



УДК 669.14

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-1-1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФРЕТТИНГОСТОЙКОСТИ СТАЛИ
ЭП866Ш**

С.А. Мубояджян

доктор технических наук

В.И. Коннова

Д.С. Горлов

Д.А. Александров

Июль 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

С.А. Мубояджян¹, В.И. Коннова¹, Д.С. Горлов¹, Д.А. Александров¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРЕТТИНГОСТОЙКОСТИ СТАЛИ ЭП866Ш

Описаны эксперименты, которые проводились с целью изучения фреттингостойкости стали ЭП866Ш. Из этой стали изготавливаются малоподвижные и нагруженные болтовые соединения, для которых характерно изнашивание в процессе фреттинга. Испытания проводили в лабораторных условиях на универсальном трибометре CETR UMT-3MT с использованием привода R33HE1000 для возвратно-поступательного движения согласно ASTM G204-10. В процессе экспериментов меняли величину нагрузки на образец и амплитуду колебаний. Для исследования триботехнических свойств стали ЭП866Ш выбран метод «пальчик по пластине». По результатам испытаний оценивали кривые износа, также проведено металлографическое исследование образцов.

Ключевые слова: *фреттинг, фреттинг-износ, метод «пальчик по пластине», трибометр.*

S.A. Muboyadzhyan, V.I. Konnova, D.S. Gorlov, D.A. Alexandrov

THE STUDY OF STEEL EP866SH FRETTING RESISTANCE

This article describes the experiments that were conducted to study fretting resistance steel EP866Sh. Strained bolt joints are made of the steel where the phenomenon of fretting occurs. Tests were conducted on a universal tribometer CETR UMT-3MT using R33HE1000 lower drive for reciprocating movement in the laboratory environment according to ASTM G204-10. During the experiments load intensity and the oscillation amplitude have changed. The method «pin-on-plate» was chosen to study the tribological properties of steel EP866. Estimated wear curves were conducted metallographic examination of samples.

Keywords: *fretting, fretting wear, «pin-on-plate», tribometer.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

В современном мире все больше внимания уделяется проблеме продления ресурса техники, в частности – увеличения срока службы, повышения надежности и долговечности машин. Одним из актуальных вопросов также является увеличение ресурса деталей авиационной техники при уменьшении их стоимости. С этой целью используются различного рода защитные и восстанавливающие покрытия. Они позволяют продлить ресурс деталей авиационной техники, а также благодаря использованию недорогих компонентов повысить ее рентабельность [1–3].

Рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) и газотурбинной установки (ГТУ), а также паровых турбин в процессе эксплуатации подвергаются воздействию значительных динамических и вибрационных нагрузок. Под воздействием микроперемещений условно неподвижных сопряжений (детали крепежа, прессовые соединения) возникает особый вид износа – фреттинг.

Фреттинг включает несколько процессов изнашивания материала поверхности: абразивное коррозионное и усталостное. В различных условиях каждое из них может стать ведущим, определяющим вид и характер износа [4–6]. Фреттинг – это малоамплитудное колебательное движение в диапазоне от 10 до 300 мкм. При контактировании твердых поверхностей, характерном для этого вида взаимодействия, могут развиваться значительные повреждения (потеря массы, питтинг, образование осколков и др.). Образующиеся при фреттинге микроповреждения, являясь концентраторами напряжений, снижают усталостную прочность материала и приводят к сбою в работе механизмов. Большинство материалов чувствительны к фреттинг-износу, и проведенные испытания предназначены для оценки относительной чувствительности трибологической пары к износу в условиях фреттинга.

В случае когда трибологические пары трения испытывают относительное колебательное перемещение (менее чем 10 мкм), т. е. все точки контакта испытывают относительное проскальзывание по замкнутому циклу, массоперенос не происходит.

Когда металлические пары трения подвергаются фреттинг-износу, создаются благоприятные условия для протекания химической реакции при взаимодействии материала пары с окружающей средой (кислородом воздуха) и образования компонентов износа: происходит окисление поверхностей с образованием оксидной пленки. Если химическая реакция протекает одновременно с механическим износом при фреттинге, то такой процесс называют фреттинг-коррозией.

Одной из проблем авиационного двигателестроения является фреттинг-износ малоподвижных нагруженных соединений деталей ГТД (поворотные лопатки компрессора, узлы крепления трубопроводов, болтовые соединения и др.).

При эксплуатации двигателей семейств ПС-90А, ПС-90ГП/ЭУ и Д30ЭУ поломки трубопровода и ниппеля в соединениях по наружному конусу ниппелевых креплений вследствие износа и коррозии неизбежны. Поломки ниппелей встречаются чаще, и трещины имеют статический или усталостный характер. Поломки труб связаны с трещинами усталостного характера. Трещины развиваются от очагов фреттинг-коррозии, которые наблюдаются на обеих контактирующих деталях (на ниппеле и трубе) или на одной из них. На ниппеле очаги фреттинг-коррозии расположены на конусной части и вблизи торца хвостовика, на трубе – только вблизи торца хвостовика ниппеля. Фреттинг-процесс имеет место на осях поворотных лопаток направляющих аппаратов компрессора (из титанового сплава ВТ8М-1), малоподвижных и напряженных болтовых соединениях (из стали ЭП866Ш), узлах крепления трубопроводов (обычно из стали 12Х18Н10Т) и др. Для защиты от фреттинга обычно используют твердосмазочное покрытие ЦВСП-3С и покрытие ВАП-2, разработанное в ВИАМ, с рабочей температурой до 250°С [7].

С целью исследования свойств трибологической пары трения из стали ЭП866Ш проведены их испытания в условиях фреттинга.

Материалы и методы

Образцы из стали ЭП866Ш, используемые в эксперименте, представляют собой пластины размером 25×43 мм и цилиндрические пальчики $\varnothing 6,35 \times 15$ мм. Проводили по методу «пальчик по пластине» на универсальном трибометре SETR UMT-3MT с приводом R33HE1000 для возвратно-поступательного движения при температуре 20°С согласно ASTM G204-10 [8, 9].

Этот метод испытаний позволяет изучить и ранжировать по чувствительности к фреттинг-коррозии или фреттинг-износу используемые материалы с целью выбора материала для применения в условиях, когда фреттинг-коррозия или фреттинг-износ могут ограничить эксплуатационную надежность конструкции.

Целью метода является определение количества продуктов износа для обеих поверхностей в единицах потери объема в результате трения двух твердых поверхностей в контролируемых условиях фреттинга. В процессе испытаний цилиндрический ползунк трется о твердую плоскую поверхность при заданных условиях до достижения

фреттинг-износа на одной или обеих поверхностях. Если повреждение имеет место, то производится измерение объема износа на каждом объекте и износ системы как сумма износа ползунка и контртела.

Метод испытаний используется для определения подходящих пар трения, которые менее других подвержены фреттинг-износу. Полученная по результатам испытаний информация используется при выборе материалов, которые менее чувствительны к фреттинг-износу, для конструкционной или поверхностной обработки поверхности пар трения, и применяются в областях, где фреттинг есть или может возникнуть.

Схема проведения испытания по методу «пальчик по пластине» показана на рис. 1: пальчик давит на пластину вследствие прикладываемой нормальной силы, что создает контактное давление между деталями.

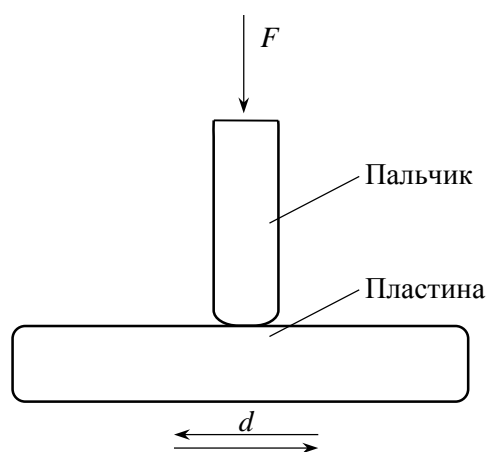


Рис. 1. Схема проведения испытания на фреттинг-износ по методу «пальчик по пластине»: F – прикладываемая нормальная нагрузка, Н; d – относительное смещение образца (амплитуда колебаний), мкм

Испытания на фреттинг-износ проводили на образцах из стали ЭП866Ш [10]. Поверхность образцов подвергалась механической шлифовке и полировке [11]. Исследована зависимость фреттинг-износа от нагрузки и амплитуды колебаний. Режимы испытания на фреттинг: нагрузка (F) – от 10 до 900 Н, частота относительных колебаний (f) – 13 Гц, амплитуда колебаний (d) – от 150 до 300 мкм. Эксперименты проводили в лабораторных условиях на универсальном трибометре SETR UMT-3MT. После испытаний на фреттинг проведено металлографическое исследование поверхности образцов при помощи микроскопа Olympus.

Результаты

По результатам испытаний показано, что износ образцов выше при амплитуде колебаний 300 мкм. Сравнивая результаты испытаний при одинаковой амплитуде колебаний (150 мкм), но при разной нагрузке, можно сделать вывод, что величина износа возрастает при увеличении нагрузки от 500 до 900 Н. При значениях нагрузки в диапа-

зоне 10–300 Н кривые износа находятся примерно на одном уровне (рис. 2, *а*). При амплитуде колебаний 300 мкм видно явное увеличение износа при снижении нагрузки (рис. 2, *б*). Внешний вид продуктов износа после испытаний представлен на рис. 3. Видны следы коррозии, в месте контакта пар трения происходят процессы фреттинг-коррозии. При истирании поверхности продукты изнашивания не удаляются, оторвавшиеся частицы металла быстро окисляются и скапливаются в зоне контакта, ускоряя износ.

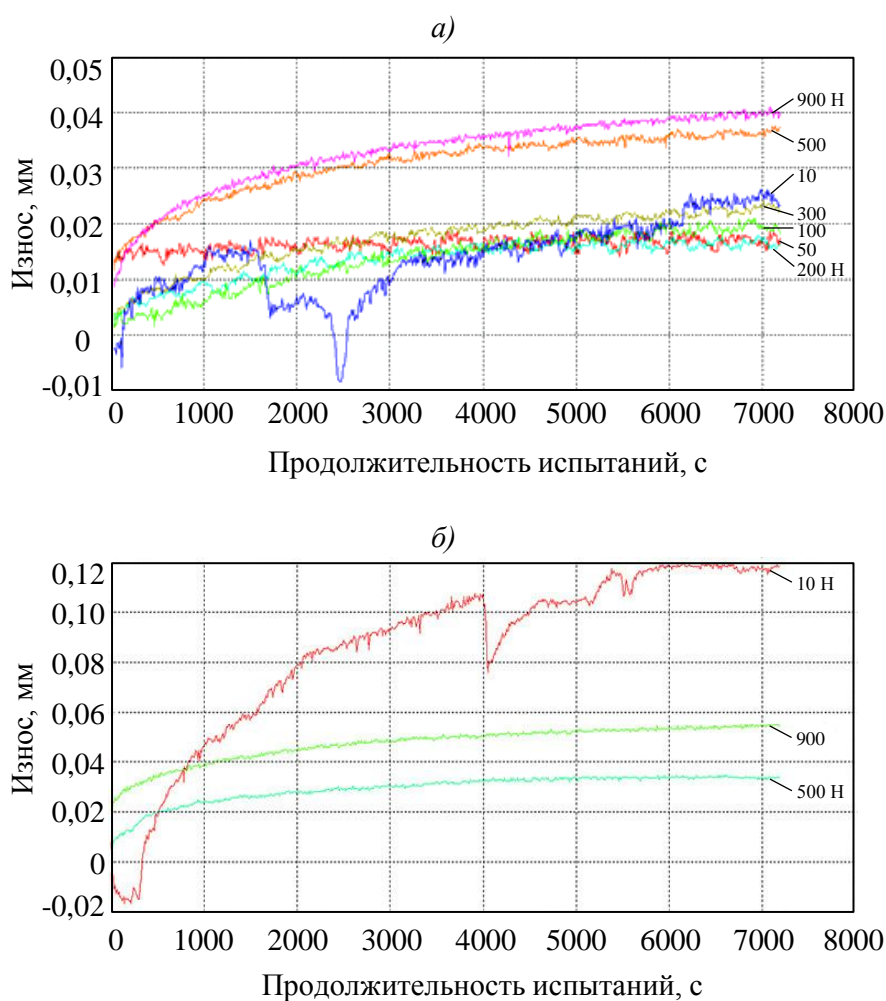


Рис. 2. Износ системы «палец–пластина» в зависимости от величины нагрузки (указана на графике) и амплитуды колебаний 150 (*а*) и 300 мкм (*б*)

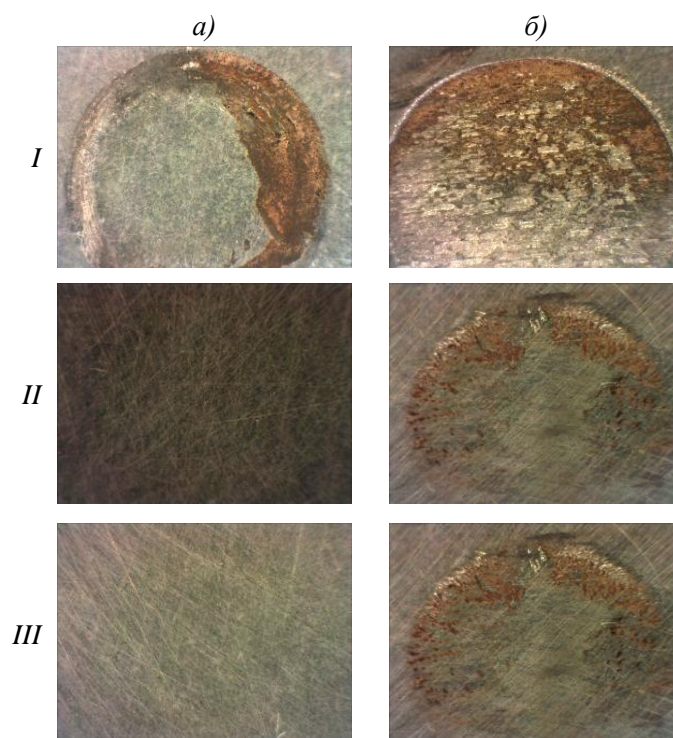


Рис. 3. Внешний вид пластин после испытаний при нагрузках 10 (I), 500 (II) и 900 Н (III) и амплитуде колебаний 150 (а) и 300 мкм (б)

Окисление микрообъемов ускоряется в результате того, что контактирование осуществляется на одних и тех же площадках касания, где протекает один из окислительных процессов разупрочнения, приводящий к образованию хрупких химических соединений железа с кислородом. При фреттинг-коррозии скорость процесса разрушения поверхностного слоя пропорциональна количеству циклов перемещений и резко возрастает с увеличением амплитуды перемещений [12]. При повышении частоты колебаний скорость процесса разрушения снижается. При увеличении удельного давления пораженная фреттинг-коррозией площадь увеличивается, соответственно повышается и общий износ системы [13]. Тем не менее, процесс разрушения поверхностного слоя прекращается в случае устранения осциллирующих движений на участках контакта, в частности путем увеличения удельного давления до уровня, при котором относительное перемещение поверхностей прекращается.

Обсуждение и заключения

Проведены испытания на фреттинг-износ образцов из стали ЭП866Ш. В ходе экспериментов менялись такие параметры испытаний, как нагрузка и амплитуда колебаний. Ресурс детали уменьшается быстрее при большей амплитуде колебаний (300 мкм), а в случае, когда амплитуда колебаний одинакова, нагрузка оказывает разное

влияние на износ. Это связано также с фреттинг-коррозией, происходящей между трущимися деталями и ускоряющей процесс разрушения поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1. С. 3–33.
2. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 71–81.
3. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 3–8.
4. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия /Под общ. ред. Е.Н. Каблов. 2-е изд. М.: Наука. 2006. С. 531–534.
5. Виноградов С.С., Теркулова Ю.А., Курдюкова Е.А., Никифоров А.А. Износостойкое, антифрикционное и фреттингостойкое покрытие на основе Ni–В //Труды ВИАМ. 2015. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).
6. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
7. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Конверсия в машиностроении. 1999. №2. С. 42–47.
8. Fouvry S, Duo P, Perruchaut Ph. A quantitative approach of Ti-6Al-4V fretting damage: friction, wear and crack nucleation //Wear. 2004. V. 257. №9–10. P. 916–929.
9. ASTM Standard G133-05 Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. 2010.
10. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
11. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора методом ионного модифицирования поверхности //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).

12. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Коррозионностойкое покрытие для защиты деталей ГТД из высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей на рабочие температуры до 450°C //Труды ВИАМ. 2014. №6. Ст. 03 (viam-works.ru).
13. Уманский А.П., Пугачевская Е.П., Химко А.Н. Разработка технологии нанесения новых износостойких композиционных покрытий для упрочнения деталей авиационных двигателей //Авиационно-космическая техника и технология. 2009. №9. С. 38–44.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1. С. 3–33.
2. Mubojadzhan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennyh detalej kompressora GTD [Protective and strengthening ion-plasma coverings for blades and other responsible details of the GTD compressor] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.
3. Mubojadzhan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanoslojnye uprochnjajushhie pokrytija dlja zashhity stal'nyh i titanovyh lopatok kompressora GTD [Nanolayer strengthening coverings for protection of steel and titanitic compressor blades of GTD] //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 3–8.
4. Lite lopatki gazoturbinyh dvigatelej. Splavy, tehnologii, pokrytija [Cast blades of gas turbine engines. Alloys, technologies, coverings] /Pod obshh. red. E.N. Kablov. 2-e izd. M.: Nauka. 2006. С. 531–534.
5. Vinogradov S.S., Terkulova Ju.A., Kurdjukova E.A., Nikiforov A.A. Iznosostojkoe, anti-frikcionnoe i frettingostojkoe pokrytie na osnove Ni–B [Anti wear, anti friction and frettingostoyky coating on the basis of Ni–B] //Trudy VIAM. 2015. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).
6. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. С. 2–14.

7. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Pomelov Ja.A. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinnih dvigatelej [Ion-plasma protecting covers for blades of gas turbine engines] //Konversija v mashinostroenii. 1999. №2. S. 42–47.
8. Fouvry S, Duo P, Perrucchaut Ph. A quantitative approach of Ti-6Al-4V fretting damage: friction, wear and crack nucleation //Wear. 2004. V. 257. №9–10. P. 916–929.
9. ASTM Standard G133-05 Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. 2010.
10. Markova E.S., Jakusheva N.A., Pokrovskaja N.G., Shal'kevich A.B. Tehnologicheskie osobenno-sti proizvodstva martensitostarejushhej stali VKS-180 [Technological features of production of maraging VKS-180 steel] //Trudy VIAM. 2013. №7. St. 01 (viam-works.ru).
11. Mubojadzhjan S.A., Lucenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Issledovanie vozmozhnosti povyshenija sluzhebnyh harakteristik lopatok kompressora metodom ionnogo modifitsirovanija poverhnosti [Research of possibility of increase of office characteristics of compressor blades by method of ionic modifying of surface] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 02 (viam-works.ru).
12. Galojan A.G., Mubojadzhjan S.A., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Korroziionnostojkoe pokrytie dlja zashhity detalej GTD iz vysokoprochnyh konstrukcionnyh martensitostarejushhih stalej na rabochie temperatury do 450°C [Corrosion resistant coating for protection of details of GTD from high-strength constructional maraging staly on working temperatures to 450°C] //Trudy VIAM. 2014. №6. St. 03 (viam-works.ru).
13. Umanskij A.P., Pugachevskaja E.P., Himko A.N. Razrabotka tehnologii nanesenija novyh iznosostojkih kompozicionnyh pokrytij dlja uprochnenija detalej aviacionnyh dvigatelej [Development of technology of drawing new anti wear composition coatings for hardening of details of aircraft engines] //Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. 2009. №9. S. 38–44.