DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.11

УДК 620.178.3

А.В. Ильиных, В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ДВУХОСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассматриваются вопросы экспериментального исследования мало- и многоциклового усталости конструкционных сплавов авиационного назначения при двухосном циклическом нагружении. Приведены характеристики специализированных испытательных систем Instron 8850 и Instron E10000, отличительной особенностью которых является возможность задания произвольных законов нагружения в осевом и окружном направлениях. Представлены методики испытаний при двухосном циклическом нагружении, позволяющие изучать закономерности механического поведения и разрушения конструкционных сплавов в условиях сложного напряженного состояния. Проведены испытания жаропрочной легированной стали ЭП517Ш на малоцикловую усталость при циклическом деформировании с пропорциональным и непропорциональным изменением осевой и сдвиговой деформаций. Показано, что для фиксированных величин амплитуд осевых и сдвиговых деформаций долговечность стали ЭП517Ш существенно зависит от траектории деформирования. В случае непропорционального деформирования ресурс стали ЭП517Ш снижается в два раза по сравнению с пропорциональным нагружением. Для алюминиевого сплава Д16Т получены новые результаты испытаний на многоцикловую усталость, иллюстрирующие зависимость долговечности алюминиевого сплава Д16Т при осевом циклировании с фиксированным значением амплитуды нормальных напряжений от наличия постоянной и небольшой по величине составляющей касательного напряжения.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, малоцикловая усталость, многоцикловая усталость, сложное нагружение, сложное напряженное состояние.

A.V. Ilinykh, V.E. Wildeman, M.P. Tretyakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF STRUCTURAL ALLOYS UNDER BIAXIAL CYCLIC LOADING

The problems of experimental investigation of low- and high-cycle fatigue of structural alloys for aviation purposes under biaxial cyclic loading are considered. Specialized testing systems Instron 8850 and Instron E10000 are provided. Their identifying feature is possibility to specify arbitrary loading laws in the axial and circumferential directions. The experimental procedures for biaxial cyclic loading, which allow for studying the regularities of mechanical behavior and destruction of structural alloys under conditions of a complex stress state, are presented. Low-cycle fatigue tests of alloy during cyclic deformation with proportional and non-proportional changes of axial and shear strains were carried out. It is shown, that for the constant ranges of axial and shear deformations amplitudes longevity of alloy depends on deformation path. In the case of a disproportionate deformation the resource of the alloy is reduced by half compared with the proportional loading. New results for the high-cycle fatigue tests of aluminum alloy are obtained. There are illustrate the dependence of the durability of the aluminum alloy in axial cycling with a fixed value of the normal stresses amplitudes on the presence of a constant and small components of the shear stress.

Keywords: experimental research, low cycle fatigue, multi-cycle fatigue, complex loading, combined stress.

Введение

Анализ современной научной литературы позволяет сделать вывод об актуальности задач прогнозирования прочности ответственных элементов конструкций на основе изучения процессов накопления повреждений при циклически изменяющихся нагрузках и экспериментального исследования механического поведения конструкционных сталей авиационного назначения [1–5]. Расчеты напряженно-деформированного состояния ответственных элементов конструкции газотурбинного двигателя показывают, что усталостное разрушение протекает в условиях многоосного напряженного состояния, реализующегося в зонах сложной геометрии [6, 7].

В большинстве случаев для оценки циклического ресурса при сложном напряженном состоянии используются различные методы расчета, основанные на сопоставлении результатов численного моделирования напряженного состояния элемента конструкции и последующего вычисления усталостной долговечности по различным критериям с данными экспериментальных исследований. В основу критериев расчета на усталость элементов авиационных конструкций при многоосном циклическом нагружении закладывается переход от сложного напряженного состояния к некоторым величинам амплитуды эквивалентных напряжений (например, максимальное главное или касательное напряжение, интенсивность напряжений и т.п.). 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 [6, 7].

Более сложным методом оценки циклической долговечности является метод критической плоскости, в основе которого заложены параметры двухосности и угла разориентации максимального главного напряжения. Для каждого потенциально опасного места на поверхности элемента конструкции проводится расчет напряженного состояния и определяется наиболее опасная (критическая) плоскость, для которой затем определяется усталостная долговечность. Метод критической плоскости часто используется при сложном нагружении [6, 7].

На взгляд авторов статьи, для оценки критических параметров разных моделей ограничение только экспериментами при одноосном нагружении является нецелесообразным для случая многоосного напряженного состояния, так как взаимодействие различных комбинаций циклически изменяющихся напряжений может существенным образом влиять на долговечность конструкционных сплавов. Что приводит к необходимости разработки новых методик экспериментальных исследований мало- и многоциклового усталости конструкционных сплавов в условиях сложного напряженного состояния.

Методики испытаний

Одной из самых простых с точки зрения технической реализации многоосного нагружения является схема испытаний при растяжении-сжатии и кручении. В Центре экспериментальной механики ПНИПУ имеются двухосные испытательные системы Instron 8850 и Instron E10000, внешний вид которых представлен на рис. 1. Два независимых привода и современная система управления данными установок позволяют реализовать различные комбинации циклических и статических воздействий, что дает широкие возможности при проведении циклических и статических испытаний в условиях сложного напряженного состояния и сложного нагружения, а также позволяет планировать испытания для оценки механических свойств материала после различных предварительных воздействий [8–11].

Измерение прикладываемых усилий и моментов в процессе испытания осуществляется с использованием двухосевых датчиков нагрузки Dynacell с диапазонами нагрузок $\pm 160 / \pm 1$ кН·м при осевом нагружении и ± 10 кН / ± 100 Н·м при кручении с точностью измерения 0,5 %, установленных на испытательных машинах Instron 8850 / Instron E10000 соответственно.

Для проведения экспериментов в области малоциклового усталости применяется динамический двухосевой экстензометр фирмы Epsilon с базой измерения 10 мм и диапазонами измерений осевых деформаций ± 5 % и углов закручивания $\pm 4^\circ$ (рис. 2). Двухосевой экстензометр позволяет проводить испытания в режиме жесткого нагружения и реализовать различные траектории деформирования при пропорциональном и непропорциональном изменении осевых и сдвиговых деформаций. На основе показаний двухосевого датчика деформаций для каждого цикла записывается диаграмма деформирования, анализ которой позволяет, например, определять накопленную поврежденность, прогнозировать усталостную долговечность и исследовать закономерности механического поведения конструкционных сплавов [12–15]. Для испытаний

на многоцикловую усталость применение датчиков деформаций необязательно, так как деформирование осуществляется при нагрузках, не превышающих предела пропорциональности.

Рис. 1. Сервогидравлическая испытательная система Instron 8850 (*а*) и электромеханическая испытательная система Instron E10000 (*б*)

Рис. 2. Прикрепленный на образец двухосевой датчик деформаций

В соответствии со стандартом ГОСТ 25.502–79 для проведения циклических испытаний на растяжение-сжатие и кручение можно использовать сплошные или трубчатые образцы. Применение тонкостенных трубчатых образцов позволяет реализовать в поперечном сечении образца практически однородное напряженно-деформированное состояние, что является удобным для последующей интерпретации результатов испытаний. В отличие от трубчатых в сплошных образцах в поперечном сечении реализуется неоднородное напряженное состояние из-за пропорциональной зависимости величины касательных напряжений от расстояния между центром и рассматриваемой точкой сечения.

На рис. 3 приведен пример эскиза образца с кольцевым поперечным сечением, который разработан с учетом требований стандартов ASTM E2207-02, ГОСТ 25.505–85 и ГОСТ 25.502–79. При изготовлении трубчатых образцов необходимо уделять повышенное внимание качеству внутренней поверхности образца, на которой должны отсутствовать концентраторы напряжений в виде рисок от обрабатывающего инструмента, которые могут привести к существенному снижению долговечности.

Рис. 3. Эскиз тонкостенного трубчатого образца для циклических испытаний на растяжение с кручением

Результаты испытаний на малоцикловую усталость

Для испытаний на малоцикловую усталость была изготовлена партия образцов из жаропрочной легированной 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 %), которая используется при изготовлении валов авиационных двигателей. Образцы изготавливались из прутка диаметром 24 мм в состоянии поставки без дополнительной термической обработки.

Циклические испытания стали ЭП517Ш проводились в режиме жесткого нагружения, когда в процессе двухосного деформирования управление осуществляется по осевым и сдвиговым деформациям одновременно. Изменение деформаций в цикле осуществлялось по линейному закону, обеспечивающему постоянную скорость деформирования в осевом и окружном направлениях. Скорости осевой и сдвиговой деформации составляли $\dot{\epsilon} = 0,005 \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\gamma} = 0,0033 \text{ с}^{-1}$ соответственно. Циклические испытания проводились по двум программам нагружения, представленным на рис. 4. Схема на рис. 4, а соответствует пропорциональному изменению осевых и сдвиговых деформаций (простое нагружение), а на рис. 4, б – непропорциональному (сложное нагружение). Коэффициенты асимметрии цикла равнялись $R_{\epsilon} = R_{\gamma} = 0$.

Рис. 4. Схема изменения осевых (сплошная линия) и сдвиговых (штриховая линия) деформаций при циклическом нагружении

В процессе испытания производилась регистрация зависимостей нормальных напряжений от осевых деформаций и касательных напряжений от угла сдвига. На рис. 5 и 6 представлены указанные зависимости в виде петель гистерезиса, построенные для первого и среднего по долговечности циклов. Используемое программное обеспечение позволяет в каждом цикле фиксировать максимальные и минимальные значения изменяющихся в эксперименте величин, что помогает 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 % от величины на первых циклах. Результаты испытаний представлены в таблице.

Рис. 5. Характерные петли гистерезиса при малоциклового усталости и простом нагружении (образец № PK1410-04)

Рис. 6. Характерные петли гистерезиса при малоциклового усталости и сложном нагружении (образец № PK1410-17)

Результаты испытаний на малоцикловую усталость при двухосном нагружении на растяжение-сжатие и кручение

Номер образца	Максимальная деформация в цикле, %		Минимальная деформация в цикле, %		Размах деформации в цикле, %		Число циклов до разрушения N
	$\varepsilon_{\max}$	$\gamma_{\min}$	$\varepsilon_{\min}$	$\gamma_{\min}$	ε_p	γ_p	
Простое нагружение (см. рис. 4, а)							
PK1410-03	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	2500
PK1410-04	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	5600
PK1410-05	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	1850
PK1410-06	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	4594
PK1410-19	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	1839
Среднее число циклов							3277
Сложное нагружение (см. рис. 4, б)							
PK1410-14	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	2085
PK1410-15	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	1116
PK1410-17	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	1500
Среднее число циклов							1656

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что для конструкционной стали ЭП517Ш при малоцикловой усталости долговечность существенно зависит 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 в два раза по сравнению с пропорциональным нагружением.

Результаты испытаний на многоцикловую усталость

Для проведения экспериментов на многоцикловую усталость использовалась универсальная электромеханическая система Instron E10000, позволяющая проводить испытания с частотой до 100 Гц. Из-за относительно невысокой нагружающей способности машины (до 10 кН) использовались сплошные образцы корсетного типа с минимальным диаметром в рабочей части 5 мм из алюминиевого сплава Д16Т.

Рис. 7. Схема изменения нормальных (сплошная линия) и касательных (штриховая линия) напряжений при циклическом нагружении

Испытания проводились в режиме мягкого нагружения при фиксированном значении касательного напряжения и циклически осевом нагружении с амплитудой нормальных напряжений 280 МПа и коэффициентом асимметрии $R_\sigma = -1$. Величина постоянной составляющей касательного напряжения τ по отношению к пределу текучести при кручении $\tau_{0,3}$, определенному ранее по результатам статических испытаний на кручение, изменялась в диапазоне от 0 до 0,6. Схема циклического нагружения при $\tau/\tau_{0,3} = 4$ представлена на рис. 7. Результаты экспериментальных исследований многоцикловой усталости в условиях сложного напряженного состояния в виде зависимости числа циклов до разрушения от величины постоянной составляющей касательного напряжения приведены на рис. 8.

Рис. 8. Зависимость усталостной долговечности алюминиевого сплава Д16Т от заданной величины касательного напряжения при одноосном циклическом нагружении

Анализ полученных данных испытаний на многоцикловую усталость показывает, что наличие небольшой по величине составляющей касательного напряжения существенно снижает долговечность алюминиевого сплава Д16Т при одноосном циклическом нагружении и фиксированном значении амплитуды нормальных напряжений.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрены методики проведения испытаний для мало- и многоциклового усталости в условиях двухосного циклического нагружения.

Проведены экспериментальные исследования малоциклового усталости в условиях сложного напряженного состояния стали ЭП517Ш при простом и сложном нагружении и многоциклового усталости при растяжении-сжатии с кручением алюминиевого сплава Д16Т. Представлены новые данные о влиянии вида нагружения и постоянной сдвиговой составляющей на усталостную долговечность конструкционных сплавов авиационного назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 16-41-590392 и № 16-01-00239).

Библиографический список

1. Узбяков Д.М. Исследование характеристик циклической трещиностойкости гранульного сплава на никелевой основе с разной фракцией гранул // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 40. – С. 122–134.
2. Тихонов А.С., Сендюров С.И., Хайрулин В.Т. Проектирование установки для термоциклических испытаний комплексных многослойных теплозащитных покрытий лопаток газовых турбин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 38. – С. 61–71.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Стрижиус В.Е. Методы расчета на усталость элементов авиационных конструкций при многоосном нагружении // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 187. – С. 65–73.

7. 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.
8. 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
9. Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П. Закритическое деформирование сталей при плоском напряженном состоянии // Механика твердого тела. – 2014. – № 1. – С. 26–36.
10. 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.
11. Бабушкин А.В., Гордеева А.В. Экспериментальное исследование усталости порошкового структурно-неоднородного материала при двуосном (растяжение-кручение) нагружении // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2011. – № 2. – С. 48–52.
12. Разрушение жаропрочного сплава ВЖ175 в условиях жесткого малоциклового нагружения / В.Ф. Терентьев, М.С. Беляев, М.М. Бакрадзе, М.А. Горбовец, М.А. Гольдберг // Труды ВИАМ. – 2014. – № 11. – С. 12.
13. Малоцикловая усталость при заданной деформации жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 / М.С. Беляев, В.Ф. Терентьев, М.А. Горбовец, М.М. Бакрадзе, О.С. Антонова // Труды ВИАМ. – 2015. – № 9. – С. 1.
14. Беляев М.С., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М. Изменение параметров упругопластического деформирования в процессе испытаний на МЦУ при жестком нагружении жаропрочного сплава ВЖ175 // Труды ВИАМ. – 2015. – № 12. – С. 4.
15. Исследование малоциклового усталости жаропрочных сплавов при «жестком» цикле нагружения / М.А. Горбовец, М.С. Беляев, И.А. Ходинев, М.И. Лукьянова // Цветные металлы. – 2017. – № 2. – С. 91–95.

References

1. Uzbyakov D.M. Issledovanie kharakteristik tsiklicheskoй treshchinostoykosti granulnogo splava na nikelovoy osnove s raznoy fraktsiey granul [Investigation of the characteristics of the cyclic crack resistance of a granular alloy on a nickel base with a different fraction of granules]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2015, No. 40, pp. 122–134.
2. Tikhonov A.S., Sendyurev S.I., Khayrulin V.T. Proektirovanie ustanovki dlya termotsiklicheskiх ispytaniy kompleksnykh mnogoslownykh teplozashchitnykh pokrytiy lopatok gazovykh turbin [Design of an installation for thermocyclic testing of complex multi-layer heat-shielding coatings for gas turbine blades]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2014, No. 38, pp. 61–71.
3. Inozemtsev A.A., Ratchiev A.M., Nikhamkin M.Sh., Ilinykh A.V., Vildeman V.E., Vyatchanin M.A. Malotsiklovaya ustalost i tsiklicheskaya treshchinostoykost nikelovogo splava pri nagruzhenii, kharakternom dlya diskov turbin [Low-cycle fatigue and cyclic crack resistance of a nickel alloy under loading characteristic for turbine disks]. *Heavy mechanical engineering*, 2011, No. 4, pp. 30–33.
4. 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, pp. 312–317.
5. Burago N.G., Zhuravlev A.B., Nikitin I.S. Modeli mnogoosnogo ustalostnogo razrusheniya i otsenka dolgovechnosti elementov konstruksiy [Models of multi-axis fatigue failure and evaluation of the durability of structural elements]. *Mekhanika tverdogo tela*, 2011, no. 6, pp. 22–33.
6. Strizhius V.E. Metody rascheta na ustalost' elementov aviatsionnykh konstruksiy pri mnogoosnom nagruzhenii [Methods for calculating the fatigue of aircraft structure elements under multiaxial loading]. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2014, no. 187, pp. 65–73.
7. 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, no. 5, pp. 74–79.
8. Yankin A.S. Vliyanie chastot bigarmonicheskogo (dvukhchastotnogo) nagruzheniya na mekhanicheskoe povedenie imitatora tverdogo topliva [Biharmonic (two-frequency) load frequencies influence on me-

chanical behavior of solid propellant simulator]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 4, Pp. 273-292. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.16

9. Vildeman V.E., Lomakin E.V., Tretyakov M.P. Zakriticheskoe deformirovanie staley pri ploskom napryazhenom sostoyanii [Postcritical deformation of steels in plane stress state conditions]. *Mekhanika tverdogo tela*, 2014, Vol. 49, Issue 1, pp. 18-26. DOI 10.3103/S0025654414010038

10. Babushkin A.V., Kozlova A.V. Vliyanie predvaritelnogo tsiklicheskogo nagruzheniya i temperatury na ostatochnuyu prochnost odnonapravlennykh kompozitov [Impact of preliminary cyclic loading and temperature on residual strength of unidirectional composites]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsey*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 223-232

11. Babushkin A.V., Gordeeva A.V. Eksperimentalnoe issledovanie ustalosti poroshkovogo strukturno-neodnorodnogo materiala pri dvuosnom (rastyazhenie-kruchenie) nagruzhenii [Experimental research of fatigue of powder structural and non-uniform material at biaxial (stretching torsion) loading]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2011, no. 2, pp. 48-52.

12. Terentev V.F., Belyaev M.S., Bakradze M.M., Gorbovets M.A., Goldberg M.A. Razrushenie zharoprochnogo splava vzh175 v usloviyakh zhestkogo malotsiklovogo nagruzheniya [Destruction of heat resisting alloy vzh175 in the conditions of tough low-cyclic loading]. *Trudy VIAM*, 2014, no. 11, p. 12.

13. Belyaev M.S., Terentev V.F., Gorbovets M.A., Bakradze M.M., Antonova O.S. Malotsiklovaya ustalost pri zadannoy deformatsii zharoprochnogo nikelovogo splava VZh175 [Low-cyclic fatigue at the set deformation of heat resisting nickel VZh175 alloy]. *Trudy VIAM*, 2015, no. 9, p. 1.

14. Belyaev M.S., Gorbovets M.A., Bakradze M.M. Izmenenie parametrov uprugoplasticheskogo deformirovaniya v protsesse ispytaniy na MTsU pri zhestkom nagruzhenii zharoprochnogo splava VZh175 [Change of parameters of elasto-plastic deformation in the course of tests on LCF at tough loading of heat resisting VZh175 alloy]. *Trudy VIAM*, 2015, no. 12, p. 4.

15. Gorbovets M.A., Belyaev M.S., Khodinev I.A., Lukyanova M.I. Issledovanie malotsiklovoy ustalosti zharoprochnykh splavov pri «zhestkom» tsikle nagruzheniya [Issledovaniye of low-cyclic fatigue of heat resisting alloys at a "rigid" cycle of loading]. *Non-ferrous metals*, 2017, no. 2, pp. 91-95.

Об авторах

Илиных Артем Валерьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: ilinih@yandex.ru).

Вильдеман Валерий Эрвинович (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, директор Центра экспериментальной механики, профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: wildemann@pstu.ru).

Третьяков Михаил Павлович (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центра экспериментальной механики ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru).

About the authors

Artem V. Ilinikh (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ilinih@yandex.com).

Valeriy E. Vildeman (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of Center of Experimental Mechanics, Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: wildemann@pstu.com).

Mikhail P. Tretyakov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru).