

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.57.10

УДК 621.45.01

К.Г. Непеин, И.А. Селиванов

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева,
Самара, Россия
ПАО «Кузнецов», Самара, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА¹

Представлены результаты работ по определению степени влияния качества заготовок, схемы фрезерования, а также финишных технологических операций поверхностного пластического деформирования на сопротивление усталости рабочих лопаток ступени осевого компрессора авиационного газотурбинного двигателя.

Приведены результаты анализа входного контроля механических свойств для прутков из титанового сплава VT9 всех партий за три года поставок.

На образцах из штамповок исследованы механические свойства и микроструктура материала.

Рассмотрены основные этапы работ, направленные на выявление причин снижения предела выносливости рабочих лопаток и разработку мероприятий по обеспечению требуемых характеристик сопротивления усталости.

Проведена оценка способа формирования кромок, а также степени износа режущего инструмента при фрезерной обработке на сопротивление усталости и состояние поверхностного слоя профильной части лопаток.

Исследования проводились для двух групп лопаток:

– 1-я группа – лопатки, изготовленные по действующей технологии (обработка кромок «чулком»);

– 2-я группа – лопатки с изменением схемы фрезерования кромок (продольно-попутное фрезерование кромок методом огранки).

Проанализировано влияние ППД на лопатках с откорректированными на предыдущих этапах технологическими процессами получения заготовок и механической обработки профиля пера для двух групп лопаток:

– 1-я группа без выполнения технологических операций упрочнения и виброобработки;

– 2-я группа с выполнением операций упрочнения микрочастицами и виброобработкой по действующей технологии.

Рассмотрены мероприятия по корректировке технологического процесса, направленные на повышение и стабилизацию характеристик сопротивления усталости. Проведен анализ результатов экспериментальных исследований с определением оптимальных параметров технологического процесса изготовления рабочей лопатки с последующим утверждением его в качестве директивного.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, компрессор, рабочая лопатка, сопротивление усталости, регрессионный анализ, упрочнение, фрезерование, заготовка.

K.G. Nepenin, I.A. Selivanov

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
Samara, Russian Federation
JSC “Kuznetsov”, Samara, Russian Federation

IMPROVING THE FATIGUE RESISTANCE CHARACTERISTICS OF COMPRESSOR BLADES MADE OF TITANIUM ALLOY

The article presents the results of work to determine the degree of influence of the quality of blanks, milling scheme, as well as finishing technological operations of surface plastic deformation (FPD) on the fatigue resistance of the blades of an axial compressor stage of an aviation gas turbine engine (GTE).

The results of the analysis of the input control of mechanical properties for bars from titanium alloy VT9 of all batches for three years of supply are given.

The compliance of mechanical properties of bars OST 1 90006–86 was verified. The mechanical properties and the microstructure of the material were investigated on samples from forgings.

¹ По материалам доклада на научно-технической конференции «Динамика, прочность, надежность авиационных газотурбинных двигателей», посвященной 100-летию со дня рождения проф. И.А. Биргера, г. Москва, 23–25 января 2019 г.

The evaluation of the method of forming the edges, as well as the degree of wear of the cutting tool during milling for fatigue resistance and the condition of the surface layer of the blade section has been carried out.

Studies were conducted for two groups of blades:

- 1st group - blades made according to the current technology (processing stockings "stocking");

- 2nd group - blades with a change in the scheme of milling edges (longitudinal-side milling of edges by the method of "cutting").

The influence of FPD on the blades with the technological processes of producing blanks and machining the feather profile for two groups of blades corrected at the previous stages was analyzed:

- 1st group without performing technological operations of hardening and vibration treatment;

- 2nd group with hardening operations performed with micro beads and vibro-processing according to the current technology.

The measures on the adjustment of the technological process aimed at improving and stability of the characteristics of fatigue resistance are considered. The analysis of the results of experimental studies with the determination of the optimal parameters of the technological process of manufacturing a working blade, followed by its approval as a policy.

Keywords: gas turbine engine, compressor, blade, fatigue resistance, regression analysis, hardening, milling, workpiece.

Введение

Надежность деталей газотурбинных двигателей определяется совокупностью многих факторов, в число которых входят механические характеристики материала, обеспечивающие работоспособность деталей в условиях эксплуатации в течение всего ресурса проектируемого изделия.

Одной из важнейших характеристик, определяющих надежность лопаток газотурбинных двигателей, является способность выбранного материала (с учетом конструктивных особенностей, а также особенностей изготовления лопаток начиная от вида и способа получения заготовки и заканчивая финишными операциями, обеспечивающими шероховатость поверхности) сопротивляться повреждающему действию переменных нагрузок, реализующихся в процессе работы.

Около 65 % всех дефектов газотурбинных двигателей носят усталостный характер. Ввиду этого одним из основных вопросов подтверждения надежности двигателя является обеспечение требуемых характеристик сопротивления усталости деталей [1, 2].

В современном машиностроении все более широко используются прогрессивные и высокоэффективные методы упрочнения деталей: термомеханическая обработка, поверхностное пластическое деформирование и др. [3]. Одним из основных факторов повышения сопротивления усталости материалов в результате этих обработок является существенная задержка роста усталостных трещин [4].

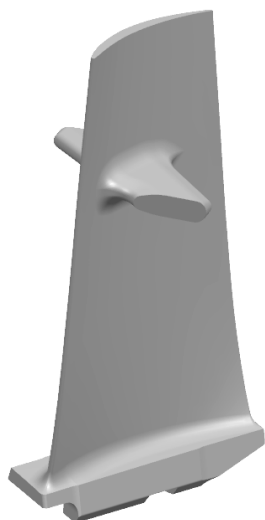


Рис. 1. CAD-модель рабочей лопатки

В настоящее время изготовление ГТД происходит в условиях широкой производственной кооперации предприятий. Так, при восстановлении производства авиационного ГТД было принято решение о смене изготовителя рабочих лопаток компрессора из титанового сплава ВТ9 и замене типа заготовки – изотермической штамповки (ИЗШ) на объемную штамповку (ОШ). Для подтверждения надежности и соответствия двигателя условиям технического задания проведен комплекс лабораторных усталостных испытаний окончательно изготовленных лопаток [5].

На рис. 1 приведена CAD-модель исследуемой рабочей лопатки.

При проведении усталостных испытаний отмечено снижение предела выносливости рабочих лопаток на 30 % по сравнению с базовым уровнем (заготовка ИЗШ), а также отсутствие стабильности результатов усталостных испытаний как между партиями лопаток, так и в пределах одной партии.

В целях исследования причин снижения предела выносливости рабочих лопаток и разработки мероприятий по обеспечению требуемых характеристик сопротивления усталости проведены комплексный анализ и корректировка основных технологических процессов получения заготовок, термической и механической обработки, а также финишных операций ППД. Работа выполнялась последовательно в три этапа:

1. Анализ качества заготовок, полученных объемной штамповкой.
2. Анализ влияния схемы фрезерования и степени износа режущего инструмента на сопротивление усталости рабочих лопаток [6].
3. Анализ влияния финишных операций действующего технологического процесса на сопротивление усталости рабочих лопаток [7, 8].

Анализ качества заготовок

Проведен анализ результатов входного контроля механических свойств для прутков из титанового сплава ВТ9 всех партий поставки 2012, 2016, 2017 г.

Механические свойства прутков достаточно стабильны [9] и соответствуют ОСТ 1 90006–86². Механические свойства и микроструктура материала, полученные на образцах из штамповок, стабильны и соответствуют ОСТ 1 90002–86³.

Средние значения и разброс определяемых механических свойств как в прутке, так и в штамповке (для поковок, штампованных по ОСТ 1 90002 – 86 методом ОШ) находятся в пределах, характерных для данного типоразмера из сплава ВТ9.

По итогам контроля процесса изготовления штамповок, включая операцию термообработки, в технологию изготовления были введены следующие изменения:

– уменьшена исходная заготовка и изменена конфигурация высаживаемой части под конструктивный элемент лопатки с целью предотвращения встречного течения металла при окончательной штамповке [10];

– изменен порядок выполнения операции «высокотемпературный отжиг»:

• *исходная технология.* Загрузка штамповок в печь при $T = 700$ °С, подъем температуры до $T = 950$ °С, выдержка 1,0–1,5 ч по контрольной термопаре, охлаждение на воздухе;

• *измененная технология.* Загрузка штамповок в печь, предварительно находящуюся на режиме $T = 950$ °С не менее 1,5 ч, выдержка при $T = 950$ °С 1,0–1,5 ч по контрольной термопаре, охлаждение на воздухе [11].

Принятые меры по улучшению технологического процесса штамповки и термообработки позволили получать на заготовках микроструктуру 2-го типа, что является положительным фактором для повышения усталостной прочности лопаток.

Анализ влияния схемы фрезерования и степени износа режущего инструмента на сопротивление усталости рабочих лопаток

На данном этапе проведена оценка способа формирования кромок, степени износа режущего инструмента при фрезерной обработке на сопротивление усталости и состояние поверхностного слоя профильной части лопаток.

Исследования проводились на лопатках с откорректированным технологическим процессом получения заготовок без выполнения финишных операций ППД для следующих групп лопаток:

– 1-я группа – лопатки, изготовленные по действующей технологии (обработка кромок «чулком»);

– 2-я группа – лопатки с изменением схемы фрезерования кромок (продольно-попутное фрезерование кромок методом огранки).

На базе полученных экспериментальных данных лопатки 2-й группы показали лучшие характеристики усталостной прочности.

² ОСТ 1 90006–86. Заготовки титановых сплавов для изготовления лопаток. Технические требования. 16 с.

³ ОСТ 1 90002–86. Лопатки штампованные из титановых сплавов. Технические требования. 22 с.

В соответствии с ОСТ 1 00870–77⁴ проведена статистическая обработка результатов испытаний методом линейного регрессионного анализа [12] с построением кривых усталости и оценкой разброса результатов испытаний. При этом для лопаток 1-й группы установлено влияние на сопротивление усталости лопаток степени износа режущего инструмента при фрезерной обработке. На рис. 2 представлены места разрушения лопаток при проведении испытаний рабочих лопаток, изготовленных последними на комплект фрез. На рис. 3–5 показаны зоны усталостного разрушения лопаток.

Расчетный предел выносливости лопаток на базе испытаний $N = 10^8$ циклов при вероятности разрушения $P = 10\%$ составил:

– для лопаток 1-й группы $\sigma_{-1} = 37,3$ кгс/мм²;

– для лопаток 2-й группы:

- $\sigma_{-1} = 50,8$ кгс/мм² для лопаток, изготовленных первыми на комплект фрез;
- $\sigma_{-1} = 37,1$ кгс/мм² для лопаток, изготовленных последними на комплект фрез.

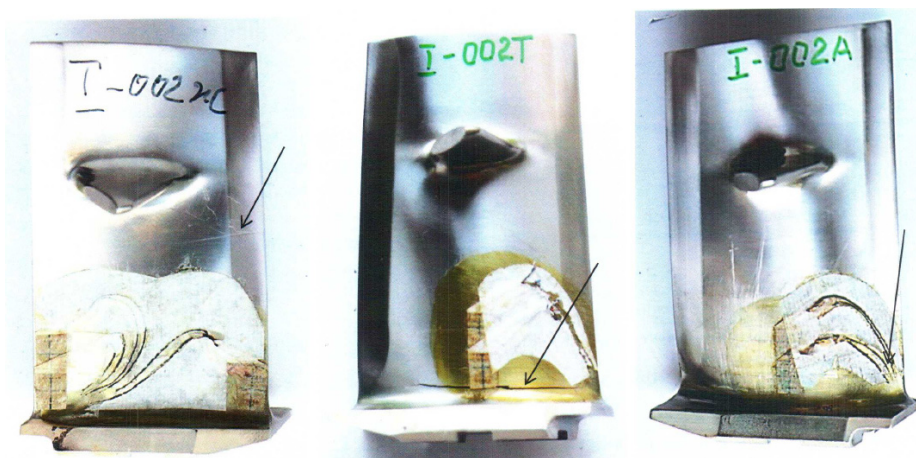


Рис. 2. Места разрушения рабочих лопаток при испытаниях

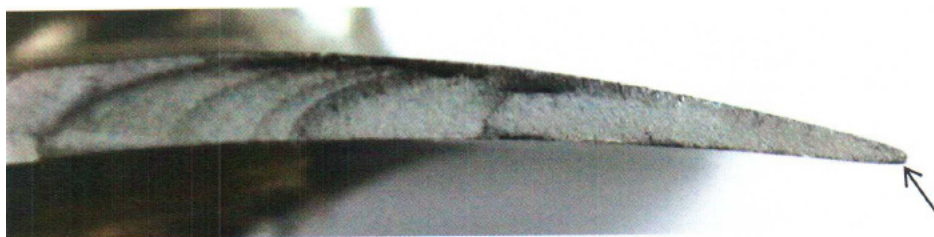


Рис. 3. Излом лопатки 002Ж

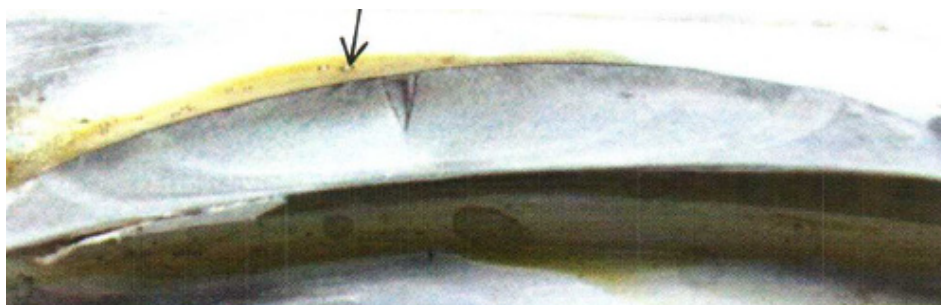


Рис. 4. Излом лопатки 002Т

⁴ ОСТ 1 00870–77. Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость. 34 с.



Рис. 5. Излом лопатки 002А

При металлургическом исследовании рабочих лопаток установлено, что разрушение всех лопаток усталостного характера. Дефектов металлургического характера в изломах не обнаружено. Качество материала по химическому составу и структуре удовлетворительное, соответствует требованиям документации на материал.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- 1) при фрезеровании чулком на кромках лопаток оставались мелкие долевы и поперечные риски, снижающие предел выносливости лопаток;
- 2) инструмент (фреза), имеющий износ после изготовления партии из 10 лопаток, вносил отрицательную технологическую наследственность, снижающую предел выносливости лопаток;
- 3) малая величина припуска под финишную обработку не позволяет устранять внесенные при механической обработке микродефекты.

По результатам усталостных испытаний и металлографических исследований сформулированы следующие рекомендации по коррекции техпроцесса фрезерной обработки профильной части лопаток:

- фрезерование кромок проводить методом огранки, применив схему продольно-попутного фрезерования;
- ввести смену инструмента (фрезы) после изготовления партии из 10 лопаток;
- обеспечить припуск по кромкам на финишную обработку не менее 0,05 мм.

Анализ влияния финишных технологических операций на сопротивление усталости рабочих лопаток

Исследования проводились на лопатках с откорректированными на предыдущих этапах технологическими процессами получения заготовок и механической обработки профиля пера для следующих групп лопаток:

- 1-я группа без выполнения технологических операций упрочнения и виброобработки;
- 2-я группа с выполнением операций упрочнения микрошариками и виброобработки по действующей технологии [13, 14].

В соответствии с ОСТ 1 00870–77 проведена статистическая обработка результатов испытаний (таблица) методом линейного регрессионного анализа с построением кривых усталости и оценкой разброса результатов испытаний. Линейный регрессионный анализ проводился по экспериментальным точкам разрушившихся лопаток.

По результатам усталостных испытаний при температуре 20 °С на базе $N = 10^8$ циклов предел выносливости лопаток составил:

- $\sigma_{-1} = 40,0$ кгс/мм² для лопаток 1-й группы, изготовленных без выполнения технологических операций упрочнения и виброобработки;
- $\sigma_{-1} = 50,0$ кгс/мм² для лопаток 2-й группы, изготовленных с выполнением операций упрочнения и виброобработки.

Из анализа результатов испытаний и расчетов видно, что имеет место удовлетворительное совпадение значений предела выносливости, определенного методом линейного регресси-

онного анализа для вероятности разрушения $P = 10\%$, и значений предела выносливости, принятого по максимальным значениям переменных напряжений, при которых лопатки 1-й и 2-й групп отработали базу испытаний $N = 10^8$ циклов без разрушения. При этом для лопаток 1-й группы (без упрочнения и виброобработки) величина коэффициента корреляции $|R| = 0,0387 < 0,5$, что указывает на существенный разброс экспериментальных данных.

Результаты испытаний лопаток на 3-м этапе работ

Группа		1-я группа	2-я группа
Количество неразрушенных лопаток, шт.		5	5
Коэффициент корреляции		0,0387	0,7210
Предел выносливости по результатам регрессионного анализа на базе $N = 10^8$ циклов, кгс/мм ²	0,5	45,6	52,4
	0,1	41,8	49,4
	3 σ	37,1	45,7
Количество разрушенных лопаток, шт.		8	7
Предел выносливости экспериментальный, кгс/мм ²		40,0	50,0

При металлургическом исследовании лопаток, разрушившихся при испытаниях, установлено:

- разрушение всех лопаток усталостного характера;
- дефектов металлургического характера в изломах и материале лопаток не обнаружено;
- макроструктура пера лопаток однородная, без видимого зерна;
- микроструктура материала лопаток, соответствующая 2-му типу шкалы микроструктур для двухфазных сплавов, удовлетворительная [15].

Качество материала по химическому составу и структуре удовлетворительное, соответствует требованиям документации на материал.

В поверхностном слое лопаток 1-й группы на глубине до 30 мкм залегают сжимающие остаточные напряжения, наибольшая величина которых не превышает $\sigma_{сж} = -5 \dots -11$ кгс/мм². На глубине более 110 мкм в поверхностном слое неупрочненных лопаток появляются растягивающие напряжения величиной $\sigma = +2,0$ кгс/мм² (рис. 6).

В поверхностном слое лопаток 2-й группы формируются стабильные сжимающие напряжения величиной $\sigma_{сж} = -44 \dots -56$ кгс/мм² (рис. 7).

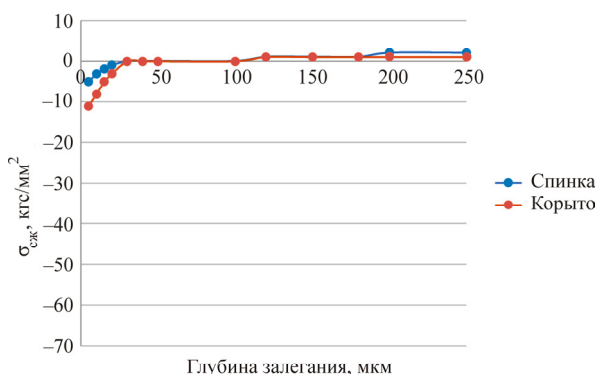


Рис. 6. Эпюра распределения остаточных напряжений в лопатках без упрочнения

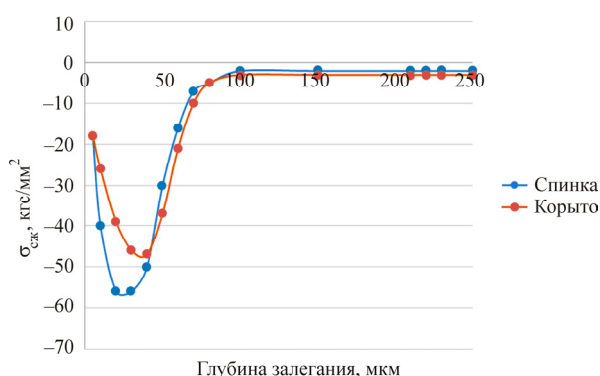


Рис. 7. Эпюра распределения остаточных напряжений в лопатках, прошедших технологическую операцию упрочнения

Выводы

1. Комплекс мероприятий по корректировке технологического процесса объемной штамповки и термообработки позволил получать на заготовках лопаток микроструктуру 2-го типа.

2. Установлено существенное влияние выбора схемы фрезерования кромок пера лопаток и степени износа режущего инструмента при фрезерной обработке на сопротивление усталости рабочих лопаток компрессора из титанового сплава ВТ9.

3. Применение ППД, выполненное по действующему технологическому процессу, позволяет повысить стабильность характеристик сопротивления усталости и уровень предела выносливости более чем на 10 %.

4. Анализ причин снижения предела выносливости, а также мероприятий, направленных на повышение сопротивления усталости рабочих лопаток, позволил рекомендовать их для серийного производства со следующими изменениями:

– фрезерование кромок методом огранки с применением схемы продольно-попутного фрезерования;

– введение смены инструмента (фрезы) после изготовления партии из 10 лопаток;

– обеспечение припуска по кромкам на финишную обработку не менее 0,05 мм;

– упрочнение микрошариками и виброобработка.

Библиографический список

1. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации / ЦИАМ. – 6-е. изд. – М., 2004. – 260 с.
2. Ануров Ю.М., Федорченко Д.Г. Основы обеспечения прочностной надежности авиационных двигателей и силовых установок. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 390 с.
3. Гусев А.С. Теоретические основы расчетов на сопротивление усталости. – М., 2014. – 49 с.
4. Кравчук В.С., Абу Айаш Юсеф, Кравчук А.В. Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций. – Одесса, 2000. – 160 с.
5. Петров Ю.В. Сопротивление материалов. Специальные вопросы сопротивления материалов. – М., 2017. – 61 с.
6. Минаев А.М. Обработка металлов резанием / ТГТУ. – Тамбов, 2008. – 72 с.
7. Леденев В.В., Однолько В.Г., Нгуен З.Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения / ТГТУ. – Тамбов, 2013. – 312 с.
8. Мальцева Л.А., Гервасьев М.А., Кутын А.Б. Материаловедение. – Екатеринбург, 2007. – 340 с.
9. Барышев Г.А. Материаловедение / ТГТУ. – Тамбов, 2007. – 85 с.
10. Перебоева А.А. Технология термической обработки металлов. – Красноярск, 2007. – 143 с.
11. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ. – Оренбург, 2003. – 362 с.
12. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. – Иваново, 2009. – 64 с.
13. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в метод конечных элементов / ООО «Амирит». – Саратов, 2016. – 84 с.
14. Материаловедение и технология конструкционных материалов / В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин, В.А. Кузнецов, Э.Е. Смирнова, А.А. Черепакин, А.В. Шлыкова, Н.Ф. Шпунькин. – М.: Академия, 2007. – 538 с.
15. Панов А.А. Обработка металлов резанием: справочник технолога. – М: Машиностроение, 1988. – 736 с.

References

1. Normy prochnosti aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley grazhdanskoy aviatsii [Strength Standards for Civil Aviation Gas Turbine Engines]. Moscow: Central Institute of Aviation Motors, 2004, Is.6, 260 p.
2. Anurov Yu.M., Fedorchenko D.G. Osnovy obespecheniya prochnostnoy nadëzhnosti aviatsionnykh dvigateley i silovykh ustanovok [Fundamentals of ensuring the strength reliability of aircraft engines and power plants]. StPeterburg: Publishing house of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2004, 390 p.
3. Gusev A.S. Teoreticheskiye osnovy raschetov na soprotivleniye ustalosti [Theoretical bases of calculations on fatigue resistance]. Moscow, 2014, 49 p.

4. Kravchuk V.S., Abu Ayash Yousef, Kravchuk A.V. Soprotivleniye deformirovaniyu i razrusheniyu poverkhnostno-uprochnennykh detaley mashin i elementov konstruksiy [Resistance to deformation and destruction of surface-hardened machine parts and structural elements]. Odessa, 2000, 160 p.
5. Petrov Ju.V. Soprotivleniye materialov. Spetsialnyye voprosy soprotivleniya materialov [Strength of materials. Special issues of material resistance]. Moscow, 2017, 61 p.
6. Minaev A.M. Obrabotka metallov rezaniyem [Metal cutting]. Tambov: Tambov State Technical University, 2008, 72 p.
7. Ledenev V.V., Odnolko V.G., Nguen Z.H. Teoreticheskiye osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya [Theoretical foundations of the mechanics of deformation and fracture]. Tambov: Tambov State Technical University, 2013, 312 p.
8. Malceva L.A., Gervasev G.A., Kutin A.B. Materialovedeniye [Materials Science]. Ekaterinburg, 2007, 340 p.
9. Barishev G.A. Materialovedeniye [Materials Science]. Tambov: Tambov State Technical University, 2007, 85 p.
10. Pereboeva A.A. Tekhnologiya termicheskoy obrabotki metallov [Technology of heat treatment of metals]. Krasnoyarsk, 2007, 143 p.
11. Shashkov V.B. Prikladnoy regressionnyy analiz [Applied Regression Analysis]. Orenburg, 2003, 362 p.
12. Stepanova T.Ju. Tekhnologii poverkhnostnogo uprochneniya detaley mashin [Surface hardening technology for machine parts]. Ivanovo, 2009, 64 p.
13. Ivanov D.V., Dol A.V. Vvedeniye v metod konechnykh elementov [Introduction in finite element analysis]. Saratov: Amirit, 2016, 84 p.
14. Arzamasov V.B., Volchkov A.N., Golovin V.A. et. al. Materialovedeniye i tekhnologiya konstruksionnykh materialov [Materials science and technology of construction materials]. Moscow: Akademiya, 2007, 538 p.
15. Panov A.A. Obrabotka metallov rezaniyem. Spravochnik tekhnologa [Metal Cutting. Handbook of Technologist]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 736 p.

Об авторах

Непеин Кирилл Геннадьевич (Самара, Россия) – начальник бригады отдела прочности и теплофизики ПАО «Кузнецов», аспирант кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева» (443022, г. Самара, Заводское ш., д. 29, e-mail: kirill.nepein@gmail.com).

Селиванов Игорь Александрович (Самара, Россия) – начальник отдела прочности и теплофизики ПАО «Кузнецов», аспирант кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева» (443022, г. Самара, Заводское ш., д. 29, e-mail: selivanov.i.a@yandex.ru).

About the authors

Kirill G. Nepein (Samara, Russian Federation) – Head of a Division, of Strength and Thermal Physics Department, JSC “Kuznetsov”; PhD Student of Construction and Design of Aircraft Engines Department, Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (29, Zavodskoe av., Samara, 443022, Russian Federation; e-mail: kirill.nepein@gmail.com).

Igor A. Selivanov (Samara, Russian Federation) – Head of Division, of Strength and Thermal Physics Department, JSC “Kuznetsov”; PhD Student of Construction and Design of Aircraft Engines Department, Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (29, Zavodskoe av., Samara, 443022, Russian Federation; e-mail: selivanov.i.a@yandex.ru).