

УДК 620.22

Е.Н. Каблов

**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЯ «БУРАН» – ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ  
ФОРМИРОВАНИЯ ШЕСТОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УКЛАДА**

*Создание советского многоразового космического корабля «Буран» в рамках программы «Энергия–Буран» было самым масштабным проектом в истории отечественной космонавтики, результатом колоссального труда и продуктом творчества большого коллектива лучших ученых АН СССР и отраслевых институтов. Этот проект по своим масштабам, а также политической, научно-технической и социально-экономической значимости можно с полным основанием сравнить с реализацией атомного проекта, который в свое время обеспечил нашей стране статус мировой сверхдержавы.*

*Сотрудникам ВИАМ было поручено решение наиболее ответственной задачи – разработка принципиально новых высокоэффективных материалов и технологий. Ученые ВИАМ успешно выполнили все обязательства – разработали более 70 материалов и технологий, которые полностью соответствовали техническим заданиям и были применены на корабле «Буран».*

**Ключевые слова:** теплозащитные материалы, гидрофобизаторы, материалы серии АТМ, углерод-углеродные композиционные материалы, реакционно-отверждаемые терморегулирующие эрозионностойкие покрытия, кварцевые волокна, материал ТЗМК-1700.

*Creation of the Soviet reusable spaceship «Buran» within the frame of «Energiya-Buran» program was the most large-scale project in the history of the domestic astronautics being the result of great efforts and the product of creative activity of a big team of the best scientists from Academy of Sciences of the USSR and branch institutes. In terms of the scale and also the political, scientific, technical, social and economics importance, this project can be favorably compared with implementation of the nuclear project, which in due time provided the status of a worldwide superstate to our country.*

*The solution of the most challenging task – the development of essentially new highly effective materials and technologies was entrusted to employees of VIAM. Scientists of VIAM had successfully fulfilled all obligations – they developed more than 70 materials and technologies completely corresponded to specifications to use in «Buran» spaceship.*

**Key words:** heat-shielding materials, waterproofing compositions, ATM materials, carbon-carbon composite materials, thermoregulating erosion-resistant reaction-cured coatings, quartz fibers, TZMK-1700 material.

Последнее десятилетие XX века и начало века XXI – нелегкое время для отечественной промышленности и, наверное, еще более нелегкое – для науки. Не стану перечислять многочисленные проблемы, возникшие как «естественным» путем, так и появившиеся благодаря неверным, если не сказать резче, политическим и экономическим решениям. Они есть и видны очень хорошо. Остановлюсь только на одной, но, пожалуй, самой важной – потере научного, технического и технологического оптимизма. Многие наши коллеги покинули науку и ушли в лучшем случае в бизнес, немало специалистов отправились искать приложение своим знаниям за рубеж. Неверие в собственные силы останавливало многих, и, когда до победы оставался один шаг, они сдавались и отступали. В то же время уверенность в правоте своего дела, в друзьях и коллегах позволяла в самых невероятных условиях горы свернуть. Так страна победила в Великой Отечественной войне, так было с атомным проектом в СССР, так мы вышли в космос. И сейчас, когда мир стоит на пороге перехода в новый этап развития (в шестую кондратьевскую волну), нам не следует сдаваться, тем более что у нас есть багаж знаний, есть опыт создания самых совершенных образцов

техники, далеко обогнавших свое, да и нынешнее время.

Понятие «технологический уклад» предложил выдающийся русский ученый-экономист Н.Д. Кондратьев (1892–1938 гг.). Основываясь на теории длинных волн, он выдвинул идею о существовании больших экономических циклов продолжительностью в 48–55 лет, в течение которых происходит смена запаса основных материальных благ, и как стало ясно несколько позднее – источников энергии. В результате мировые производительные силы переходят на более высокий уровень развития [1–3].

15 ноября 1989 года – особая дата в освоении космоса. Именно в этот день совершил первый полет советский многоразовый космический орбитальный самолет «Буран». Скептики скажут: «Ну и что, американцы уже летали на своих челноках», и будут не правы. Во-первых, полет, а самое главное – спуск и посадка корабля были осуществлены в автоматическом режиме. Это было сделано впервые в мире, и, кстати, пока еще никому не удалось такой полет повторить. Во-вторых, «Буран» по многим параметрам отличался от американских кораблей многоразового использования, прежде всего, системой теп-

лозащиты, разработанной во Всесоюзном институте авиационных материалов (ВИАМ).

Читатели могут спросить, а причем здесь шестая кондратьевская волна, ведь материалы для «Бурана» разрабатывались в 1980-х годах? Ответу: создание этих материалов – великолепный пример комплексной организации современного научного исследования, разработки на его основе новой уникальной технологии и как результат – организация промышленного производства изделий и материалов с уникальными свойствами. При этом полученные результаты могут использоваться не только «по прямому назначению», но и широко применяться в разных отраслях промышленности. И самое главное – эти результаты выводят человечество на новый технологический уровень. Так получилось и с разработанными в ВИАМ материалами по программе «Буран» [4]. Созданные в ее рамках материалы и прорывные технологии, представляли собой первый шаг, первую попытку начать переход в новый, шестой технологический уклад.

Сейчас идет много разговоров об инновациях, об инновационном подходе к экономике. Однако за словесной трескотней часто теряется смысл самого понятия «инновация», и в ход идут проекты с давно освоенными технологиями, зачастую морально устаревшие. А ведь инновационным продуктом можно считать лишь тот, в себестоимости которого доля затрат по НИОКР на его создание составляет не менее 15%, а то и больше. Конечно, в этом случае из понятия «инновационный продукт» автоматически выпадает продажа нефти, газа, большинства видов металла и разнообразные «отверточные» производства. Нужно четко и ясно отдавать себе отчет в том, что и «отвертки», и торговля ресурсами в технологическом плане тянут страну назад, хотя дают пока неплохой доход. Но это – до поры до времени. Настанет день, когда при таком подходе страна окажется в зависимости от внешних сил – и хорошо, если только финансовых.

Разумеется, международное сотрудничество совершенно необходимо, но мы сами (именно мы сами, а не «дядя со стороны») должны проанализировать свои потребности. Мы сами должны определить, что мы можем сделать самостоятельно: есть масса вещей, которые мы делаем лучше других. Только от наших усилий зависит обеспечение обороноспособности страны, повышение уровня жизни населения, его образование и культура. Да, образование и культура – это такие же инновационные продукты, как интерметаллиды, композитные материалы и информационные технологии. Только их значение куда более весомо. Без этого не будет нации, без этого не будет страны!

Но вернемся к «Бурану». История работы ВИАМ над этим проектом, по сути дела, логична. Подавляющее число материалов, использующихся в авиации и космонавтике, так или иначе связа-

но с нашим институтом. Большинство из них (не менее 95%) разработано специалистами ВИАМ, еще большее количество прошло здесь различные испытания и паспортизацию. И совершенно логично, что при подготовке Постановления ЦК КПСС и СМ СССР о разработке многоразовой авиационно-космической системы, получившей впоследствии название «Энергия–Буран», в начале февраля 1976 года работы по созданию материалов для космического самолета были поручены ВИАМ. Генеральный директор НПО «Молния» Г.Е. Лозино-Лозинский, на которого была возложена обязанность Генерального конструктора проекта, приехал тогда к нам на улицу Радио и рассказал о предстоящей работе и о трудностях, которые нас ожидали. Особый акцент он сделал на проблеме тепловой защиты многоразового космического корабля, описав свое видение материаловедческих аспектов. И в весьма корректной форме подчеркнул, что решение этой проблемы целиком ложится на ВИАМ. При этом Генеральный конструктор предупредил, что традиционные, недостаточно смелые, «спокойные» решения его не устроят.

Впервые в конструкции были применены неметаллические материалы. Именно эти материалы определяли – быть или не быть «Бурану». В кратчайшие сроки требовалось создать теплозащитную «плитку» из ультратонкого кварцевого волокна и организовать ее производство. Сложность состояла в том, что к началу проектирования «Бурана» в стране не было необходимого сырья – высокотемпературного особо чистого супертонкого (диаметром 1,5–2 мкм) кварцевого волокна, работоспособного при температурах до 1250°C.

Перед институтом стояла важнейшая задача – создание системы тепловой защиты многоразового космического корабля, а также комплекс частных, но от этого ничуть не менее сложных проблем: начиная от создания клеев и подложек, внешних покрытий, защищающих материал от влаги и атмосферных воздействий, и заканчивая раскроем отдельных деталей и организацией послеполетного ремонта и восстановления покрытий.

Поскольку материал теплозащитных плиток должен быть максимально легким (волокну в нем отводилось менее 10% объема, остальное занимали поры), сложнейшей задачей было обеспечение его достаточной механической прочности. Для этого нужно было выполнить непростое условие: в местах соприкосновения волокон друг с другом осуществить их соединение, чтобы они в результате образовали единый жесткий пространственный каркас.

Пришлось разрабатывать принципиально новые связующие и технологии изготовления плитки. Более того, для обеспечения ее работоспособности потребовалось создать эрозиянностойкое влагозащитное покрытие с высокой степенью черноты (более 0,8) для снижения температуры

поверхности. А затем – высокотемпературные клеи и демпфирующие подложки (фетры) для закрепления теплозащитных плиток (ТЗП) на алюминиевой обшивке «Бурана».

Надо отдать должное Г.Е. Лозино-Лозинскому: вначале еженедельно, а затем каждые две недели он собирал специалистов ВИАМ для детального обсуждения хода работ и организации необходимой помощи при возникновении трудностей.

Итогом работы стали новые теплозащитные материалы (ТЗМ) на основе нитевидных кристаллов нитрида кремния, кварцевых волокон и волокон оксида алюминия (ТЗМК-10/2,5 и ТЗМК-25), работоспособные до температуры 1250°C. При очень невысокой плотности (0,15 и 0,25 г/см<sup>3</sup> соответственно) они обладают также очень низкой теплопроводностью [5–8].

Теплозащита многоцветного космического корабля предназначена для работы в зоне воздействия высокотемпературного воздушного потока, который может вызвать разрушение поверхности ТЗМ. В связи с этим каждый элемент требовалось снабдить наружным покрытием, которое обеспечивало бы требуемые оптические характеристики для переизлучения теплового потока, эрозионную защиту и защиту от попадания в плитку воды и влаги. Для этого в институте были разработаны покрытия двух типов: «черные» ЭВЧ-4М1У-3 и ЭВЧ-6 с высокой излучательной способностью – для защиты нижней части планера при спуске от наибольших тепловых нагрузок, и «белое» ЭВС-6, ограничивающее температуру нагрева верхней части планера от солнечного излучения в орбитальном полете [9].

Но ничуть не менее сложной задачей была защита плитки от насыщения ее водой. Материал плитки имеет высокую пористость и гидрофилен по своей природе, он может сорбировать до 700% (по массе) влаги. Понятно, что это приводит не только к недопустимому повышению массы и может вызвать чрезмерное утяжеление изделия, но и ухудшает все рабочие параметры ТЗП. При выходе изделия на орбиту вследствие интенсивного испарения влаги покрытие просто разрушится. Допустить этого ни в коем случае нельзя.

И эту задачу в ВИАМ удалось решить. Были разработаны гидрофобизаторы К-21 и К-21ИТ и капиллярная установка для их нанесения на плитку. Вторым этапом была разработка гидрофобизатора и способа его нанесения на ТЗП непосредственно на изделие, без термообработки [10]. Замечу, что для объемной гидрофобизации плитки непосредственно на изделии была отработана технология с использованием паровой фазы химических соединений с невысокой температурой кипения, большой летучестью и упругостью паров. После гидрофобизации на поверхность плитки наносилась дополнительно лаковая пленка для защиты от атмосферных осадков.

Поскольку теплозащитный материал и обшивка изделия имеют сильно отличающиеся коэффициенты линейного расширения, крепление его непосредственно к обшивке привело бы к появлению в конструкции напряжений и самопроизвольному разрушению плитки. Поэтому крепление ТЗП к обшивке осуществлялось через демпфирующую подложку – фетр, для создания которого были разработаны термостойкие органические волокна типа фенилон, терлон, арамид и лола.

Из этих волокон (в различных сочетаниях) специалисты нашего института создали несколько совершенно уникальных материалов. В качестве демпфирующей подложки использован материал АТМ-15; для вкладышей, обеспечивающих допустимую температуру в зазорах между элементами ТЗП, – материал АТМ-16; для зон планера, где температура не превышает 370°C, – гибкое теплозащитное покрытие АТМ-19 [11]. Разумеется, для этих материалов разработана гидрофобизация и для двух последних – эрозионностойкие покрытия [12].

Для склеивания материалов в теплозащитном элементе и крепления теплозащитных материалов к обшивке изделия был разработан клей-герметик холодного отверждения Эластосил 137-175М, имеющий в отвержденном состоянии удлинение выше 100% и диапазон рабочих температур от -110 до +300°C [13].

Уникальная тепловая защита многоцветного космического корабля «Буран» была изготовлена под руководством специалистов ВИАМ на Тушинском машиностроительном заводе при участии специалистов НПО «Молния» и ОНПП «Технология». По целому ряду характеристик (прочность плитки, аэродинамическое качество, степень черноты и каталитичность покрытия) она значительно превосходила американский аналог, разработанный для системы «Спейс Шаттл». В ходе полета «Бурана» из 37500 плиток теплозащиты лишь 6 были утеряны и около 100 повреждены при посадке, тогда как в первом полете «Шаттла», по разным источникам, было утеряно от 14 до 37 теплозащитных плиток, а повреждено в 2–2,5 раза больше, чем на «Буране» [4, 14, 18].

«По сочетанию массы, теплопроводности и теплопрочности внешняя многоцветная теплозащита в виде отдельных элементов – плиток – явилась уникальным решением проблемы теплозащиты орбитального корабля», – так оценили эту работу генеральный директор НПО «Энергия» Ю.П. Семенов и генеральный директор НПО «Молния» Г.Е. Лозино-Лозинский.

Для передних кромок крыльев и носка, где температура достигает 1500–1650°C, в ВИАМ в содружестве с НИИГрафит и НПО «Молния» разработан углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ) «Гравимол-В» [14].

И это лишь неполный перечень материалов, разработанных в ВИАМ для изделия «Буран».

Контроль ТЗП и агрегатов из УУКМ осуществлялся с использованием всех методов неразрушающего контроля, включая лазерные, акустические, нейтронные, рентгеновские, методы электронной микроскопии и др.

Особо следует отметить, что при выполнении работ было найдено много новых нетрадиционных решений, выполненных на уровне изобретений и защищенных соответствующими правовыми документами. В результате проведенных исследований созданы научные основы синтеза реакционно-отверждаемых терморегулирующих эрозионностойких покрытий. Предложен механизм получения стабилизированной структуры волокон системы  $Al_2O_3-SiO_2$ , заключающийся в формировании пространственного муллитового каркаса, стабилизированного зернами  $Al_2O_3$  [6, 7, 15, 16].

Кроме того, в процессе разработки материалов для этого важного изделия был создан ряд прорывных технологий.

Для создания теплозащитных плиточных материалов, удовлетворяющих требованиям эксплуатации орбитального корабля «Буран», впервые были разработаны технология получения мелкодисперсного штапельированного кварцевого волокна диаметром 1–2 мкм и технология получения термостойкого полиимидного волокна араמיד [17].

Особенно важным в работе над материалами по программе «Энергия–Буран» представляется то, что исследования и разработки проводились в широкой и хорошо отлаженной кооперации со многими ведущими научными институтами и промышленными предприятиями страны. Среди них НПО «Молния», ЦАГИ, ЛИИ, ЦИАМ, Ступинский металлургический комбинат, Курчатовский институт, Институт электросварки им. Патона, ряд институтов Белоруссии и Армении и многие другие предприятия и организации. В процессе проектирования и изготовления теплозащитных элементов для «Бурана» была осуществлена уникальная технология производства огромного числа различных по форме деталей без чертежей, на основе компьютерных моделей и программ [18]. Для своего времени это было абсолютно уникальным решением, да и сейчас не многие предприятия сумели освоить такие технологии – технологии XXI века.

Опыт создания и освоения подобных материалов показал, что большие затраты и усилия на этом пути окупаются с лихвой благодаря тем результатам, которые дает их применение, причем не только в аэрокосмической сфере.

Все свойства нового материала, получившего обозначение ТЗМК, – высокие рабочая температура, прочность, пористость, низкие коэффициенты теплопроводности, теплоемкости, температурного линейного расширения, химическая инертность и др. – сделали возможным его применение в других отраслях промышленности.

Созданный ТЗМК является прекрасным теплоизоляционным материалом, который при футеровке электропечей позволяет экономить до 30–40% потребляемой электроэнергии, снизить массу печей в 3–5 раз, увеличить объем рабочего пространства в 1,5 раза, вдвое уменьшить габариты печей и занимаемую ими площадь соответственно.

Однако материал ТЗМК из кварцевых волокон имеет ограниченное применение: длительно он может эксплуатироваться при температурах не выше 1000°C. Но это лишь стимулировало коллектив к разработке волокна с более высокими эксплуатационными температурами – до 1500–1700°C. В результате уже в период разработки теплозащиты космического корабля «Буран» был получен материал ТЗМК-1700 на основе волокон оксида алюминия [7, 19].

С использованием нового материала по программе «АнтиСПИД» разработано и налажено производство лабораторных микроэлектропечей для стерилизации хирургических инструментов. В Курчатовском институте теплозащитный материал ТЗМК-1700 используется в плазменных технологических устройствах для конверсии природных углеводородов применительно к созданию бортового источника водорода для транспортных средств. В автомобильной промышленности разработанные материалы нашли применение для армирования поршней дизельных двигателей, а также в качестве фильтров очистки выхлопных газов от частиц сажи и в технологии получения лент и вкладышей.

Испытания двигателя автомобиля КАМАЗ показали, что за счет снижения на 25% теплопроводности днища поршня удастся существенно повысить температуру в камере сгорания и, как следствие, мощность двигателя, снизить количество вредных выбросов, уменьшить расход топлива, а также в разы повысить износостойкость кольцевых канавок в поршне.

Эрозионностойкие терморегулирующие покрытия по контракту с французской фирмой «Аэропассьяль» использованы для европейского пилотируемого аппарата «Гермес».

Названные выше материалы и технологии являются лишь вершиной «айсберга» из разработок ВИАМ – в институте разработано порядка 95% материалов, применяемых в авиации. Их отличает, прежде всего, высокий ресурс, стойкость к перегрузкам, высокая усталостная прочность, низкая плотность, высокие удельные характеристики, трещиностойкость, стойкость к термоудару, пожаробезопасность, широкий диапазон температур эксплуатации – от сверхнизких до сверхвысоких.

К настоящему времени практически все мыслимые характеристики «традиционных» материалов находятся на пределе возможного. Поэтому их дальнейшее совершенствование, как и «конструирование» материалов с заранее задан-

ными свойствами, во многом будет зависеть от появления новых «неожиданных» решений – тех самых, что требовал от своих партнеров Глеб Евгеньевич Лозино-Лозинский.

На базе приоритетных направлений и критических технологий развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, в соответствии со стратегией развития государственных корпораций и интегрированных структур, тенденциями развития материалов в мире ВИАМ разработаны «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [20]. В XXI веке создание материалов, технологий и конструкций должно быть полностью взаимосвязано, при этом особое внимание необходимо уделять так называемым «зеленым технологиям» с минимальным воздействием на окружающую среду.

Важнейшая задача повышения весовой эффективности авиационной и космической техники может быть решена внедрением сверхлегких высокопрочных материалов, таких как алюминийлитиевые сплавы и полимерные композиционные материалы. В совокупности с внедрением перспективных технологий соединения, включая сварку в твердой фазе, эти материалы позволят снизить на 20–30% массу конструкций и, следовательно, расход топлива.

В 90-е годы зарубежные исследователи вырвались вперед в области разработки полимерных композиционных материалов, однако проведенные в ВИАМ исследования позволили разработать новое поколение российских связующих [21], обеспечивающих работоспособность при температурах 200–300°C, и композиционные материалы на их основе, по уровню свойств идентичные зарубежным аналогам [22, 23]. Дальнейшие работы в этом направлении будут направлены на создание нового поколения термостойких матриц и наполнителей для угле-, стекло- и органопластиков, повышения стойкости полимерных композиционных материалов к ударным нагрузкам благодаря применению высокодеформативных связующих. Другим актуальнейшим направлением является развитие интеллектуальных материалов с функциями самодиагностики, которые позволяют создавать «умные» конструкции, адаптирующиеся к внешним нагрузкам. Прогноз развития науки и технологий в авиационной промышленности показывает, что XXI век станет веком «умных» материалов.

Для обеспечения создания газотурбинных двигателей пятого поколения в ВИАМ разработаны никелевые жаропрочные монокристаллические сплавы, легированные рением и рутением, с рекордными характеристиками жаропрочности [24, 25], а также уникальная технология высокоградиентной направленной кристаллизации для литья монокристаллических лопаток с транспирационной системой охлаждения [26, 27].

Успешно решена задача комплексной перера-

ботки всех отходов, образующихся при производстве сплавов в металлургическом и литейном производстве. Разработана серийная ресурсосберегающая технология переплава отходов в вакууме, которая позволяет из 100% литейных отходов получать шихтовые заготовки, которые по химическому составу, чистоте и свойствам полностью соответствуют требованиям технических условий на поставку [28].

Ведется разработка естественных композиционных материалов, а также принципиально нового класса материалов – эвтектических композитов на основе ниобия, упрочненного силицидами ниобия, которые позволят повысить рабочую температуру на 150–200°C [29].

Для снижения на 20–30% массы конструкций газотурбинных двигателей активно ведутся работы по созданию жаропрочных материалов на основе интерметаллидов титана для деталей ротора и статора компрессора высокого давления. Уже разработаны интерметаллидные сплавы с рабочей температурой 700–750°C [30].

В ВИАМ разработаны жаропрочные керамические композиционные материалы, работоспособные до температуры 1600°C без охлаждения, на их основе созданы прототипы жаровой трубы [31]. Ведутся работы по разработке нового поколения конструктивных керамических, стеклокерамических монокристаллических и композиционных материалов на основе тугоплавких соединений, обеспечивающих формирование регламентированной структуры, работоспособных до температур 2500°C, стойких к коррозии, с высокой износостойкостью [32, 33].

Реализация материаловедческих задач в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» необходима для перехода России к новому этапу индустриализации и технологическому укладу, создания конкурентоспособных на мировом рынке изделий.

Сегодня развитые страны оценивают свою конкурентоспособность и уровень развития по степени вхождения в шестой технологический уклад, который характеризуется преобладанием биотехнологий, нанотехнологий, геномной инженерии, мембранных и квантовых технологий, фотоники, микромеханики, термоядерной энергетики.

Все эти базовые технологии направлены на создание квантовых компьютеров, искусственно-интеллекта и, как следствие, ориентированы на качественно новый уровень управления государством, обществом, экономикой.

Согласно прогнозам, при сохранении нынешних темпов технико-экономического развития, шестой технологический уклад вступит в фазу распространения в 2010–2020 годы, а в фазу зрелости – в 2040-е годы. При этом в 2020–2025 годах произойдет новая научно-техническая и технологическая революция, основой которой станут

разработки, синтезирующие достижения вышеназванных базовых технологий.

Для подобных прогнозов есть основания. В США, например, доля пятого технологического уклада составляет 60%, четвертого – 20%. И около 5% уже приходится на шестой технологический уклад.

В России, к сожалению, шестой технологический уклад пока не формируется. Доля технологий пятого уклада составляет приблизительно 10% (в военно-промышленном комплексе и в космической промышленности), четвертого – свыше 50%, третьего – около 30%.

Отсюда очевидно: чтобы Россия в течение ближайших 10 лет смогла войти в число стран с шестым технологическим укладом, нам надо, обрздно говоря, перешагнуть через этап – через пятый уклад.

Что же касается исторического события – создания, запуска и автоматической посадки МКС «Энергия–Буран» – оно является поистине национальным проектом, триумфом отечественной науки, техники и промышленности, воплотившем в себе выдающиеся достижения авиакосмической отрасли.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения: Избранные труды. М.: Экономика. 2002. 878 с.
2. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса: Монография. М.: Экономика. 2010. 255 с.
3. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: Сборник научно-информационных материалов. М.: ВИАМ. 2013. 543 с.
4. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. акад. РАН Е.Н. Каблова. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.
5. Грибков В.Н., Исайкин А.С., Щетанов Б.В., Уманцев Э.Л., Мукасеев А.А. Особенности механизма паржидкость–твердая фаза при росте нитевидных кристаллов тугоплавких соединений //Физика и химия обработки материалов. 1973. №3. С. 62–67.
6. Грибков В.Н., Щетанов Б.В., Кондратенко А.В. Непрерывные волокна окиси алюминия: методы получения, свойства и применение в композиционных материалах /В сб.: Композиционные материалы. 1984. С. 66–79.
7. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А. Получение, структура и прочность волокон  $Al_2O_3$  /Труды Международной конф. «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». М. 2003. С. 194–196.
8. Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г. Теплозащитные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 12–19.
9. Солнцев Ст.С. Высокотемпературные композиционные материалы и покрытия на основе стекла и керамики для авиакосмической техники //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 25–33.
10. Муханова Е.Е., Виноградова Л.М., Королев А.Я. Термоокислительная стойкость гидрофобных пленок на стекле /В сб.: Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы. М.: ВИАМ. 1985. №4. С. 74–78.
11. Кондрашов Э.К., Кузьмин В.В., Минаков В.Т., Пономарева Е.А. Нетканые материалы на основе термостойких полимерных волокон и межплиточные уплотнения //Труды ВИАМ. 2013. №7.(электронный журнал).
12. Донской А.А., Баритко Н.В. Кремнийорганические эластомерные теплозащитные материалы низкой плотности //Каучук и резина. 2003. №2. С. 35–41.
13. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Применение клеев и герметиков в изделии «Буран» //Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №1. С. 27–32.
14. Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов: Монография. М. 2003. 671 с.
15. Щетанов Б.В., Каблов Е.Н., Щеглова Т.М. Механизм формирования стабилизированной структуры в высокотермостойких поликристаллических волокнах системы  $Al_2O_3-SiO_2$ , получаемых по золь-гель технологии /В сб. материалов 24-й Международной конф. «Композиционные материалы в промышленности». Ялта. 2004. С. 324–326.
16. Грибков В.Н., Мизюрина Г.Т., Щетанов Б.В., Ляпин В.В. Возможности волокнистой тепловой защиты /Труды первой Международной авиакосмич. конф. «Человек–Земля–Космос». Т. 5. Материалы и технология производства авиакосмических систем. М.: Военная акад. им. Ф.Э. Дзержинского. 1995. С. 223–231.
17. Железина Г.Ф., Зеленина И.В., Орлова Л.Г., Сидорова В.В., Платов П.К. Конструкционные органо-пластики для защиты от ударных и баллистических воздействий //Конверсия в машиностроении. 2008. №2. С. 56–58.
18. Башилов А.С., Осин М.И. Применение наукоемких технологий в авиакосмической технике: Учеб. пособ. М.: МАТИ. 2004. 404 с.
19. Щетанов Б.В., Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю., Соловьева Е.П. Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон  $\alpha-Al_2O_3$  //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 13–17.
20. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
21. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.

22. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. № 4. (электронный журнал).
23. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 2–9.
24. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. (электронный журнал).
25. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
26. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
27. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука. 2006. 632 с.
28. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых заготовок) из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов /В сб.: Труды науч.-технич. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованиемвершенных фундаментальных исследований и НИОКР». Екатеринбург: УроРАН. 2011. Т. 1. С. 31–38.
29. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Ефимочкин И.Ю. Высокотемпературные Nb–Si композиты //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №SP2. С. 164–173.
30. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 196–206.
31. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
32. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 7–11.
33. Солнцев С.С., Гращенков Д.В., Исаева Н.В. Высокотемпературные композиционные материалы для перспективных изделий авиа- и машиностроения //Конверсия в машиностроении. 2004. №4. С. 60–64.