

Определение рациональных параметров замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском в перспективных авиационных газотурбинных двигателях. Часть I. Модели механического и теплового контактов керамических и металлических частей рабочего колеса турбины

С.В. Резник¹, Д.В. Сапронов^{1,2}, Т.Д. Каримбаев², М.А. Мезенцев²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана

²ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

The Determination of Rational Parameters of Lock Joints of Ceramic Blades with a Metal Disk in Advanced Aircraft Gas Turbine Engines. Part I. Models of Mechanical and Thermal Contact of Ceramic and Metal Parts of the Turbine Impeller

S.V. Reznik¹, D.V. Sapronov^{1,2}, T.D. Karimbaev², M.A. Mezencev²

¹Bauman Moscow State Technical University

²Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM

Для повышения коэффициента полезного действия авиационных газотурбинных двигателей необходимо увеличивать температуру газа перед турбиной. Однако металлические сплавы, применяемые в современных конструкциях, не позволяют достичь этого без снижения долговечности изделия. Одним из способов решения такой задачи является разработка конструкций турбин с элементами керамики. Рассмотрены вопросы обеспечения термостойкости замковых соединений рабочих колес турбин с лопатками из монолитного керамического материала. Приведены модели механического и теплового контактов керамических и металлических деталей. Исследовано влияние масштабного фактора и коэффициента концентрации напряжений на прочность керамических деталей при растяжении.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, замковое соединение, керамические лопатки, контактное взаимодействие

To increase the efficiency of aircraft gas turbine engines, it is necessary to increase the temperature of the gas before the turbine. However, metal alloys used in modern designs may not be used for this without a reduction in the durability of parts. One way to solve this problem is to develop turbine designs with ceramic elements. The issues of ensuring thermal resistance of the lock joints of turbine impellers with blades made of monolithic ceramic material are considered in this work. Models of mechanical and thermal contact of

ceramic and metal parts are presented. The influence of the scale factor and stress concentration factor on the tensile strength of the ceramic parts is studied.

Keywords: gas turbine engine, lock joint, ceramic blades, contact interaction

Среди магистральных направлений развития авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) выделяют увеличение эффективного коэффициента полезного действия и полного назначенного ресурса, снижение уровня шума и выброса вредных веществ. Первая задача может быть решена повышением температуры газа перед турбиной T^* . По некоторым оценкам, максимально возможная T^* для углеводородного топлива составляет 2000...2500 °С [1]. В реальных конструкциях предельные значения T^* недостижимы из-за недостаточной прочности и жаростойкости никелевых сплавов лопаток и дисков турбин.

Для того чтобы поднять температуру, можно использовать два подхода: совершенствование систем охлаждения и внедрение новых жаропрочных материалов и покрытий. Для авиации крайне важны массовые и габаритные характеристики двигателей, поэтому второе направление является особенно актуальным.

К перспективным жаропрочным неметаллическим материалам относятся монокристаллические керамические, углерод-углеродные композиционные материалы и керамоматричные композиты. Работы по внедрению элементов из керамических материалов в конструкцию ГТД ведутся в рамках общенациональных программ в России, США, Японии, ФРГ и других странах с 1960-х годов [2–10]. В связи с этим отметим ряд работ авторов настоящей статьи [11–16].

Современные монокристаллические керамические материалы могут иметь прочность на изгиб до 800 МПа и сохранять работоспособность при температуре до 1600 °С. Существенный вклад в создание керамики с высокими механическими характеристиками внесли такие компании, как Allied Signal Ceramic Components, Norton Advanced Ceramics, Kyocera Industrial Ceramics Corp., АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» и др.

Конструктивной проработкой и испытанием рабочих колес с керамическими лопатками (КЛ) занимались фирмы Honeywell, Solar Turbines, Rolls-Royce, Volkswagen, MU, Kawasaki Heavy Industries, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» и др. Показано, что КЛ в условиях работы высо-

котемпературных турбин способны функционировать более 1000 ч [17].

Несмотря на обширные исследования, в настоящее время КЛ не внедрены в серийное производство. До сих пор не до конца решен ряд задач прочностной надежности таких изделий, среди которых можно выделить:

- усовершенствование расчетных методов, основанных на моделях быстрого разрушения керамических деталей;
- создание моделей исчерпания долговечности керамических деталей, обусловленной ростом трещин от исходных дефектов, ползучестью, окислением;
- изучение особенностей контактного взаимодействия керамических и металлических деталей;
- обеспечение прочности при вибрационном и ударном воздействиях на керамические детали [18].

При создании ротора турбомшины с КЛ, работающими на растяжение под действием центробежных сил, необходимо выбрать способ соединения лопаток с металлическим диском (МД). Конструктивные особенности соединения определяются центробежными (от 2000 до 20000 об/мин) и тепловыми (до 800 °С) нагрузками.

Можно выделить три основных способа соединения КЛ с МД: 1) изготовление цельнокерамического ротора; 2) раздельное изготовление МД и лопаток из керамических материалов, а затем их соединение с помощью специальных технологических операций; 3) выполнение МД и КЛ с замковым соединением. Наиболее реальным на сегодняшний день представляется реализация третьего варианта. Естественно, что в связи с этим исследование механического и теплового контактов МД и КЛ является актуальной научной задачей.

Цель работы — определение рациональных параметров замковых соединений КЛ с МД в перспективных ГТД с учетом особенностей их теплового и механического контактов.

Разработка моделей механического и теплового контактов. Для никелевых лопаток турбин используют замковые соединения елочного типа. С увеличением числа зубьев уменьшается

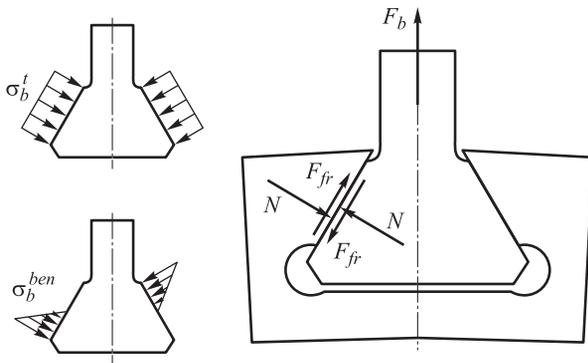


Рис. 1. Схема сил, возникающих в замковом соединении КЛ типа «ласточкин хвост»

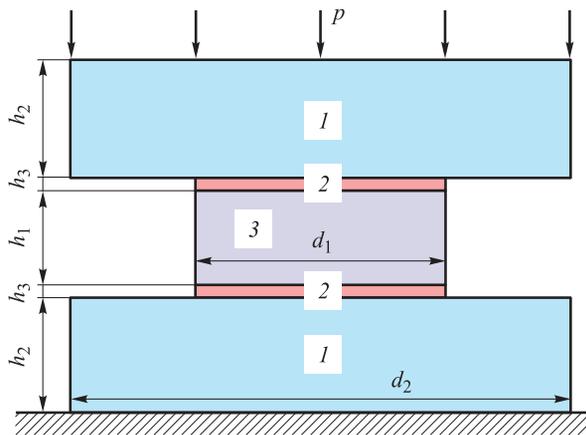


Рис. 2. Модель контакта КЛ и МД:

h_1, h_2 и d_1, d_2 — толщины и диаметры металлического и керамического образцов соответственно

сила, действующая на каждый из них, но возрастают растягивающие напряжения в их впадинах. При разработке конструктивного облика соединения с КЛ необходимо использовать решения, позволяющие снизить растягивающие напряжения.

Одним из самых подходящих конструктивных вариантов является замковое соединение

КЛ типа «ласточкин хвост», в котором центробежная сила лопатки F_b уравновешена усилиями N , действующими на боковые грани замка, и силами трения F_{fr} (рис. 1). Напряжение смятия на боковой поверхности замка σ_b складывается из двух его составляющих, возникающих под действием растягивающей силы σ_b^t и изгибающих моментов σ_b^{ben} . Здесь индексы «b», «t» и «ben» означают *bearing*, *tensile* и *bending*.

При проектировании замков для никелевых лопаток турбин напряжение σ_b , как правило, не превышает 400...700 МПа. Для замковых соединений с использованием КЛ такой опыт практически отсутствует. На первой стадии проектирования необходимо разработать простую модель, позволяющую оценить предельные значения σ_b для КЛ. Также очень важно исследовать тепловой контакт КЛ и МД. Контактная термическая проводимость может сильно влиять на перепад температур в зоне контакта и на максимальную температуру МД.

Допуская в первом приближении, что коэффициент трения в замковом соединении близок к нулю и что растягивающие и изгибающие нагрузки несущественно влияют на напряженное состояние в области контакта, можно провести аналогию с задачей о вдавливании штампа в упругое полупространство. Более подробно модели механического и теплового контактов рассмотрены в работе [16].

Предложена модель, состоящая из штампов с круговым основанием, в которой керамический образец 3 расположен между двумя металлическими 1 (см. рис. 1). Сверху к образцам приложено сжимающее давление от прессы p (рис. 2). При этом между ними возникает контактный слой 2 толщиной h_3 , зависящий от качества обработки поверхностей и влияющий на момент разрушения.

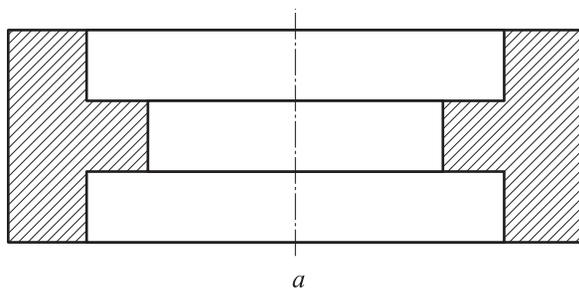


Рис. 3. Схема (а) и внешний вид устройства (б) для центровки образцов



б

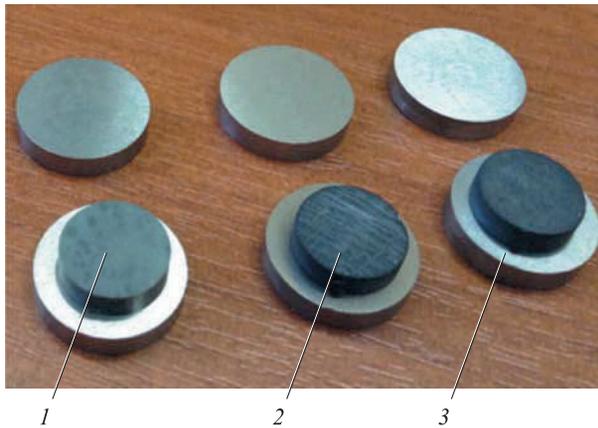


Рис. 4. Внешний вид контактных образцов, изготовленных из разных керамических материалов:

1 и 2 — из карбида кремния с шероховатостью контактных поверхностей $Ra = 2,1$ мкм и $Ra > 20$ мкм;
3 — из нитрида кремния

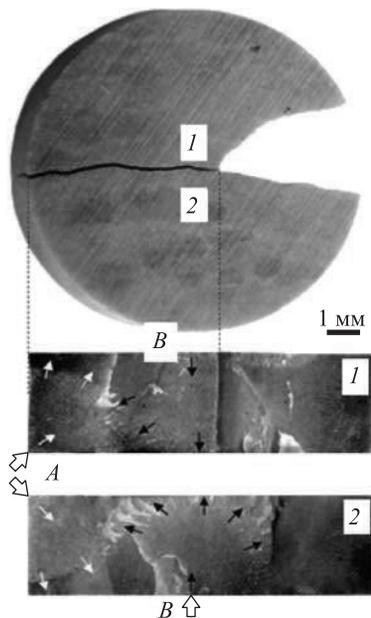


Рис. 5. Фрактография образца из нитрида кремния

С целью увеличения влияния контактного взаимодействия для керамического образца принято отношение толщины к диаметру $h_1/d_1 = 0,2 \ll 1$. В этой модели $\sigma_b = P_{\max}/S_{\text{cont}}$, где P_{\max} — предельная сжимающая нагрузка; $S_{\text{cont}} = \pi d_1^2/4$ — номинальная площадь контакта. Перед испытанием проведена центровка образцов (рис. 3).

Экспериментальное исследование механического и теплового контактов керамики и металла. Исследованы образцы из стали и монокристаллической керамики, выполненные на основе двух материалов:

- карбида кремния SiC, армированного алмазными частицами [12] с модулем упругости 520 ГПа, плотностью 3200 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности 300 Вт/(м·град);
- горячепрессованного нитрида кремния Si₃N₄ [19] с модулем упругости 240 ГПа, плотностью 3450 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности 19 Вт/(м·град).

На рис. 4 показаны контактные образцы, изготовленные из карбида кремния с контактными поверхностями разной шероховатости ($Ra = 2,1$ мкм и $Ra > 20$ мкм) и нитрида кремния с шероховатостью $Ra = 0,9$ мкм.

Испытания проводили при непрерывном нагружении до разрушения образцов. Минимальное разрушающее напряжение смятия для образцов из SiC с шероховатостью $Ra = 2,1$ мкм и $Ra > 20$ мкм составило 138 и 163 МПа соответственно, а для образцов из Si₃N₄ с шероховатостью $Ra = 0,9$ мкм — 1339 МПа. Фрактография осколков 1 и 2 образца из нитрида кремния выявила два очага разрушения (рис. 5): A — в его нижней части с краю; B — в верхней части посередине площадки контакта.

При исследовании теплового контакта керамических и металлических деталей, как и в случае механического контакта, использована модель с образцами цилиндрической формы 1 (рис. 6). Для нахождения контактной термической проводимости α_k в парах металл–керамика предложена методика, включающая в себя экспериментальное определение температуры в контактной модели и решение обратной задачи теплопроводности. Написан вспомогательный программный код в среде ANSYS APDL.

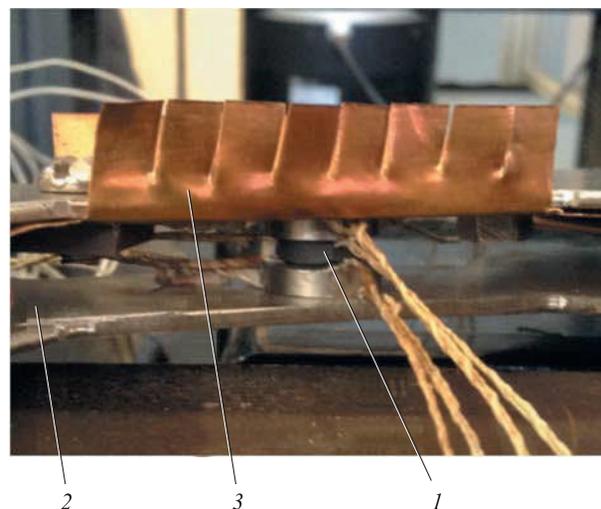


Рис. 6. Фрагмент термомеханических испытаний

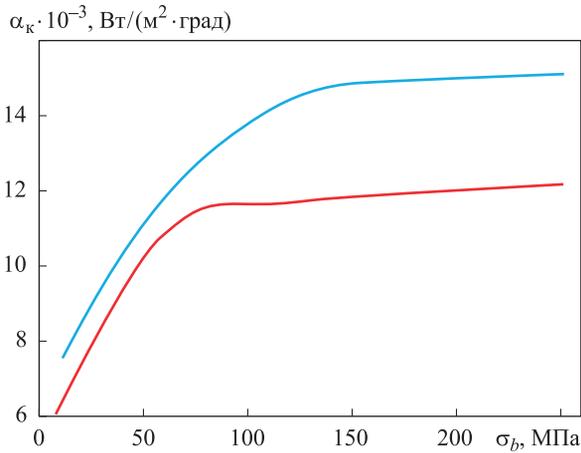


Рис. 7. Зависимость контактной термической проводимости α_k от напряжения смятия σ_b , полученная при термомеханических испытаниях пар образцов керамика SiC–сталь (—) и керамика Si₃N₄–сталь (—)

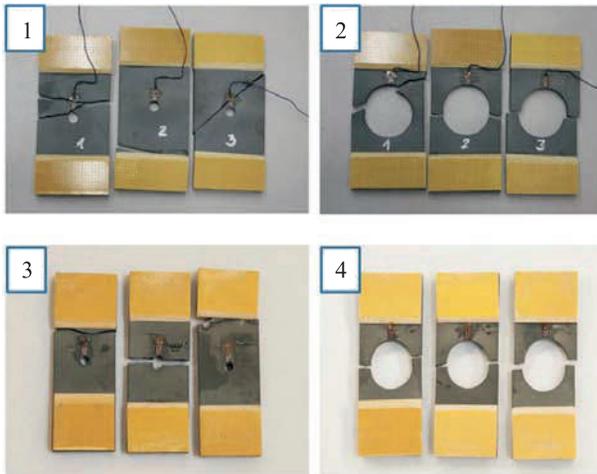


Рис. 8. Внешний вид исследованных образцов из карбида кремния

Термомеханические испытания проводили со ступенчатым увеличением нагрузки и выдержками на каждом режиме до момента установления стационарного температурного режима. В обеих парах керамика–сталь при давлении 1 МПа с возрастанием температуры до 500 °С контактная термическая проводимость α_k изменялась слабо и не превышала 5350 Вт/(м²·град). В паре керамика SiC–сталь при температуре до 200 °С и увеличении давления с 10 до 250 МПа параметр α_k изменялся от 7500 до 15100 Вт/(м²·град), а в паре керамика Si₃N₄–сталь — от 6010 до 12200 Вт/(м²·град) (рис. 7). В ходе термомеханических испытаний ни один из образцов не был разрушен.

Анализ результатов показал, что при уровне напряжения смятия, соответствующем эксплу-

атационному (более 200 МПа), контактную термическую проводимость α_k можно считать постоянной величиной.

Экспериментальное исследование прочности керамических образцов с концентраторами напряжений. Для исследования влияния концентрации напряжений и масштабного фактора на разрушение керамических деталей предложено использовать четыре типа образцов в виде прямоугольных пластин длиной L , шириной b и толщиной 4 мм с центральным отверстием радиусом r (рис. 8). Изготовлено 12 керамических образцов из карбида кремния, дисперсно армированного алмазными частицами.

Для того чтобы исключить разрушения при испытаниях на растяжение, в области контакта с захватами на образцы наклеили прокладки из стеклопластика l (рис. 9).

Проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния образцов в момент их разрушения (рис. 10). Коэффициент концентрации напряжений K_σ определяли как отношение максимального значения первого главного напряжения σ_{1max} к его среднему значению σ_{1mean} в сечении с минимальной площадью.

Вследствие малой статистики представляется целесообразным сравнивать результаты испытаний наиболее прочных образцов каждого типа с разрушением строго по центру отверстия 2 (см. рис. 9).

В таблице приведены геометрические характеристики (L , b и r) образцов четырех типов и значения параметров, полученных при термомеханических испытаниях: коэффициента кон-

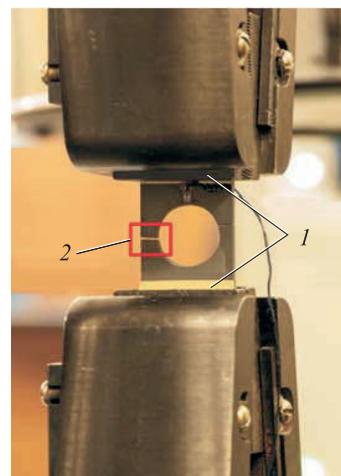


Рис. 9. Фрагмент испытаний на растяжение

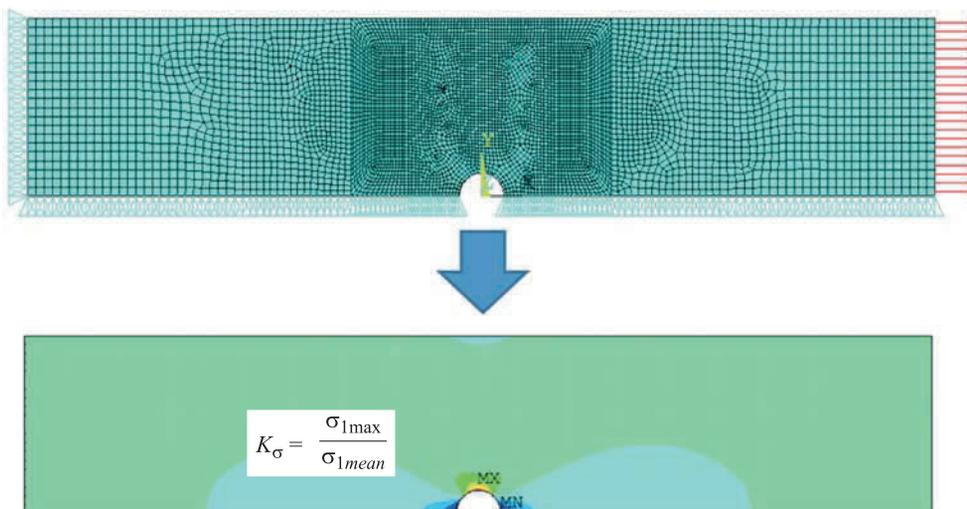


Рис. 10. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния образцов в момент их разрушения

центрации напряжений K_σ , максимальных растягивающих напряжений $\sigma_{1\max}$, максимальных значений первых главных напряжений для наименее прочных образцов каждой серии $\sigma_{1\min}$ и максимально допустимых растягивающих напряжений $\sigma_{1\text{ЛМ}}$ при вероятности разрушения образцов $P_f = 0,001$.

Как видно из таблицы, при одинаковом коэффициенте концентрации напряжений $K_\sigma = 2,6$ образец типа 3 с радиусом $r = 2$ мм оказался на 19 % прочнее образца типов 1 с $r = 3$ мм. Прочности образцов типов 2 и 4 с коэффициентом концентрации $K_\sigma = 2,1$ различались не более чем на 3 %. Таким образом, при увеличении коэффициента концентрации напряжений масштабный фактор оказывает большее влияние на прочность, чем K_σ . Однако для окончательных выводов требуются более полные статистические данные.

Оценку прочностной надежности керамических деталей необходимо проводить с использованием вероятностных подходов [20]. Так как разрушение деталей из хрупких материалов определяется максимальным уровнем растягивающих напряжений, можно записать

Геометрические характеристики образцов и результаты термомеханических испытаний

Тип	L	b	r	K_σ	$\sigma_{1\max}$	$\sigma_{1\min}$	$\sigma_{1\text{ЛМ}}$, ($P_f = 0,001$)
1	100	45	3	2,6	239	109*	101
2	100	45	15	2,1	253	166	105
3	80	30	2	2,6	295	166*	106
4	80	30	10	2,1	246	114	109

* Разрушение произошло в области захватов.

$$P_f = 1 - \exp \left[- \frac{V_{ef1}}{V_{ef2}} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^m \right], \quad (1)$$

где V_{ef1} и V_{ef2} — эквивалентные равномерно растяжению объемы детали и образца, равные произведению полных объемов на коэффициент нагрузки; σ_{\max} и σ_0 — максимальное растягивающее напряжение в детали и напряжение, при котором вероятность разрушения образцов $P(\sigma_0) = 0,63$; m — модуль Вейбулла.

Зная требуемое значение P_f , из равенства (1) можно выразить максимальное растягивающее напряжение в детали:

$$\sigma_{\max}(P_f) = \sigma_0 \left[\frac{V_{ef2}}{V_{ef1}} \ln \left(\frac{1}{1 - P_f} \right) \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (2)$$

Для того чтобы вычислить эквивалентный равномерно растяжению объем детали V_{ef1} , предлагается каждый из N объемов с величиной V_i конечно-элементной модели умножить на коэффициент нагрузки k_{si} , характеризующий вид напряженного состояния:

$$V_{ef1} = \sum_{i=1}^N k_{si} V_i. \quad (3)$$

Для определения вида напряженного состояния в каждом элементе можно использовать параметр Надаи–Лоде:

$$\chi_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (4)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 — главные напряжения, усредненные по узлам элемента.

Значения параметра χ_σ принадлежат отрезку $[-1, 1]$ (одноосное сжатие). При параметре $\chi_\sigma < 0$ коэффициент нагрузки $k_{si} = -1 \cdot \chi_\sigma$, а при $\chi_\sigma \geq 0$ — $k_{si} = 0$.

Численное моделирование прочности КЛ. На основе соотношений (1)–(4) и результатов конечно-элементного анализа в среде ANSYS APDL написана вычислительная программа, позволяющая определять вероятность разрушения керамических деталей. Блок-схема алгоритма вычисления вероятности разрушения керамических деталей на базе конечно-элементного (КЭ) решения приведена на рис. 11.

Полные объемы исследуемых образцов с концентраторами напряжений для образцов типов 1–4 составили соответственно 7887, 15173, 9550, 8343 мм³, а объемы V_{efl} — 17340, 10496, 9308, 6317 мм³.

Значения средней предельной нагрузки $P_{max} = 244$ Н, соответствующего ей растягивающего

напряжения $\sigma_{1max} = 232$ МПа, модуля Вейбулла $m = 14$ и эффективного объема $V_{ef2} = 98$ мм³ получены на основе анализа данных испытаний на трехточечный изгиб серии образцов SiC с габаритными размерами 3×4×45 мм и численного моделирования (рис. 12). Напряжение σ_0 определено по формуле

$$\sigma_0 = \sigma_1 / \Gamma(1+1/m) = 240 \text{ МПа,}$$

где $\Gamma(\dots)$ — гамма-функция.

Проведен анализ прочности образцов с концентраторами при вероятности разрушения $P_f = 0,001$ с использованием ранее приведенных данных. Полученные максимально допустимые растягивающие напряжения σ_{LLIM} для данных условий указаны в таблице.

Анализ результатов расчетов показал, что наибольшее различие по параметру σ_{LLIM} в образцах типа 1 и 4 не превышает 8%. В данном случае масштабный фактор оказывает чуть

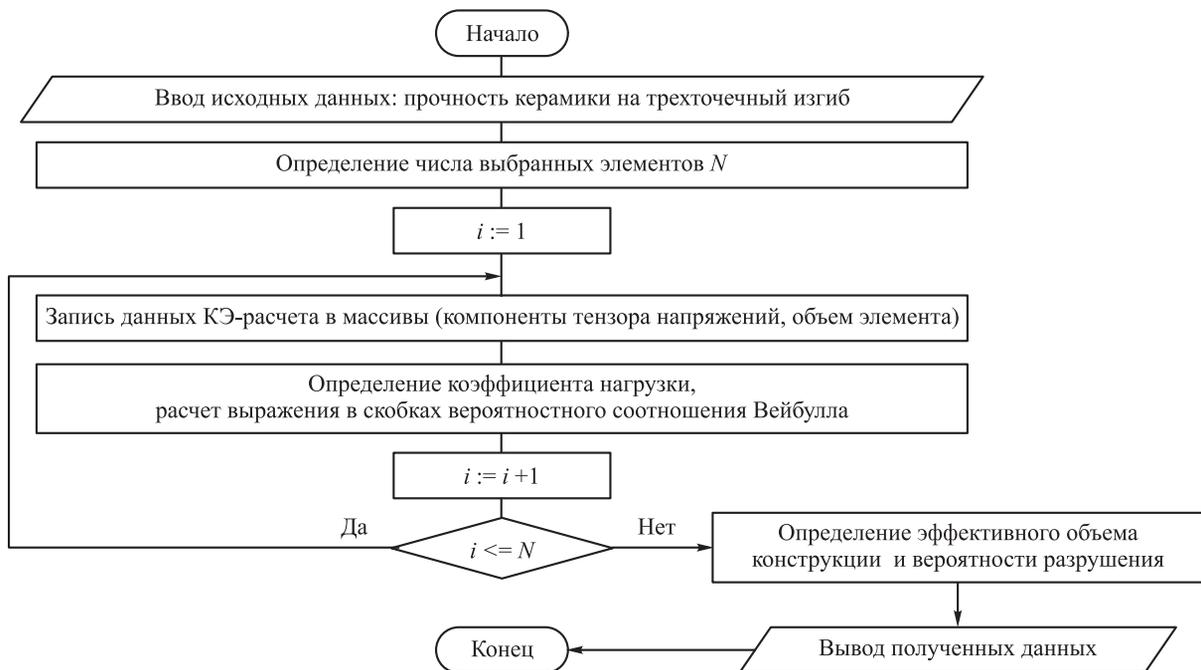


Рис. 11. Блок-схема алгоритма вычисления вероятности разрушения керамических деталей на базе конечно-элементного решения

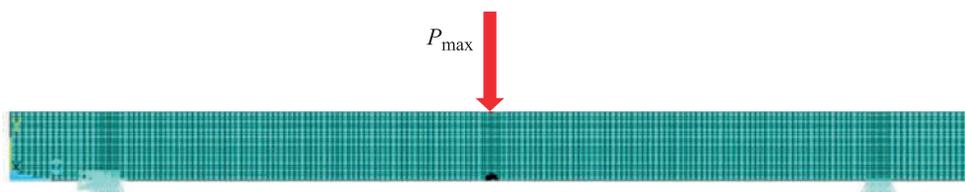


Рис. 12. Численное моделирование трехточечного изгиба образцов

большее влияние на прочность образцов, чем коэффициент концентрации напряжений.

Выводы

1. Предложены методики расчетно-экспериментального определения контактных прочности и термического сопротивления для замковых соединений КЛ с МД. Показано, что контактная прочность исследуемых керамических образцов из нитрида кремния почти в 10 раз выше, чем у образцов из карбида кремния. При напряжении смятия более 200 МПа контактную термическую проводимость можно считать постоянной величиной. В парах керамика SiC–сталь и керамика Si₃N₄–

сталь термическая проводимость $\alpha_k = 15100$ и 12200 Вт/(м²·град) соответственно.

2. Максимальная прочность образцов с концентраторами напряжений составила 295 МПа, минимальная — 114 МПа. С увеличением объема образцов влияние на прочность коэффициента концентрации напряжений K_σ становится сильнее. При этом масштабный эффект оказывает большее воздействие на прочность, чем K_σ . Предложенная математическая модель дает возможность рассчитать момент разрушения образцов с запасом.

3. Разработана вычислительная программа, позволяющая определять вероятность разрушения керамических деталей типа лопаток ГТД под действием эксплуатационных нагрузок.

Литература

- [1] Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. *Газотурбинные двигатели*. Пермь, Авиадвигатель, 2006. 1204 с.
- [2] Nozhnitsky Y.A., Fedina Y.A., Rekin A.D., Petrov N.I. Development and investigation of ceramic parts for gas turbine engines. *American Society of Mechanical Engineers*, 1997, GT1997-157, 6 p.
- [3] Nozhnitsky Y.A., Fedina Y.A., Rekin A.D. Experience of development of gas-turbine engines ceramic components at the central institute of aviation motors. *Ceramic Gas Turbine Design and Test Experience*, 2002, vol. 1, pp. 669–682.
- [4] Ferber M., Richerson D., Roode M. *Ceramic Gas Turbine Component Development and Characterization*. New York, ASME Press, 2003. 425 p.
- [5] *Ceramic Materials and Components for Engines*. Ed. Heinrich J.G., Aldinger F. New York, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001. 665 p.
- [6] Roode M., Ferber M., Richerson D. *Ceramic Gas Turbine Design and Test Experience*. New York, ASME Press, 2002. 700 p.
- [7] Ruggles-Wrenn M.B., Jones T.P. Tension-compression fatigue of a SiC/SiC ceramic matrix composite at elevated temperature. *Proc. of GT2012 ASME Turbo Expo*, 2012, GT2012-68902, doi: 10.1115/GT2012-68902
- [8] Van Roode M., Bhattacharya A.K. Durability of oxide/oxide CMCs in gas turbine combustors. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2012, vol. 1, pp. 475–485, doi: 10.1115/GT2012-68974
- [9] Boyle R.J., Parikh A.H., Nagpal V.K., Halbig M.C., DiCarlo J.A. Ceramic matrix composites for high pressure turbine vanes. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2014, vol. 6, doi: 10.1115/GT2014-27136
- [10] Watanabe F., Nakamura T., Shinohara K.-I. The application of ceramic matrix composite to low pressure turbine blade. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2016, vol. 6, doi: 10.1115/GT2016-56614
- [11] Резник С.В., Сапронов Д.В. Проектирование рабочего колеса газовой турбины с использованием керамических лопаток. *Вестник СГАУ*, 2014, № 5(47), с. 199–206.
- [12] Гордеев С.К., Ежов Ю.А., Каримбаев Т.Д., Корчагина С.Б., Мезенцев М.А. Дисперсно-упрочненные композиции алмаз-карбид кремния — новые материалы для машиностроения. *Композиты и наноструктуры*, 2015, т. 7, № 2, с. 61–71.
- [13] Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Ежов А.Ю. Разработка и экспериментальные исследования неметаллических деталей и узлов горячей части перспективного газотурбинного двигателя. *Вестник СГАУ*, 2015, т. 14, № 3(14), ч. 1, с. 128–138.
- [14] Сапронов Д.В. Исследование кратковременной прочности замковых соединений керамических лопаток и металлических дисков рабочих колес газовых турбин. *Новые решения и технологии в газотурбостроении. Сб. тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ЦИИМ*, 26–28 мая 2015, Москва, ЦИИМ, 2015, с. 266–267.

- [15] Сапронов Д.В. *Разработка методики проектирования замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском в перспективных газотурбинных двигателях летательных аппаратов*. Дис. ... канд. техн. наук, 2017. 156 с.
- [16] Reznik S.V., Sapronov D.V., Prosuntsov P.V. Computational and Experimental Investigation of Mechanical and Thermal Contacts of Ceramic Blades with the Metal Disk in Gas Turbine Engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 6, pp. 1438–1444.
- [17] Price J.R., Jimenez O., Parthasarathy V., Miriyala N. Ceramic Stationary Gas Turbine Development Program — Sixth Annual Summary. *Proceedings of ASME Turbo Expo*, 1999, 99-GT-351.
- [18] Richerson D. Historical review of addressing the challenges of use of ceramic components in gas turbine engines. *Proc. of ASME Turbo Expo*, 2006, GT2006-90330, doi: 10.1115/GT2006-90330
- [19] Келина И.Ю., Ершова Н.И., Дробинская В.А. Горячепрессованные материалы на основе нитрида кремния. *Наука — производству*, 1999, № 9, с. 17–22.
- [20] Schenk B., Brehm P.G., Menon M.N., Peralta A.D., Tucker W.T. Status of the CERAMIC/ERICA probabilistic life prediction codes development for structural ceramic applications. *Proc. of ASME Turbo Expo*, 1999, GT1999-318, doi: 10.1115/99-GT-318

References

- [1] Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. *Gazoturbinnye dvigateli* [Gas turbine engines]. Perm, Aviadvigatel' publ., 2006. 1204 p.
- [2] Nozhnitskiy Y.A., Fedina Y.A., Rekin A.D., Petrov N.I. Development and investigation of ceramic parts for gas turbine engines. *American Society of Mechanical Engineers*, 1997, GT1997-157, 6 p.
- [3] Nozhnitskiy Y.A., Fedina Y.A., Rekin A.D. Experience of development of gas-turbine engines ceramic components at the central institute of aviation motors. *Ceramic Gas Turbine Design and Test Experience*, 2002, vol. 1, pp. 669–682.
- [4] Ferber M., Richerson D., Roode M. *Ceramic Gas Turbine Component Development and Characterization*. New York, ASME Press, 2003. 425 p.
- [5] *Ceramic Materials and Components for Engines*. Ed. Heinrich J.G., Aldinger F. New York, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001. 665 p.
- [6] Roode M., Ferber M., Richerson D. *Ceramic Gas Turbine Design and Test Experience*. New York, ASME Press, 2002. 700 p.
- [7] Ruggles-Wrenn M.B., Jones T.P. Tension-compression fatigue of a SiC/SiC ceramic matrix composite at elevated temperature. *Proc. of GT2012 ASME Turbo Expo*, 2012, GT2012-68902, doi: 10.1115/GT2012-68902
- [8] Van Roode M., Bhattacharya A.K. Durability of oxide/oxide CMCs in gas turbine combustors. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2012, vol. 1, pp. 475–485, doi: 10.1115/GT2012-68974
- [9] Boyle R.J., Parikh A.H., Nagpal V.K., Halbig M.C., DiCarlo J.A. Ceramic matrix composites for high pressure turbine vanes. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2014, vol. 6, doi: 10.1115/GT2014-27136
- [10] Watanabe F., Nakamura T., Shinohara K.-I. The application of ceramic matrix composite to low pressure turbine blade. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2016, vol. 6, doi: 10.1115/GT2016-56614
- [11] Reznik S.V., Sapronov D.V. Design of the gas turbine engine rotor wheel with ceramic blades. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2014, no. 5(47), pp. 199–206 (in Russ.).
- [12] Gordeev S.K., Ezhov Yu.A., Karimbaev T.D., Korchagina S.B., Mezentsev M.A. Dispersion-strengthened diamond-silicon carbide compositions — new materials for mechanical engineering. *Composites and Nanostructures*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 61–71 (in Russ.).
- [13] Karimbaev T.D., Mezentsev M.A., Ezhov A.Yu. Engineering design and experimental research of non-metallic parts and components of the hot section of the advanced gas turbine engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2015, vol. 14, no. 3(14), pt. 1, pp. 128–138 (in Russ.).

- [14] Sapronov D.V. Investigation of the short-term strength of the locking joints of ceramic blades and metal disks of gas turbine impellers. *Novye resheniya i tekhnologii v gazoturbostroenii. Sb. tezisev dokl. Vseros. nauch.-tekhnich. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov TSIAM* [New solutions and technologies in gas turbine construction. Collection of theses of reports of the All-Russian scientific and technical conference of young scientists and specialists of CIAM]. 26–28 May 2015, Moscow, TSIAM publ., 2015, pp. 266–267.
- [15] Sapronov D.V. *Razrabotka metodiki proektirovaniya zamkovykh soedineniy keramicheskikh lopatok s metallicheskim diskom v perspektivnykh gazoturbinnnykh dvigatelyakh letatel'nykh apparatov*. Kand. Diss. [Development of design methods for locking joints of ceramic blades with a metal disk in promising gas turbine aircraft engines. Cand. Diss.]. 2017. 156 p.
- [16] Reznik S.V., Sapronov D.V., Prosuntsov P.V. Computational and Experimental Investigation of Mechanical and Thermal Contacts of Ceramic Blades with the Metal Disk in Gas Turbine Engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 6, pp. 1438–1444.
- [17] Price J.R., Jimenez O., Parthasarathy V., Miriyala N. Ceramic Stationary Gas Turbine Development Program — Sixth Annual Summary. *Proceedings of ASME Turbo Expo*, 1999, 99-GT-351
- [18] Richerson D. Historical review of addressing the challenges of use of ceramic components in gas turbine engines. *Proc. of ASME Turbo Expo*, 2006, GT2006-90330, doi: 10.1115/GT2006-90330
- [19] Kelina I.Yu., Ershova N.I., Drobinskaya V.A. Hot Silicon Nitride Based Materials. *Nauka — proizvodstvu*, 1999, no. 9, pp. 17–22 (in Russ.).
- [20] Schenk B., Brehm P.G., Menon M.N., Peralta A.D., Tucker W.T. Status of the CERAM-IC/ERICA probabilistic life prediction codes development for structural ceramic applications. *Proc. of ASME Turbo Expo*, 1999, GT1999-318, doi: 10.1115/99-GT-318

Статья поступила в редакцию 18.03.2019

Информация об авторах

РЕЗНИК Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sreznik@bmstu.ru).

САПРОНОВ Дмитрий Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана; ведущий инженер, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 2, корп. 19, e-mail: dvsapronov@ciam.ru).

КАРИМБАЕВ Тельман Джамалдинович — доктор технических наук, профессор, начальник отдела ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Российская Федерация, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, корп. 19, e-mail: tdkarimbayev@ciam.ru).

МЕЗЕНЦЕВ Михаил Александрович — начальник сектора ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Российская Федерация, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, корп. 19, e-mail: mamezentsev@ciam.ru).

Information about the authors

REZNIK Sergei Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sreznik@bmstu.ru).

SAPRONOV Dmitrii Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University; Lead Engineer. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Avaimotornaya St., Bldg. 2, Block 19, e-mail: dvsapronov@ciam.ru).

KARIMBAEV Telman Dzhamaldinovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Avaimotornaya St., Bldg. 2, Block 19, e-mail: tdkarimbayev@ciam.ru).

MEZENTSEV Mikhail Aleksandrovich — Head of Sector. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Avaimotornaya St., Bldg. 2, Block 19, e-mail: mamezentsev@ciam.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Резник С.В., Сапронов Д.В., Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А. Определение рациональных параметров замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском в перспективных авиационных газотурбинных двигателях. Часть I. Модели механического и теплового контактов керамических и металлических частей рабочего колеса турбины. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 6, с. 71–81, doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-71-81

Please cite this article in English as:

Reznik S.V., Sapronov D.V., Karimbaev T.D., Mezencev M.A. The Determination of Rational Parameters of Lock Joints of Ceramic Blades with a Metal Disk in Advanced Aircraft Gas Turbine Engines. Part I. Models of Mechanical and Thermal Contact of Ceramic and Metal Parts of the Turbine Impeller. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 6, pp. 71–81, doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-71-81



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
А.И. Куприянова

**«Радиосигналы и радиоустройства
в информационных системах.
Часть 2. Основные радиотехнические процессы,
устройства и системы»**

Приведены начальные сведения об основах теории и техники радиотехнических устройств как о материальной базе современных систем и методов и средств защиты информации.

Для студентов технических вузов, изучающих методы и средства обеспечения информационной безопасности, также может представлять интерес для специалистов в области защиты информации.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru