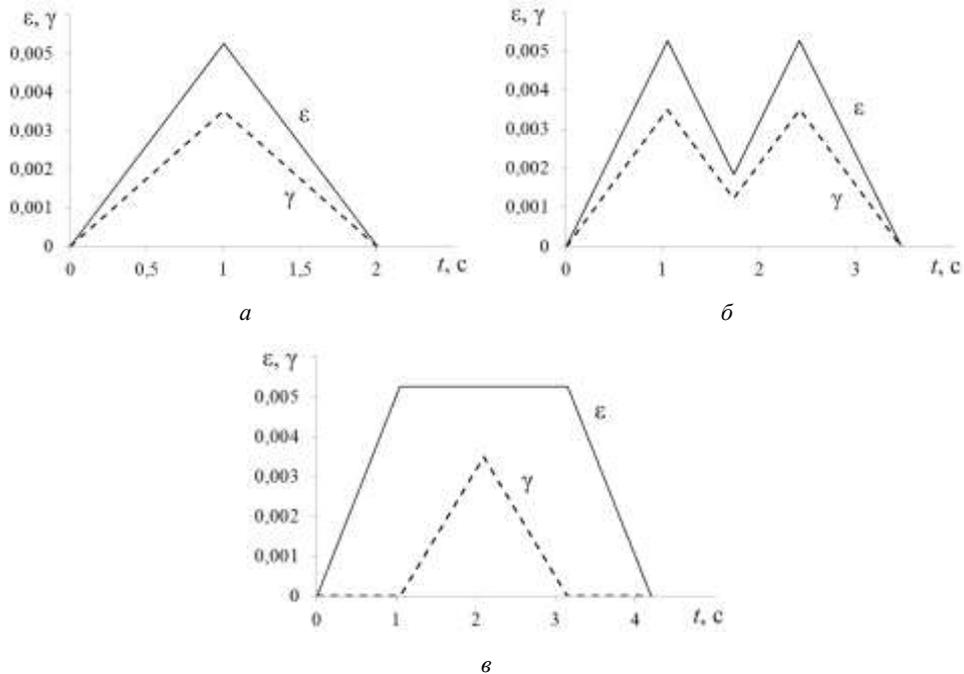


Рис. 4. Изменение осевых (сплошная) и сдвиговых (штриховая) деформаций при циклическом простом ((а) треугольная и (б) М-образная формы циклов) и сложном (в) нагружении

Fig. 4. Variation of axial (continuous) and shear (dashed) deformations under cyclic simple ((a) triangular and (b) M-shaped cycle modes) and complex (c) loading

В процессе испытания производили запись зависимостей нормальных напряжений от осевых деформаций и касательных напряжений от угла сдвига. На рис. 5 представлены указанные зависимости в виде петель гистерезиса, построенные для среднего по долговечности цикла. Используемое программное обеспечение позволяет в каждом цикле автоматически фиксировать максимальные и минимальные значения изменяющихся в эксперименте величин, что позволяет отслеживать

эволюцию пиковых значений от числа пройденных циклов. Например, по зависимости максимальных напряжений от количества циклов определялся момент разрушения образца. Образец считался разрушенным, если значение максимального нормального или касательного напряжения падало на 50 % по сравнению с аналогичными величинами, зафиксированными на первых циклах, или образец разделялся на две части. Результаты испытаний представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты испытаний на малоцикловую усталость при двухосном нагружении на растяжение-сжатие и кручение при температуре 20 °С

Table 1

Low-cycle fatigue test results under biaxial loading in tension-compression and torsion at the temperature of 20 °С

Номер образца	Максимальное напряжение в цикле, МПа		Минимальное напряжение в цикле, МПа		Размах напряжения, МПа		Коэффициент асимметрии		Число циклов до разрушения
	σ_{\max} , %	τ_{\max} , %	σ_{\min} , %	τ_{\min} , %	σ_r , %	τ_r , %	R_{σ}	R_{τ}	
Простое нагружение (треугольная форма цикла – рис. 4а)									
PK1410-03	593	132	-423	-149	1016	281	-0,71	-1,13	2500
PK1410-04	605	148	-402	-126	1007	274	-0,67	-0,85	5600
PK1410-05	624	151	-403	-140	1028	291	-0,65	-0,93	1850
PK1410-06	601	150	-407	-136	1008	286	-0,68	-0,90	4594
PK1410-19	672	160	-388	-121	1060	281	-0,58	-0,76	1839
Среднее число циклов									3277
Простое нагружение (М-образная форма цикла – рис. 4, б)									
PK1410-09	562	152	-396	-121	958	273	-0,70	-0,79	4200
PK1410-10	608	156	-407	-150	1015	306	-0,67	-0,97	1250
PK1410-11	649	161	-361	-136	1011	297	-0,56	-0,84	1706
PK1410-12	622	150	-383	-139	1005	290	-0,62	-0,93	1500
Среднее число циклов									2164
Сложное нагружение (рис. 4, в)									
PK1410-14	591	220	-445	-124	1036	344	-0,75	-0,57	2085
PK1410-15	646	204	-416	-114	1062	318	-0,64	-0,56	1116
PK1410-16	600	209	-439	-120	1040	329	-0,73	-0,57	1500
Среднее число циклов									1656

Таблица 2

Результаты испытаний на малоцикловую усталость при двухосном нагружении на растяжение-сжатие и кручение при температуре 600 °С

Table 2

Low-cycle fatigue test results under biaxial loading in tension-compression and torsion at the temperature of 600° С

Номер образца	Максимальное напряжение в цикле, МПа		Минимальное напряжение в цикле, МПа		Размах напряжения, МПа		Коэффициент асимметрии		Число циклов до разрушения
	σ_{\max} , %	τ_{\max} , %	σ_{\min} , %	τ_{\min} , %	σ_r , %	τ_r , %	R_{σ}	R_{τ}	
Простое нагружение (треугольная форма цикла – рис. 4, а)									
PK1425-20	451	90	-352	-69	803	159	-0,78	-0,77	2900
PK1425-21	456	85	-375	-72	831	157	-0,82	-0,85	1920
PK1425-22	464	94	-396	-85	859	179	-0,85	-0,90	2405
Среднее число циклов									2408
Простое нагружение (М-образная форма цикла – рис. 4, б)									
PK1425-23	368	72	-351	-61	719	134	-0,95	-0,84	620
PK1425-25	489	91	-388	-83	877	174	-0,79	-0,91	1320
PK1425-26	497	80	-367	-88	864	167	-0,74	-1,10	1702
Среднее число циклов									1214
Сложное нагружение (рис. 4, в)									
PK1425-27	410	156	-430	-59	840	216	-1,05	-0,38	1251
PK1425-28	401	165	-423	-62	824	228	-1,05	-0,38	1480
Среднее число циклов									1366

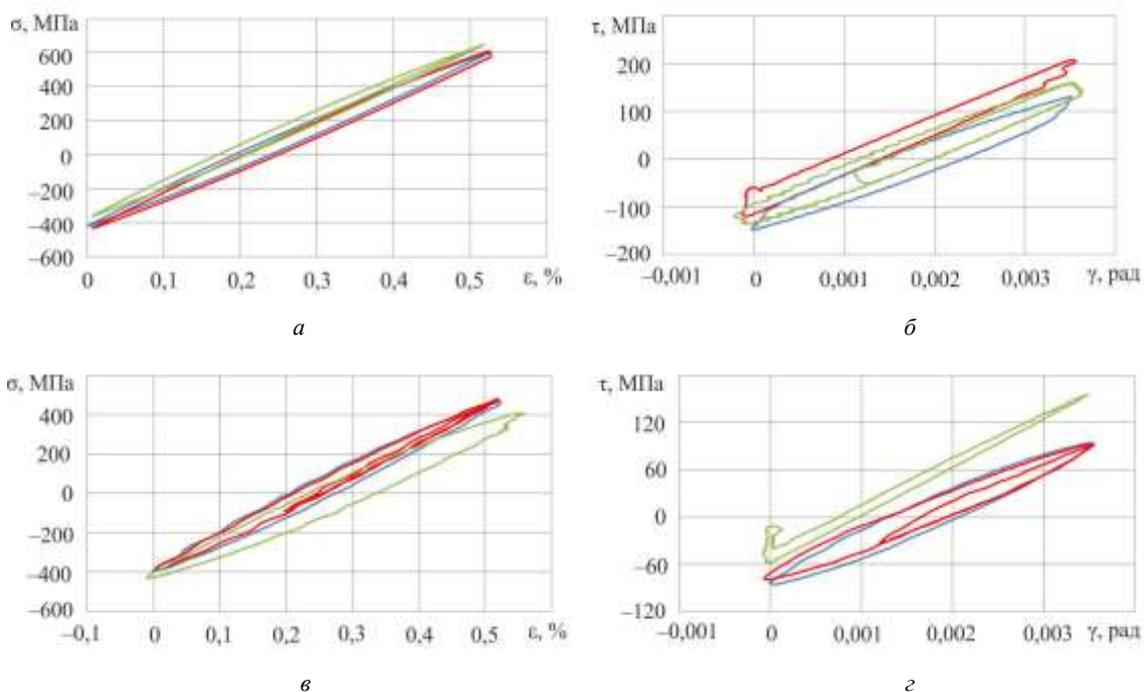


Рис. 5. Характерные петли гистерезиса малоциклового усталости при комнатной (*а* и *б*) и повышенной температуре (*в* и *г*) и трех разных схемах циклического деформирования (синий цвет – простое нагружение с треугольной формой цикла, красный цвет – простое нагружение с М-образной формой цикла, зеленый цвет – сложное нагружение)

Fig. 5. Characteristic hysteresis loops of low-cycle fatigue at room (*a* and *b*) and high temperatures (*c* and *d*) and three different cyclic deformation diagrams (blue – simple loading with a triangular cycle mode, red is simple loading with M- the figurative cycle mode, green color – complex loading)

Анализ приведенных в табл. 1 и 2 данных показывает, что для конструкционной стали ЭП517Ш при малоциклового усталости долговечность существенно зависит как от температуры, так и от траектории нагружения, даже в случае равенства задаваемых параметров цикла для осевой и сдвиговой деформаций. Можно сделать вывод, что в случае непропорционального деформирования процесс накопления повреждений развивается более интенсивно, что приводит к снижению ресурса стали ЭП517Ш примерно в два раза по сравнению с пропорциональным нагружением как при нормальной, так и при повышенной температуре (см. табл. 1). В свою очередь, долговечность конструкционной стали ЭП517Ш существенно зависит от температуры испытания для всех схем деформирования и снижается на 25% для треугольной и на 35% для М-образной форм циклов, а также на 20% в случае сложного деформирования.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрены методики проведения испытаний на малоциклового усталость в условиях двухосного циклического деформирования при растяжении-сжатии и кручении.

Проведены экспериментальные исследования малоциклового усталости при комнатной и повышенной, 650 °С, значениях температуры в условиях сложного напряженного состояния конструкционной стали ЭП517Ш при простом и сложном нагружении. Представлены новые данные о влиянии вида нагружения и повышенной температуры на усталостную долговечность конструкционной стали ЭП517Ш.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ (постановление № 220 от 09.04.2010, договор № 14.B25.310006 от 24.06.2013) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-41-590392).

Acknowledgements

This work was supported by the Government of the Russian Federation (Resolution No. 220 dated April 9, 2010, Contract No.14.B25.310006 dated June 24, 2013) and the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 16-41-590392).

Библиографический список

1. Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций // *Механика твердого тела*. – 2011. – № 6. – С. 22–33.
2. Влияние режимов двухосного нагружения на усталостную долговечность алюминиевого сплава Д16Т и стали 40ХГМА / В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков, О.А. Староверов, А.С. Янкин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2018. – № 4. – С. 169–177. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.16
3. Paul S.K. A Multiaxial Low Cycle Fatigue Life Prediction Model for Both Proportional and Non-proportional Loading Conditions // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2014. – Vol. 23(9). – P. 3100–3107.
4. Xiao-Wei Wang, De-Guang Shang, Yu-Juan Sun. A weight function method for multiaxial low-cycle fatigue life prediction under variable amplitude loading // *Journal of Strain Analysis*. – 2018. – Vol. 53(4). – P. 197–209.
5. An equivalent stress process for fatigue life estimation under multiaxial loadings based on a new non linear damage model / A. Aida, M. Bendouba, L. Aminallah, A. Amrouche, N. Benseddiq, M. Benguediab // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – Vol. 538. – P. 20–27.
6. Itoh T., Yang T. Material dependence of multiaxial low cycle fatigue lives under non-proportional loading // *International Journal of Fatigue*. – 2010. – Vol. 33. – P. 1025–1031.
7. Multiaxial low-cycle fatigue life evaluation under different non-proportional loading paths / W.L. Qu, E.N. Zhao, Q. Zhou, Y.-L. Pi // *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures*. – 2017. – Vol. 41. – Iss. 5. – P. 1064–1076.
8. Nikhamkin M., Ilinykh A. Low cycle fatigue and crack grown in powder nickel alloy under turbine disk wave form loading: validation of damage accumulation model // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 467. – P. 312–317.
9. Бондарь В.С., Даншин В.В., Семенов П.В. Численное моделирование нелинейных процессов накопления повреждений при циклических нагружениях // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 286–291.
10. Влияние ориентации критической плоскости на оценку многоциклового усталости при многоосном нагружении / A. Carpinteri, C. Ronchei, D. Scorza, S. Vantadori // *Физическая мезомеханика*. – 2015. – Т. 18, № 5. – С. 74–79.
11. Li B., Reis L., Freitas de M. Simulation of cyclic stress/strain evolutions for multiaxial fatigue life prediction // *International Journal of Fatigue*. – 2005. – Vol. 28. – P. 451–458.
12. Стрижиус В.Е. Методы расчета на усталость элементов авиационных конструкций при многоосном нагружении // *Научный вестник МГТУ ГА*. – 2014. – № 187. – С. 65–73.
13. Жернаков В.С., Семенова И.П., Ермоленко А.Н. Влияние напряженно-деформированного состояния деталей из объемных наноматериалов на усталостную прочность // *Вестник УГАТУ*. – 2009. – Т. 12, № 2(31). – С. 62–68.
14. Влияние кристаллографической ориентации отливок из сплава типа ВКНА на сопротивление малоциклового усталости [Электронный ресурс] / О.А. Базылева, М.С. Беляев, Е.М. Виск., Н.Ф. Шванова // *Литейное производство*. – 2012. – № 6. – URL: <https://viam.ru/public/files/2011/2011-205929.pdf> (дата обращения: 28.01.2018).
15. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин / А.А. Иноземцев, А.М. Ратчиев, М.Ш. Нихамкин, А.В. Ильиных, В.Э. Вильдеман, М.А. Вятчанин // *Тяжелое машиностроение*. – 2011. – № 4. – С. 30–33.
16. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. – 494 с.
17. Багмутов В.П., Савкин А.Н. Сравнительный анализ моделей накопления рассеянных повреждений в металле при нерегулярной переменной нагруженности // *Проблемы прочности*. – 2009. – № 6. – С. 95–104.
18. Богатов А.А., Колмогоров В.Л. Разрушение и деформируемость. – М.: Металлургия, 1976. – 485 с.
19. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
20. Букатый С.А. Назначение эквивалентных циклов нагружения стандартных образцов при испытаниях и прогнозировании малоциклового долговечности деталей ГТД // *Вестн. Рыб. гос. авиац. технол. акад. им. П.А. Соловьева*. – 2013. – № 1 (24). – С. 90–94.
21. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин (Ч. 1) // *Вестн. науч.-техн. развития*. – 2013. – № 11 (75). – С. 38–49.
22. Кирпичев В.А. Использование критерия остаточных напряжений для прогнозирования сопротивления усталости деталей при повышенных температурах // *Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. – 2006. – № 2–2(10). – С. 87–90.
23. Пачурин Г.В. Кинетика усталостного разрушения некоторых цветных металлов и сплавов при разных температурах [Электронный ресурс] // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 2. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12055> (дата обращения: 28.01.2018).
24. Humayun Kabir S.M., Yeo T. Influence of temperature on a low-cycle fatigue behavior of a ferritic stainless steel // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2014. – Vol. 28(7). – P. 2595–2607.
25. A new energy-based method to evaluate low-cycle fatigue damage of AISI H11 at elevated temperature / W. Du, Y. Luo, Y. Wang, S. Chen, D. Yu // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2017. – Vol. 40. – P. 994–1004.
26. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах / Е.Р. Голубовский, И.Л. Светлов, Н.В. Петрушин, С.А. Черкасова, М.Е. Волков // *Деформация и разрушение материалов*. – 2009. – № 8. – С. 41–48.
27. Экспериментальное исследование малоциклового усталости монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ВЖМ5 при высоких температурах / Е.В. Голубовский, М.Е. Волков, Н.М. Эммаусский, С.А. Шибяев // *Вестник УГАТУ*. – 2015. – Т. 9, № 3. – С. 119–125.
28. Пряхин В.В. Закономерности малоциклового деформирования, разрушения и влияние нестационарного нагружения на повреждаемость штамповых материалов в условиях эксплуатационных температур // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2014. – № 11. – С. 169–175.
29. Разрушение жаропрочного сплава вж175 в условиях жесткого малоциклового нагружения [Электронный ресурс] / В.Ф. Терентьев, М.С. Беляев, М.М. Бакрадзе, М.А. Горбовец, М.А. Гольдберг // *Труды ВИАМ*. – 2014. – № 11. – URL:

http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=744 (дата обращения: 28.01.2018).

30. Малоцикловая усталость при заданной деформации жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 [Электронный ресурс] / М.С. Беляев, В.Ф. Терентьев, М.А. Горбовец, М.М. Бахрадзе, О.С. Антонова // Труды ВИАМ. – 2015. – № 9. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=857 (дата обращения: 28.01.2018).

31. Беляев М.С., Горбовец М.А., Бахрадзе М.М. Изменение параметров упругопластического деформирования в процессе испытаний на МЦУ при жестком нагружении жаропрочного сплава ВЖ175 [Электронный ресурс] // Труды ВИАМ. – 2015. – № 12. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=896 (дата обращения: 28.01.2018).

32. Ильиных А.В., Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование механического поведения кон-

струкционных сплавов при двухосном циклическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 51. – С. 115–123.

33. Янкин А.С. Влияние частот бигармонического (двухчастотного) нагружения на механическое поведение имитатора твердого топлива // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 273–292. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.16

34. Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П. Закрытое деформирование сталей при плоском напряженном состоянии // Механика твердого тела. – 2014. – № 1. – С. 26–36.

35. Бабушкин А.В., Козлова А.В. Влияние предварительного циклического нагружения и температуры на остаточную прочность однонаправленных композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 235–244.

References

1. Burago N.G., Zhuravlev A.B., Nikitin I.S. Models of multi-axis fatigue failure and evaluation of the durability of structural elements // Mechanics of a solid body. – 2011. – No. 6. – P. 22-33.

2. Wildemann V.E., Tretyakov M.P., Staroverov O.A., Yankin A.S. Influence of the biaxial loading regimes on fatigue life of 2024 aluminum alloy and 40CrMnMo steel. PNRPU Mechanics Bulletin, 2018, no. 4, pp. 169-177. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.16

3. S.K. Paul. A Multiaxial Low Cycle Fatigue Life Prediction Model for Both Proportional and Non-proportional Loading Conditions // Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, Vol. 23(9), P.3100–3107.

4. Xiao-Wei Wang, De-Guang Shang, Yu-Juan Sun A weight function method for multiaxial low-cycle fatigue life prediction under variable amplitude loading // Journal of Strain Analysis, 2018, Vol. 53(4), P.197-209.

5. A. Aida, M. Bendouba, L. Aminallah, A. Amrouche, N. Benseddiq, M. Benguediab An equivalent stress process for fatigue life estimation under multiaxial loadings based on a new non linear damage model // Materials Science and Engineering A.2012.Vol.538.P.20-27.

6. T. Itoh a, T. Yang Material dependence of multiaxial low cycle fatigue lives under non-proportional loading // International Journal of Fatigue, 2010, Vol.33, P.1025-1031.

7. W.L. Qu, E.N. Zhao, Q. Zhou, Y.-L. Pi Multiaxial low-cycle fatigue life evaluation under different non-proportional loading paths // Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, 2017, Vol.41.Iss. 5, P.1064-1076.

8. Nikhamkin M., Ilinykh A. Low cycle fatigue and crack grown in powder nickel alloy under turbine disk wave form loading: validation of damage accumulation model // Applied Mechanics and Materials, 2013, Vol. 467, P. 312-317.

9. Bondar V.S., Danshin V.V., Semenov P.V. Numerical modeling of nonlinear processes of damage accumulation due to cyclic loading // Computational continuum mechanics, 2013, Vol.6, №3, P. 286-291.

10. Carpinteri A., Ronchei C., Scorza D., Vantadori S. Influence of the orientation of the critical plane on the assessment of multicyclic fatigue under multiaxial loading // Physical mesomechanics, 2015, Vol. 18, Iss. 5, P. 74-79.

11. B. Li, L. Reis, M. de Freitas. Simulation of cyclic stress/strain evolutions for multiaxial fatigue life prediction // International Journal of Fatigue, 2005, Vol.28, P.451-458.

12. Strizhius V.E. Methods for calculating the fatigue of aircraft structure elements under multiaxial loading // Scientific Gazette of MGTU GA, 2014, No. 187, P. 65-73.

13. Zhernakov V.S., Semenova I.P., Ermolenko A.N. Influence of the stress strain behavior condition of details from volume nanomaterials on fatigue strength // Vestnik UGATU, 2009. Vol. 12. No. 2(31), P.62-68.

14. Bazyleva O.A., M.S. Belyaev, E.M. Visik., N.F. Shvaynova Vliyaniye kristallograficheskoy orientacii otlivok iz splava tipa VKNA na soprotivleniye ustalosti [electronic document] // Litejnoe proizvodstvo, 2012, No. 6. (<https://viam.ru/public/files/2011/2011-205929.pdf>). Checked 28.01.2018.

15. Inozemtsev A.A., Ratchiev A.M., Nihamkin M.Sh., Ilyinikh A.V., Vildeman V.E., Vyatchanin M.A. Low-cycle fatigue and cyclic crack resistance of a nickel alloy under loading characteristic for turbine disks // Heavy mechanical engineering, 2011, No. 4, P. 30-33.

16. Mahutov N.A. Konstrukcionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost': V 2 ch., Novosibirsk: Nauka, 2005, Ch.1: Kriterii prochnosti i resursa, 494 p.

17. Bagmutov V.P., Savkin A.N. Comparative analysis of models of accumulation of dispersed damages in metals under irregular variable loading // Strength of Materials, 2009, Vol. 41, Iss. 6, P. 664-671.

18. Bogatov A.A. Razrusheniye i deformiruemost' / A.A. Bogatov, V.L. Kolmogorov. – M.: Metallurgiya, 1976, P. 485.

19. Parton V.Z., Morozov E.M. Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya / Izd. 2-e pererab. i dop. M.: Nauka, 1985, P. 504.

20. Bykaty S.A. Assignment of standard samples equivalent loading cycles at testing and forecasting of GTE parts low-cycle fatigue life // Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, 2013, Vol. 1(24), P. 90-94.

21. Romanov A.N. Problemy materialovedeniya v mekhanike deformirovaniya i razrusheniya na stadii obrazovaniya treshchin (chast' 1) // Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya, 2013, Vol. 11 (75), P. 38-49.

22. Kirpichev V.A. Use of criterion average residual stresses for forecasting a limit of endurance of details at the increased temperature // VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2006, Vol. 2-2(10), P. 87-90.

23. Pachurin G.V. Kinetics of fatigue failure in copper m1 and brass l63 at different temperatures [electronic document] // Mo-

dern problems of science and education, 2014, Vol. 2. (<http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12055>). Checked 28.01.2018.

24. S.M. Humayun Kabir, T. Yeo. Influence of temperature on a low-cycle fatigue behavior of a ferritic stainless steel // *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, Vol. 28(7), P.2595-2607.

25. W Du, Y Luo, Y Wang, S Chen, D Yu A new energy-based method to evaluate low-cycle fatigue damage of AISI H11 at elevated temperature // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2017, Vol.40, P. 994-1004.

26. Golubovskij E.R., Svetlov I.L., Petrushin N.V., Cherkasova S.A., Volkov M.E. Malociklovaya ustalost' monokristallov zharoprochnykh nikelovykh splavov ppi povyshennykh tepepatupah // *Deformaciya i razrushenie materialov*, 2009, № 8, S. 41-48.

27. Golubovskij E.V., Volkov M.E., EHmmausskij N.M., Shibaev S.A. The experimental study of low-cycle fatigue of single crystals of heat-resistant Ni-base alloy VGM5 at high temperatures // *Vestnik UGATU*, 2015, Vol. 9, No. 3, P. 119-125.

28. Priakhin V.V. Laws malotciklovoj deformation, fracture and the impact on damage nonstationary naeruzheniya die materials under operating temperatures // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy*, 2014, No. 11. P. 169–175.

29. Terentyev V.F., Belyaev M.S., Bakradze M.M., Gorbovets M.A., Goldberg M.A. Destruction of heat resisting alloy vzh175 in the conditions of tough low-cyclic loading [electronic document] // *Works VIAM*, 2014, No. 11. (http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=744). Checked 28.01.2018.

30. Belyaev M.S., Terentyev V.F., Gorbovets M.A., Bakradze M.M., Antonova O.S. Low-cyclic fatigue at the set deformation of heat resisting nickel VZh175 alloy [electronic document] // *Works VIAM*, 2015, No. 9. (http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=857). Checked 28.01.2018.

31. Belyaev M.S., Gorbovets M.A., Bakradze M.M. Change of parameters of elasto-plastic deformation in the course of tests on LCF at tough loading of heat resisting VZh175 alloy [electronic document] // *Works VIAM*, 2015, No. 12. (http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=896). Checked 28.01.2018.

32. Ilinykh A.V., Wildeman V.E., Tretyakov M.P. Experimental research of the mechanical behavior of structural alloys under biaxial cyclic loading // *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2017, Vol. 51, P. 115-123.

33. Yankin A.S. Biharmonic (two-frequency) load frequencies influence on mechanical behavior of solid propellant simulator. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2015. No. 4. Pp. 273-292. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.16

34. Wildemann V.E., Lomakin E.V., Tretyakov M.P. Postcritical deformation of steels in plane stress state conditions // *Mechanics of Solids*. – 2014. – Vol. 49, Issue 1. – pp. 18-34. DOI 10.3103/S0025654414010038

35. Babushkin A. V., Kozlova A. V. Impact of preliminary cyclic loading and temperature on residual strength of unidirectional composites // *Composites: Mechanics, Computations, Applications*. – 2011. – Vol.2. – №2. – P. 223-232.