



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.16

УДК 620.178.32

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Центр экспериментальной механики, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 30 октября 2018 г.
Принята: 04 декабря 2018 г.
Опубликована: 28 декабря 2018 г.

Ключевые слова:

усталость, многоосное нагружение, смешанные моды нагружения, сложное напряженное состояние, растяжение, кручение, металлы, усталостная долговечность, эксперимент, постоянные составляющие напряжений.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена изучению усталостной долговечности металлических материалов при различных схемах многоосного непропорционального нагружения, приводящего к возникновению сложного напряженно-деформированного состояния. Представлены результаты экспериментальных исследований усталостной долговечности конструкционной легированной стали 40ХГМА и сплава алюминия Д16Т при двухосном циклическом нагружении. Циклические испытания проведены на двухосевой электродинамической испытательной системе Instron ElectroPuls E10000 в условиях совместного растяжения-сжатия и кручения сплошных цилиндрических образцов корсетного типа. Рассмотрены методические вопросы проведения циклических испытаний при смешанных модах нагружения и получены соответствующие новые опытные результаты. Экспериментальные данные приведены в виде точек на графиках и соответствующих аппроксимирующих линий, отражающих зависимости числа циклов до разрушения от относительных величин постоянных составляющих касательных и нормальных напряжений. Во всех испытаниях задаваемые величины дополнительных составляющих компонент напряжений не превышали значений соответствующих условных пределов текучести, которые были предварительно определены в испытаниях на квазистатическое растяжение и кручение для каждого материала. На основе результатов испытаний проведена оценка влияния постоянной составляющей касательных напряжений на долговечность исследуемых материалов при циклическом растяжении-сжатии, а также рассмотрено влияние постоянной составляющей нормальных напряжений на долговечность при циклическом кручении. Показано, что в результате воздействия постоянных составляющих напряжений как в условиях циклического растяжения-сжатия, так и циклического кручения наблюдается снижение числа циклов до разрушения образцов. Полученные данные демонстрируют необходимость оценки допустимых пределов постоянных составляющих компонент напряжений, которые не будут приводить к значимому снижению долговечности изделий, работающих в условиях циклического нагружения.

© ПНИПУ

© Вильдеман Валерий Эрвинович – д.ф.-м.н., проф., e-mail: wildemann@pstu.ru, ID: [0000-0002-6240-4022](https://orcid.org/0000-0002-6240-4022).

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

Староверов Олег Александрович – н.с., e-mail: cem_staroverov@mail.ru, ID: [0000-0001-6095-0962](https://orcid.org/0000-0001-6095-0962).

Янкин Андрей Сергеевич – к.т.н., н.с., e-mail: yas.cem@yandex.ru, ID: [0000-0002-0895-4912](https://orcid.org/0000-0002-0895-4912).

Valerii E. Wildemann – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: wildemann@pstu.ru,

ID: [0000-0002-6240-4022](https://orcid.org/0000-0002-6240-4022).

Mikhail P. Tretyakov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail:

cem_tretyakov@mail.ru, ID: [0000-0001-6146-6769](https://orcid.org/0000-0001-6146-6769).

Oleg A. Staroverov – Researcher, e-mail: cem_staroverov@mail.ru, ID: [0000-0001-6095-0962](https://orcid.org/0000-0001-6095-0962).

Andrey S. Yankin – CSc in Technical Sciences, Researcher, e-mail: yas.cem@yandex.ru,

ID: [0000-0002-0895-4912](https://orcid.org/0000-0002-0895-4912).



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)

INFLUENCE OF THE BIAxIAL LOADING REGIMES ON FATIGUE LIFE OF 2024 ALUMINUM ALLOY AND 40CRMNMO STEEL

V.E. Wildemann, M.P. Tretyakov, O.A. Staroverov, A.S. Yankin

Perm National Research Polytechnic University, Center of Experimental Mechanics, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 October 2018
Accepted: 04 December 2018
Published: 28 December 2018

Keywords:

fatigue, multiaxial loading, mixed mode loading, complex stress-strain state, tension, torsion, metals, fatigue life, experiment, constant stress components.

ABSTRACT

The work studies the fatigue life of metallic materials under various schemes of multiaxial non-proportional loading which lead to the occurrence of a complex stress-strain state. We present the results of the experimental study of the fatigue life of 40CrMnMo structural alloyed steel and 2024 aluminum alloy under biaxial cyclic loading. Cyclic tests were carried out on the Instron ElectroPuls E10000 biaxial electrodynamic test system under joint tension-compression and torsion of solid cylindrical corset-type samples. The methodological issues of conducting cyclic tests with a mixed modes loading are considered and the corresponding new experimental results are obtained. The experimental data are presented in the form of points on the graphs and corresponding approximating lines which reflect the dependence of the number of cycles to failure on the relative values of the constant components of the tangential and normal stresses. In all the tests, the specified values of the additional parts of the stress components did not exceed the values of the corresponding conditional yield strengths, which were previously determined in the quasistatic tensile and torsion tests for each material. Based on the test results, the influence of the constant component of tangential stresses on the fatigue life of the materials under cyclic tension-compression was evaluated, and the effect of the constant component of normal stresses on the fatigue life under cyclic torsion was considered. It is shown that because of the constant stress components, both under cyclic tension-compression and cyclic torsion, there is a decrease in the number of cycles before the specimens break. The obtained data demonstrate the necessity to estimate the allowable limits of the constant parts of the stress components, which will not lead to a significant reduction in the fatigue life of structures operating under cyclic loading conditions.

© PNRPU

Введение

Подавляющее число ответственных элементов конструкций при эксплуатации подвергается комплексным, в том числе многоосным, циклическим нагрузкам, и оценка их влияния на долговечность металлических материалов является важной практической задачей [1–5], а необходимость изучения процессов усталости в условиях сложного напряженного состояния послужила причиной появления экспериментальных работ в данной области с использованием специализированных технических устройств и методик многоосного нагружения. Среди наиболее крупных научных центров, занимающихся вопросами исследования проблем многоосной усталости, можно выделить университет ENSAM в Бордо, Франция (Т. Palin-Luc, N. Saintier, F. Morel) [6, 7], университет Ополе, Польша (Т. Lagoda) [8], университет Шеффилда, Великобритания (L. Sumsel) [9], университет Лиссабона, Португалия (V. Anes, L. Reis, M. de Freitas) [10, 11], Институт механики им. С.П. Тимошенко в Киеве, Украина (Голуб В.П.) [12], Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского в Москве, Россия (Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С.) [13, 14] и др. [15].

Основными схемами нагружения являются двухосное растяжение крестообразных образцов, растяжение с кручением и изгиб с кручением цилиндрических образцов. При этом внимание уделяется не только пропорци-

ональному циклическому нагружению, но и более сложным режимам со сдвигом фаз по различным модам воздействий, с отличием частот и других характеристик циклического изменения напряжений или деформаций, с различными несинусоидальными формами циклов [16–20]. Помимо испытаний сплошных корсетных и трубчатых образцов имеют место испытания образцов сварных соединений [21, 22], образцов с проточками [23] и другими концентраторами напряжений [24].

Циклические воздействия также могут быть осложнены асимметрией цикла вследствие наличия статических нагрузок, обусловленных, например, силами тяжести или линейной перегрузкой. Кроме того, статические нагрузки могут возникать по отличному от циклических осям, в результате чего наблюдаются, например, циклические нагрузки изгиба с постоянным кручением и др. Вопросами влияния асимметрии цикла нагружения на усталостное поведение различных материалов занимались Гербер [25], Гудман [26], Морроу [27], Смит [28], Одинг [29], Биргер [30] и др. [31–35]. Результаты экспериментальных исследований, как правило, отражаются на диаграмме Хейга (амплитуда напряжения – среднее напряжение в цикле), при этом предлагаются различные зависимости для их описания. На основании представленных работ можно сделать вывод, что увеличение значения среднего напряжения приводит к снижению усталостной выносливости. Данный эффект достаточно сильно проявляется для хрупких материалов (таких

как чугун) как при растяжении, так и при кручении [34]. Однако этот эффект проявляется менее существенно при кручении, чем при растяжении для пластичных материалов (таких как стали и алюминиевые сплавы) [31]. Так, некоторые авторы [5, 36, 37] предлагают не учитывать изменения среднего напряжения при кручении до тех пор, пока максимальные значения напряжения кручения не превышают предел текучести. При этом предел усталости при симметричном цикле обычно составляет 2/3 от предела текучести при кручении [38], поэтому в литературе встречается относительно небольшое количество экспериментальных исследований при максимальных напряжениях ниже предела текучести. Отметим также, что при циклических нагрузках в области сжатия наблюдается рост усталостной выносливости более значительный для хрупких материалов, менее – для пластичных [5, 32].

В целом схожее поведение демонстрируют материалы при действии постоянных статических составляющих в условиях непропорциональных многоосных нагрузок (например, переменный изгиб с постоянным кручением и т.д.) [5, 36, 37, 39, 40], однако исследований в данной области существенно меньше, чем при одноосных воздействиях, а также отсутствует комплексный подход к изучению. Кроме того, в работах в основном уделяется внимание пределу выносливости при базах более 10^6 циклов, то есть рассматриваются такие нагрузки, при которых материал (условно) может выдержать неограниченное количество циклов нагружения. Однако при проектировании конструкций с установленным (ограниченным) сроком службы с целью экономии ресурсов важно определять не только предел выносливости, но и получать кривые усталости при различных уровнях дополнительных статических составляющих.

Таким образом, целью работы является исследование усталостной долговечности материала при различных значениях статических составляющих многоциклового многоосного непропорционального нагружения (растяжение-сжатие с кручением), приводящего к появлению сложного напряженно-деформированного состояния.

1. Используемые материалы и оборудование

Экспериментальные исследования по оценке долговечности металлических материалов при многоосном циклическом нагружении проводились на образцах алюминиевого сплава Д16Т и легированной стали 40ХГМА, изготовленных с учетом требований ГОСТ 25.502 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость». На рис. 1 представлен эскиз используемых образцов корсетного типа, которые изготавливались из одной партии прутков сплава алюминия диаметром 10 мм, находящегося в состоянии поставки, и из заготовки буровой штанги диаметром 22 мм (сталь 40ХГМА) без дополнительной термической обработки. Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 1. Перед испытаниями были проведены маркировка и замер диаметров рабочей части образцов с точностью 0,01 мм.

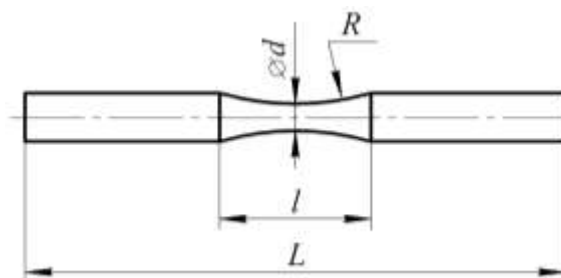


Рис. 1. Эскиз образца корсетного типа для испытаний на усталость

Fig. 1. Sketch of the corset-type sample for fatigue tests

Способ изготовления образцов обеспечивал минимальный разогрев материала при обработке. Для образцов сплава алюминия Д16Т диаметр рабочей части составлял $d = 5,0$ мм, для образцов стали 40ХГМА $d = 4,0$ мм. Радиус корсетной части образцов составлял не менее $R = 20,0$ мм. Размеры захватных частей выбирались исходя из требований надежного закрепления в захватах испытательной машины. Всего испытано 62 образца корсетного типа.

Таблица 1

Химический состав используемых материалов

Table 1

Chemical composition of used materials

| 40ХГМА | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V | Cu | Al |
| 0,402 | 0,275 | 0,874 | <0,005 | <0,003 | 0,882 | 0,274 | 0,252 | 0,005 | 0,159 | 0,010 |

| Д16Т | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|--|
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Pb | |
| 0,29 | 0,28 | 4,28 | 0,75 | 1,48 | 0,017 | 0,009 | 0,12 | 0,06 | 0,05 | |

Использованное при проведении экспериментальных исследований программное обеспечение позволяет автоматически останавливать испытание по одному из трех критериев: при превышении максимального уровня ускорения (примерно 6,5 g), при превышении ограничений по перемещениям или по нагрузке в каждом цикле (данные ограничения задавались примерно в 1,2 раза больше наблюдаемых значений в эксперименте). Это позволяет связать остановку испытания с появлением макротрещины на поверхности образца или разделением его на части.

Для определения статических характеристик исследуемых материалов и построения программы усталостных испытаний были проведены испытания на квазистатическое растяжение и кручение цилиндрических образцов в соответствии с рекомендациями ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» и ГОСТ 3565–80 «Металлы. Метод испытания на кручение». Образцы были изготовлены из материала той же плавки, что и для испытаний на усталость. Для квазистатических испытаний сплава алюминия Д16Т использовались цилиндрические образцы с диаметром рабочей части $d = 6,0$ мм, длиной $l = 36,0$ мм, а для стали 40ХГМА $d = 10,0$ мм, $l = 60,0$ мм.

Испытания проводились на двухосевой сервогидравлической системе Instron 8850 (100 кН/1000 Нм, 30 Гц) и универсальной электродинамической системе Instron ElectroPuls E10000 (10 кН/100 Нм, 100 Гц), предназначенных для проведения как одноосных, так и двухосных статических и циклических испытаний при растяжении-сжатии и кручении. Измерение перемещений для построения диаграмм деформирования и определения основных механических характеристик реализовано с применением навесных экстензометров Instron 2620-601 при растяжении и Epsilon 3550-010M при кру-

чении. Испытательные системы и экстензометры обеспечивают точность измерения нагрузок, перемещений и деформаций с погрешностью не более 0,5 % от измеряемой величины.

2. Результаты испытаний

Для определения параметров нагружения проведены опыты на квазистатическое растяжение и кручение образцов исследуемых материалов. По результатам испытаний определены следующие механические характеристики: модуль Юнга E , модуль сдвига G , пределы пропорциональности при растяжении $\sigma_{\text{пл}}$ и кручении $\tau_{\text{пл}}$, условные пределы текучести при растяжении $\sigma_{0,2}$ и кручении $\tau_{0,3}$, остаточное удлинение после разрыва δ , относительное поперечное сужение ψ . Полученные характеристики представлены в табл. 2 для каждого материала.

На основании полученных данных об основных механических характеристиках рассматриваемых материалов была разработана программа испытаний, состоящая из трех частей (табл. 3).

Первая часть предусматривает экспериментальную оценку влияния постоянной составляющей касательного напряжения на усталость при знакопеременном растяжении-сжатии. В данной части программы испытаний использовались образцы стали 40ХГМА. Реализовано несколько уровней амплитуды нормальных напряжений при постоянном коэффициенте асимметрии цикла $R = -0,5$. Было выбрано два уровня касательных напряжений $\tau = 200$ МПа и $\tau = 400$ МПа, что соответствует $0,35 \tau_{0,3}$ и $0,7 \tau_{0,3}$. Уровни задаваемых нормальных напряжений выбирались таким образом, чтобы при отсутствии дополнительного касательного напряжения получить данные о долговечности стали в диапазоне от $5 \cdot 10^4$ до 10^6 циклов.

Таблица 2

Механические характеристики исследуемых материалов

Table 2

Mechanical properties of used materials

| Материал | E , ГПа | $\sigma_{\text{пл}}$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | δ , % | ψ , % | G , ГПа | $\tau_{\text{пл}}$, МПа | $\tau_{0,3}$, МПа |
|----------|-------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|--------------|------------|-------------|--------------------------|--------------------|
| 40ХГМА | 210,1 ± 1,1 | 771,9 ± 41,4 | 910,4 ± 4,2 | 1018,8 ± 6,5 | 15,9 ± 0,5 | 49,2 ± 2,2 | 86,1 ± 1,05 | 411,9 ± 15,9 | 574,2 ± 9,5 |
| Д16Т | 75,4 ± 0,9 | 307 ± 41 | 336 ± 52 | – | – | – | 30,0 ± 1,8 | 124 ± 5 | 153 ± 8 |

Таблица 3

Программа испытаний

Table 3

Test program

| Параметры режима | Вид циклического нагружения | | |
|---|--|--|--------------------------------------|
| | Растяжение-сжатие | | Кручение |
| | Материал образцов | | |
| | 40ХГМА | Д16Т | Д16Т |
| Частота испытания, Гц | 50 | 50 | 3,4 |
| Коэффициент асимметрии цикла | -0,5 | -1 | -1 |
| Амплитуда напряжений в цикле | 0,5 $\sigma_{0,2}$ ÷ 0,61 $\sigma_{0,2}$ | 0,5 $\sigma_{0,2}$; 0,61 $\sigma_{0,2}$ | 0,7 $\tau_{0,3}$; 0,75 $\tau_{0,3}$ |
| Величина постоянной составляющей напряжений | 0,35 $\tau_{0,3}$; 0,7 $\tau_{0,3}$ | 0 ÷ 0,84 $\tau_{0,3}$ | 0 ÷ 0,6 $\sigma_{0,2}$ |
| Количество образцов | 22 | 36 | 26 |

Полученные экспериментальные данные приведены на рис. 2 в простых (а) и двойных логарифмических (б) координатах. Точками обозначены опытные данные, полученные при $\tau = 0$ МПа (●), $\tau = 200$ МПа (◆), $\tau = 400$ МПа (▲). Линии на рисунках соответствуют степенной аппроксимации опытных данных.

Из приведенных данных видно, что наличие постоянной составляющей касательных напряжений при осевом растяжении-сжатии образцов стали 40ХГМА приводит к снижению числа циклов до разрушения. Для возможности количественной оценки снижения долговечности на уровне максимальных нормальных напряжений $\sigma_{\max} = 600$ МПа испытано по три образца при каждом значении постоянных касательных напряжений. Снижение среднего числа циклов до разрушения при наличии дополнительных касательных напряжений $\tau = 0,35 \tau_{0,3}$ составило 1,6 раза (293 752 и 185 163 циклов), а при $\tau = 0,7 \tau_{0,3}$ снижение составило 2,4 раза (293 752 и 122 108 циклов).

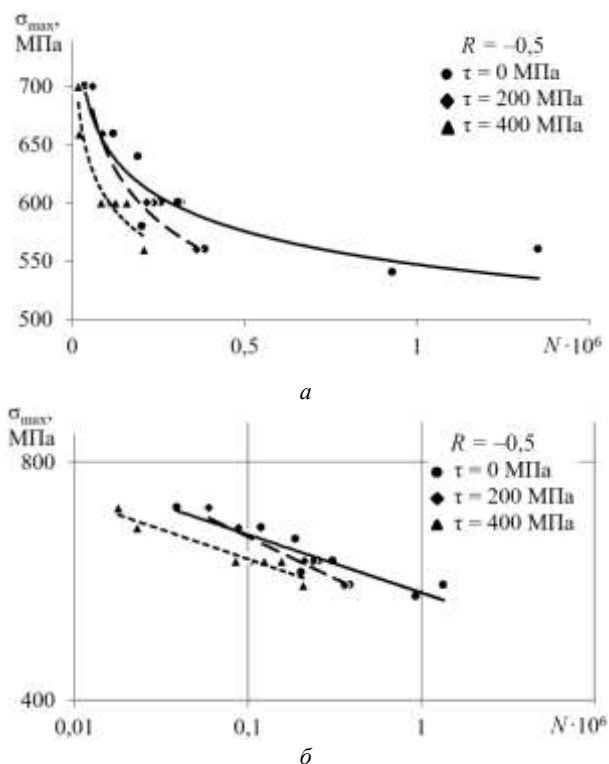


Рис. 2. Кривые усталости стали 40ХГМА, соответствующие степенной аппроксимации (линии), построенные в простых (а) и двойных логарифмических (б) координатах, полученные при различных уровнях постоянной составляющей касательного напряжения, и экспериментальные данные (точки): $\tau = 0$ МПа (●), $\tau = 200$ МПа (◆), $\tau = 400$ МПа (▲)
 Fig. 2. Fatigue curves of steel 40CrMnMo correspond to power approximation (lines) in simple (a) and double logarithmic (b) coordinates, which are obtained under various levels of constant components of shear stress and experimental data (dots): $\tau = 0$ МПа (●), $\tau = 200$ МПа (◆), $\tau = 400$ МПа (▲)

Как уже отмечалось, для пластичных материалов значение предела усталостной выносливости с увеличением среднего напряжения уменьшается менее интен-

сивно при кручении, чем при растяжении. Некоторые авторы [5, 36, 37] предлагают пренебрегать данным эффектом до тех пор, пока максимальные значения напряжения кручения не превышают предел текучести, что отражено в моделях многоосной усталости, например критерии Сайнса [5], Кроссланда [41], Пападополуса [42] и т.д. На целесообразность учета средних напряжений кручения также указывают авторы статьи [40]. В работах Беннебаха [36, 37] снижение предела выносливости на базе $3 \cdot 10^6$ циклов при постоянной составляющей кручения, равной пределу текучести, составило менее 8 %. Однако на основе данных [31] можно отметить, что даже при незначительном снижении предела выносливости в условиях кручения при наличии постоянной составляющей напряжений той же моды, число циклов до разрушения при заданных уровнях амплитуды напряжений будет существенно снижаться.

Во второй части программы испытаний для оценки влияния величины постоянной составляющей касательного напряжения относительно условного предела текучести при сдвиге реализованы испытания в диапазоне от $\tau = 0$ до $\tau = 0,84\tau_{0,3}$ при циклическом растяжении-сжатии. Для этого были использованы образцы сплава алюминия Д16Т. Было выбрано два уровня амплитуды нормальных напряжений $\sigma_a = 0,5\sigma_{0,2}$ и $\sigma_a = 0,61\sigma_{0,2}$ при коэффициенте асимметрии цикла $R = -1$.

В результате испытаний получены опытные данные (рис. 3), приведенные в виде зависимости долговечности (числа циклов до разрушения образца) от величины постоянных касательных напряжений при заданных амплитудах нормальных напряжений. Точки соответствуют экспериментальным данным, а линии – аппроксимации полученных данных по экспоненциальному закону.

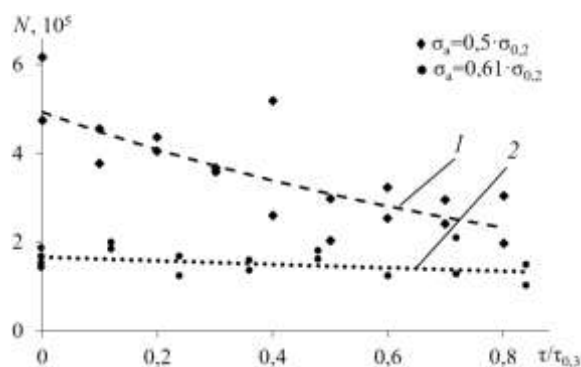


Рис. 3. Зависимость усталостной долговечности сплава Д16Т при циклическом растяжении с амплитудами $\sigma_a = 0,5\sigma_{0,2}$ (1) и $\sigma_a = 0,61\sigma_{0,2}$ (2) от постоянной составляющей касательных напряжений
 Fig. 3. Dependence of the fatigue life of 2024 alloy under cyclic tension with amplitudes $\sigma_a = 0,5\sigma_{0,2}$ (1) and $\sigma_a = 0,61\sigma_{0,2}$ (2) versus constant component of shear stresses

При испытаниях наблюдалось снижение долговечности материала при увеличении постоянной составляющей касательных напряжений. При меньшем значении

амплитуды нормальных напряжений в цикле снижение долговечности при увеличении постоянной составляющей касательных напряжений является более выраженной. Так, при дополнительном действии постоянных касательных напряжений величиной $\tau = 0,8\tau_{0,3}$ наблюдается снижение числа циклов до разрушения при амплитуде нагружения, составляющей $\sigma_a = 0,5\sigma_{0,2}$, на уровне 53 % по сравнению с номинальным нагружением данной амплитуды (кривая 1). При амплитуде нагружения $\sigma_a = 0,61\sigma_{0,2}$ происходит снижение числа циклов до разрушения на уровне 20 % (кривая 2).

В третьей части программы испытаний проведена опытная оценка влияния постоянной составляющей нормальных напряжений в диапазоне от $\sigma = 0$ до $\sigma = 0,6\sigma_{0,2}$ на усталостную долговечность сплава алюминия Д16Т при циклическом кручении. Проведены две серии испытаний с уровнями амплитуды касательных напряжений в цикле $\tau_a = 0,7\tau_{0,3}$ и $\tau_a = 0,75\tau_{0,3}$ при коэффициенте асимметрии цикла $R = -1$. Полученные опытные данные приведены на рис. 4 в виде зависимости долговечности (числа циклов до разрушения образца) от величины постоянных нормальных напряжений при заданных амплитудах касательных напряжений. Точки на рисунке соответствуют опытным данным, а линии – аппроксимации полученных данных по экспоненциальному закону.

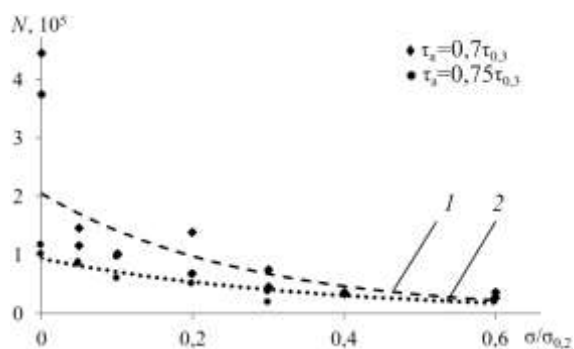


Рис. 4. Зависимость долговечности сплава Д16Т при циклическом кручении с амплитудами $\tau_a = 0,7 \tau_{0,3}$ (1) и $\tau_a = 0,75 \tau_{0,3}$ (2) от постоянной составляющей нормальных напряжений

Fig. 4. Dependence of the fatigue life of 2024 alloy under cyclic torsion with amplitudes $\tau_a = 0,7 \tau_{0,3}$ (1) and $\tau_a = 0,75 \tau_{0,3}$ (2) versus constant component of normal stresses

В результате проведенных испытаний наблюдалось аналогичное, как во второй части программы испытаний, снижение долговечности материала при увеличении постоянной составляющей нормальных напряжений. При меньшем значении амплитуды касательных напряжений в цикле снижение долговечности при увеличении постоянной составляющей нормальных напряжений является более выраженным.

В конце следует также отметить, что разбросы экспериментальных значений оказались существенными. Поэтому, хотя и наблюдается тенденция снижения числа циклов до разрушения при увеличении постоянных составляющих напряжений, количество опытов при одних и тех же параметрах нагружения не позволяет однозначно судить о виде этих зависимостей. Необходимо увеличение числа экспериментов.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование, направленное на оценку влияния постоянных составляющих компонент напряжений при циклическом нагружении по различным компонентам в опытах на совместное растяжение с кручением цилиндрических образцов корсетного типа, изготовленных из сплава алюминия Д16Т и конструкционной стали 40ХГМА. Показано, что в результате воздействия постоянных составляющих напряжений как в условиях циклического растяжения-сжатия, так и циклического кручения наблюдается снижение числа циклов до разрушения образцов. Причем реализованные величины постоянных составляющих напряжений заведомо не превышали соответствующих значений условных пределов текучести для рассмотренных материалов. Полученные опытные результаты могут рассматриваться в качестве данных для прочностных расчетов в части установления допустимых пределов постоянных составляющих компонент напряжений, возникающих в конструкциях, которые не будут приводить к значимому снижению долговечности изделий, работающих в условиях циклического нагружения.

Благодарности

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-01-00239 А).

Часть испытаний была проведена в рамках государственного задания Минобрнауки России (9.7529.2017/П220).

Acknowledgments

The work was carried out at Perm National Research Polytechnic University with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (Grant Nr. 16-01-00239 A).

Some part of the experiments was obtained within the State Assignment of the Ministry of Education and Science of Russia (9.7529.2017/П220).

Библиографический список

1. Серенсен С.В. Усталость материалов и элементов конструкций: моногр. – Киев: Наукова думка, 1985. – 256 с.
2. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Ч. 1. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 347 с.
3. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. – М.: Наука, 2015. – 484 с.
4. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
5. Sines G. Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stress, National Advisory Committee for Aeronautics (N.A.C.A.). – Washington, Technical Note 3495, 1955. – 69 p.
6. Statistical assessment of multiaxial HCF criteria at the grain scale / A. Hor, N. Saintier, R. Camille, T. Palin-Luc, F. Morel // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 67. – P. 151–158. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.01.024
7. Non-local energy based fatigue life calculation method under multiaxial variable amplitude loadings / N. Saintier, T. Palin-Luc, J. Benabes, F. Cocheteux // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 54. – P. 68–83. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.12.013
8. Kluger K., Lagoda T. New energy model for fatigue life determination under multiaxial loading with different mean values // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 66. – P. 229–245. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.04.008
9. Susmel L. Four stress analysis strategies to use the Modified Wohler Curve Method to perform the fatigue assessment of weldments subjected to constant and variable amplitude multiaxial fatigue loading // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 67. – P. 38–54. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.12.001
10. New approach for analysis of complex multiaxial loading paths / V. Anes, L. Reis, B. Li, M. Fonte, M. De Freitas // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 62. – P. 21–33. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.05.004
11. Reis L., Li B., De Freitas M. Crack initiation and growth path under multiaxial fatigue loading in structural steels // International Journal of Fatigue. – 2009. – Vol. 31. – P. 1660–1668. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.01.013
12. Голуб В.П. К решению задач усталости при двухосном комбинированном нагружении на основе классических критериев разрушения // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 2. – С. 139–146.
13. Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций // Изв. РАН. МТТ. – 2011. – № 6. – С. 22–33.
14. Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Сверхмногоцикловое усталостное разрушение титановых дисков компрессора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 1. – С. 52–67.
15. Шаняевский А.А. Эквивалентное напряжение одноосного циклического растяжения как энергетическая характеристика усталости металла в условиях многопараметрического нагружения // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 33–42.
16. Anes V., Reis L., De Freitas M. Asynchronous multiaxial fatigue damage evaluation // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 101. – P. 421–429. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.02.051
17. Anes V., Reis L., De Freitas M. Multiaxial fatigue damage accumulation under variable amplitude loading conditions // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 101. – P. 117–125. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.02.016
18. Marciniak Z., Rozumek D., Macha E. Fatigue lives of 18G2A and 10HNAP steels under variable amplitude and random non-proportional bending with torsion loading // International Journal of Fatigue. – 2008. – Vol. 30. – Iss. 5. – P. 800–813. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.07.001
19. Multiaxial fatigue of titanium including step loading and load path alteration and sequence effects / N. Shamsei, M. Gladyskiy, K. Panasovskiy, S. Shukaev, A. Fatemi // International Journal of Fatigue. – 2010. – Vol. 32. – Iss. 11. – P. 1862–1874. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.05.006
20. Xia T., Yao W. Comparative research on the accumulative damage rules under multiaxial block loading spectrum for 2024-T4 aluminum alloy // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 48. – P. 257–265. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.004
21. Fatigue strength of laser beam welded thin steel structures under multiaxial loading / C.M. Sonsino, M. Kueppers, M. Eibl, G. Zhang // International Journal of Fatigue. – 2006. – Vol. 28. – Iss. 5–6. – P. 657–662. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.09.013
22. Susmel L., Askes H. Modified Wohler Curve Method and multiaxial fatigue assessment of thin welded joints // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 43. – P. 30–42. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.026
23. Multiaxial fatigue life prediction for various metallic materials based on the critical plane approach / J. Li, Z. Zhang, Q. Sun, C. Li // International Journal of Fatigue. – 2011. – Vol. 33. – Iss. 2. – P. 90–101. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.07.003
24. Gates N., Fatemi A. Notched fatigue behavior and stress analysis under multiaxial states of stress // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 67. – P. 2–14. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.01.014
25. Gerber H. Bestimmung der zulässigen Spannungen in Eisenkonstruktionen // Z. Bayerischen Architekten Ingenieur-Vereins. – 1874. – Vol. 6. – P. 101–110.
26. Goodman J. Mechanics Applied to Engineering. – Longmans Green: London, UK, 1899.
27. Morrow J. Fatigue properties of metals, Section 3.2. In Fatigue Design Handbook; Pub. No. AE-4; SAE. – Warrendale, PA, USA, 1968.
28. Smith J.O. The effect of range of stress on the fatigue strength of metals. – University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin series. – 1942. – No. 334.
29. Одинг И.А. Прочность металлов: Металловедение. – Л.: Гл. ред. лит. по черной металлургии, 1935. – 624 с.
30. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
31. Influence of mean shear stress on the torsional fatigue behaviour of 34CrNiMo6 steel / L. Pallarés-Santasmartas, J. Albizuri, A. Avilés, N. Saintier, J. Merzeau // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 113. – P. 54–68. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.04.008
32. Mean Stress Effect on the Axial Fatigue Strength of DIN 34CrNiMo6 Quenched and Tempered Steel / L. Pallarés-Santasmartas, J. Albizuri, A. Avilés, R. Avilés // Metals. – 2018. – Vol. 8. – Iss. 4. – No. 213. DOI: 10.3390/met8040213
33. Cyclic torsion very high cycle fatigue of VDSiCr spring steel at different load ratios / H. Mayer, R. Schuller, U. Karr, D. Irrasch, M. Fitzka, M. Hahn, M. Bacher-Höchst // International Journal of Fatigue. – 2015. – Vol. 8. – P. 322–327. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.10.007
34. Experimental investigation of the multiaxial fatigue strength of ductile cast iron / R. Tovo, P. Lazzarin, F. Berto, M. Cova,

E. Maggiolini // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2014. – Vol. 73. – P. 60–67. DOI: 10.1016/j.tafmec.2014.07.003

35. Mean stress sensitivity and crack initiation mechanisms of spring steel for torsional and axial VHCF loading / H. Mayer, R. Schuller, U. Karr, M. Fitzka, D. Irrasch, M. Hahn, M. Bacher-Höchst // International Journal of Fatigue. – 2016. – Vol. 93. – P. 309–317. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.04.017

36. Bennebach M., Palin-Luc T. Effect of static and intermittent shear stress on the fatigue strength of notched components under combined rotating bending and torsion // Procedia Engineering, 6th Fatigue Design Conference, Fatigue Design. – 2015. – Vol. 133. – P. 107–114. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.635

37. Bennebach M., Palin-Luc T., Messenger A. Effect of mean shear stress on the fatigue strength of notched components under multiaxial stress state // Procedia Engineering, 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design. – 2018. – Vol. 213. – P. 25–35. DOI: 10.1016/j.proeng.2018.02.004

38. Wang C.H., Miller K.J. The effect of mean shear stress on torsional fatigue behavior // Fatigue and Fracture of Engineer-

ing Materials and Structures. – 1991. – Vol. 14. – Iss. 2–3. – P. 293–307. DOI: 10.1111/j.1460-2695.1991.tb00659.x

39. Močilnik V., Gubeljak N., Predan J. The Influence of a Static Constant Normal Stress Level on the Fatigue Resistance of High Strength Spring Steel // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2017. – Vol. 91. – P. 139–147. DOI: 10.1016/j.tafmec.2017.06.002

40. Papuga J., Halama R. Mean stress effect in multiaxial fatigue limit criteria // Archive of Applied Mechanics. – 2018. – P. 1–12. DOI: 10.1007/s00419-018-1421-7

41. Crossland B. Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel, Proc. Int. Conf. Fatigue of Metals, London. – 1956. – pp. 138–149.

42. A comparative study of multiaxial high cycle fatigue criteria for metals / I.V. Papadopoulos, P. Davoli, C. Gorla, M. Filippini, A. Bernasconi // International Journal of Fatigue. – 1997. – Vol. 19. – Iss. 3. – P. 219–235. DOI: 10.1016/S0142-1123(96)00064-3

References

1. Serensen S.V. Ustalost' materialov i e'lementov konstrukcij [Fatigue of materials and structural elements]. Kiev, Naukova dumka, 1985, 256 p.

2. Troshhenko V.T., Sosnovskij L.A. Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov [Fatigue resistance of metals and alloys]. Kiev, Naukova Dumka, 1987, 347 p.

3. Terent'ev V.F., Korableva S.A. Ustalost' metallov [Metal fatigue]. Moscow, Nauka, 2015, 484 p.

4. Matvienko Yu.G. Modeli i kriterii mexaniki razrusheniya [Models and criteria for fracture mechanics]. Moscow, Fizmatlit, 2006, 328 p.

5. Sines G. Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stress, National Advisory Committee for Aeronautics (N.A.C.A). Washington, Technical Note 3495, 1955, 69 p.

6. Hor A., Saintier N., Camille R., Palin-Luc T., Morel F. Statistical assessment of multiaxial HCF criteria at the grain scale. International Journal of Fatigue, 2014, vol. 67, pp. 151–158. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.01.024

7. Saintier N., Palin-Luc T., Benabes J., Cochetex F. Non-local energy based fatigue life calculation method under multiaxial variable amplitude loadings. International Journal of Fatigue, 2013, vol. 54, pp. 68–83. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.12.013

8. Kluger K., Lagoda T. New energy model for fatigue life determination under multiaxial loading with different mean values. International Journal of Fatigue, 2014, vol. 66, pp. 229–245. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.04.008

9. Susmel L. Four stress analysis strategies to use the Modified Wohler Curve Method to perform the fatigue assessment of weldments subjected to constant and variable amplitude multiaxial fatigue loading. International Journal of Fatigue, 2014, vol. 67, pp. 38–54. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.12.001

10. Anes V., Reis L., Li B., Fonte M., De Freitas M. New approach for analysis of complex multiaxial loading paths. International Journal of Fatigue, 2014, vol. 62, pp. 21–33. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.05.004

11. Reis L., Li B., De Freitas M. Crack initiation and growth path under multiaxial fatigue loading in structural steels. International Journal of Fatigue, 2009, vol. 31, pp. 1660–1668. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.01.013

12. Golub V.P. K resheniyu zadach ustalosti pri dvuhosnom kombinirovannom nagruzhenii na osnove klassicheskikh kriteriev

razrusheniya [To solving problems of fatigue under biaxial combined loading based on classical fracture criteria]. Vestnik dvigatelestroeniya, 2014, no.2, pp.139–146.

13. Burago N.G., ZHuravlev A.B., Nikitin I.S. Modeli mnogoosnogo ustalostnogo razrusheniya i ochenka dolgovechnosti ehlementov konstrukcij [Models of multiaxial fatigue failure and assessment of the durability of structural elements]. Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela, 2011, no.6, pp.22–33.

14. Burago N.G., ZHuravlev A.B., Nikitin I.S. Very-high-cycle fatigue failure of titanium compressor disks. PNRPU Mechanics Bulletin, 2013, no.1, pp.52–67.

15. Shanyavskiy A.A. EHkvivalentnoe napryazhenie odnoosnogo ciklicheskogo rastyazheniya kak ehnergeticheskaya harakteristika ustalosti metalla v usloviyah mnogoparametricheskogo nagruzheniya [Equivalent uniaxial cyclic tensile stress as an energy characteristic of metal fatigue under multiparameter loading]. Physical Mesomechanics, 2017, vol.20, no.4, pp.33–42.

16. Anes V., Reis L., De Freitas M. Asynchronous multiaxial fatigue damage evaluation. Procedia Engineering, 2015, vol. 101, pp. 421–429. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.02.051

17. Anes V., Reis L., De Freitas M. Multiaxial fatigue damage accumulation under variable amplitude loading conditions. Procedia Engineering, 2015, vol. 101, pp. 117–125. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.02.016

18. Marciniak Z., Rozumek D., Macha E. Fatigue lives of 18G2A and 10HNAP steels under variable amplitude and random non-proportional bending with torsion loading. International Journal of Fatigue, 2008, vol. 30, no. 5, pp. 800–813. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.07.001

19. Shamsei N., Gladskiy M., Panasovskiy K., Shukaev S., Fatemi A. Multiaxial fatigue of titanium including step loading and load path alteration and sequence effects. International Journal of Fatigue, 2010, vol. 32, no. 11, pp. 1862–1874. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.05.006

20. Xia T., Yao W. Comparative research on the accumulative damage rules under multiaxial block loading spectrum for 2024-T4 aluminum alloy. International Journal of Fatigue, 2013, vol. 48, pp. 257–265. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.004

21. Sonsino C.M., Kueppers M., Eibl M., Zhang G. Fatigue strength of laser beam welded thin steel structures under multiaxial loading. International Journal of Fatigue, 2006, vol. 28, no. 5–6, pp. 657–662. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.09.013

22. Susmel L., Askes H. Modified Wohler Curve Method and multiaxial fatigue assessment of thin welded joints. *International Journal of Fatigue*, 2012, vol. 43, pp. 30-42. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.026
23. Li J., Zhang Z., Sun Q., Li C. Multiaxial fatigue life prediction for various metallic materials based on the critical plane approach. *International Journal of Fatigue*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 90-101. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.07.003
24. Gates N., Fatemi A. Notched fatigue behavior and stress analysis under multiaxial states of stress. *International Journal of Fatigue*, 2014, vol. 67, pp. 2-14. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.01.014
25. Gerber H. Bestimmung der zulässigen Spannungen in Eisenkonstruktionen. *Z. Bayerischen Architekten Ingenieur-Vereins*, 1874, 6, 101-110.
26. Goodman J. *Mechanics Applied to Engineering*; Longmans Green: London, UK, 1899.
27. Morrow J. Fatigue properties of metals, Section 3.2. In *Fatigue Design Handbook*; Pub. No. AE-4; SAE: Warrendale, PA, USA, 1968.
28. Smith J.O. The effect of range of stress on the fatigue strength of metals. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin series, No. 334, 1942.
29. Oding I.A. Prochnost' metallov: Metallovedenie [Metal strength: Metallurgy]. *Leningrad, ONTI NKTP*, 1935, 624 p.
30. Birger I.A. Raschet na prochnost' detalej mashin: Spravochnik [Calculation of the strength of machine parts]. *Moscow, Mashinostroenie*, 1979, 702 p.
31. Pallarés-Santasmartas L., Albizuri J., Avilés A., Saintier N., Merzeau J. Influence of mean shear stress on the torsional fatigue behaviour of 34CrNiMo6 steel. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 113, pp. 54-68. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.04.008
32. Pallarés-Santasmartas L.; Albizuri J.; Avilés A.; Avilés R. Mean Stress Effect on the Axial Fatigue Strength of DIN 34CrNiMo6 Quenched and Tempered Steel. *Metals*, 2018, vol. 8, no. 213. DOI: 10.3390/met8040213
33. Mayer H., Schuller R., Karr U., Irrasch D., Fitzka M., Hahn M., Bacher-Höchst M. Cyclic torsion very high cycle fatigue of VDSiCr spring steel at different load ratios. *International Journal of Fatigue*, 2015, vol. 8, pp. 322-327. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.10.007
34. Tovo R., Lazzarin P., Berto F., Cova M., Maggiolini E. Experimental investigation of the multiaxial fatigue strength of ductile cast iron. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014, vol. 73, pp. 60-67. DOI: 10.1016/j.tafmec.2014.07.003
35. Mayer H., Schuller R., Karr U., Fitzka M., Irrasch D., Hahn M., Bacher-Höchst M. Mean stress sensitivity and crack initiation mechanisms of spring steel for torsional and axial VHCF loading. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 93, pp. 309-317. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.04.017
36. Bennebach M., Palin-Luc T. Effect of static and intermittent shear stress on the fatigue strength of notched components under combined rotating bending and torsion. *Procedia Engineering, 6th Fatigue Design conference, Fatigue Design*, 2015, vol. 133, pp. 107-114. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.635
37. Bennebach M., Palin-Luc T., Messenger A. Effect of mean shear stress on the fatigue strength of notched components under multiaxial stress state. *Procedia Engineering, 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design*, 2018, vol. 213, pp. 25-35. DOI: 10.1016/j.proeng.2018.02.004
38. Wang C.H., Miller K.J. The effect of mean shear stress on torsional fatigue behavior. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1991, vol. 14, no. 2-3, pp. 293-307. DOI: 10.1111/j.1460-2695.1991.tb00659.x
39. Močilnik V., Gubelj N., Predan J. The Influence of a Static Constant Normal Stress Level on the Fatigue Resistance of High Strength Spring Steel. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2017, vol. 91, pp. 139-147. DOI: 10.1016/j.tafmec.2017.06.002
40. Papuga J., Halama R. Mean stress effect in multiaxial fatigue limit criteria. *Archive of Applied Mechanics*, 2018, pp. 1-12. DOI: 10.1007/s00419-018-1421-7
41. Crossland B. Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel. *London, Proc. Int. Conf. Fatigue of Metals*, 1956, pp. 138-149.
42. Papadopoulos I.V., Davoli P., Gorla C., Filippini M., Bernasconi A. A comparative study of multiaxial high cycle fatigue criteria for metals. *International Journal of Fatigue*, 1997, vol. 19, no 3, pp. 219-235. DOI: 10.1016/S0142-1123(96)00064-3