

УДК 536:620.1

А.В. Зуев¹, Ю.В. Лощинин¹, Д.Я. Баринов¹, П.С. Мараховский¹

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595

Описывается опыт использования высокотемпературных покрытий для измерения теплопроводности материалов керамических форм и стержней для литья лопаток ГТД, а также для измерения теплоемкости жаропрочных никелевых и интерметаллидного сплавов (ЖС36, ВЖМ4, ВКНА-25) методом лазерной вспышки. Приводятся результаты измерений теплофизических свойств в диапазоне температур от 20 до 1350°C. Показано влияние состояния твердого раствора и γ' -фазы на свойства сплавов. Проведена оценка использования соотношения закона Видемана–Франца–Лоренца для расчета теплопроводности по результатам измерения электросопротивления.

Приводятся примеры расчета теплопроводности композиционных материалов с использованием разработанных моделей структуры и расчета температурного поля при отверждении полимерных композиционных материалов.

Показана высокая информативность результатов измерений и расчета теплофизических свойств для анализа процессов в материале, для коррекции параметров технологического процесса и для прогнозирования поведения материала в условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках реализации научных направлений 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» и 3. «Компьютерные методы моделирования структуры и свойств материалов при их создании и работе в конструкции» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: тепло- и электрофизические свойства, теплопроводность, электросопротивление, теплоемкость, модель структуры, метод лазерной вспышки.

A.V. Zuev, Yu.V. Loshchinin, D.Y. Barinov, P.S. Marakhovskiy

Computational and experimental investigations of thermophysical properties

This article describes the experience of using of high temperature coatings for thermal conductivity measurements of ceramic molds and cores materials for casting of gas turbine engines (GTE) blades and also to measure specific heat

¹ Федеральное 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

of heat-resistant nickel and intermetallic alloys (ZhS36, VZhM4, VKNA-25) by laser flash method. The results of measurements of their thermophysical properties in the temperature range from 20 to 1350°C are represented. The effect of the state of solid solution and γ' -phase on properties of alloys is shown. The using of the ratio of Wiedemann–Franz–Lorentz law for calculation of the thermal conductivity according to the electrical resistance is estimated.

Examples of the calculation of thermal conductivity of composite materials using the developed models of the structure, which allows calculating the temperature field during the curing of composite materials, are given.

The high informative value of the results of measurements and calculation of thermophysical properties for the analysis of processes in the material, correction of process parameters and prediction of material behavior under operating conditions is shown.

The research is carried out in the framework of research directions 2. «Fundamentally-oriented researches, qualification of materials, nondestructive testing» and the research direction 3. «Computer methods for modeling the structure and properties of materials at their creation and operation in construction» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: *thermo- and electrophysical properties, thermal conductivity, electrical resistivity, specific heat, structure model, laser flash method.*

Введение

Появление в ВИАМ исследований теплофизических свойств было обусловлено бурным развитием в послевоенные годы авиации и ракетостроения. Расширились диапазон рабочих температур и номенклатура необходимых материалов. Началось интенсивное развитие материаловедения. Измерения отдельных теплофизических свойств, в первую очередь теплового расширения, проводились на самодельных установках еще в тридцатые и сороковые годы. Однако увеличение скорости летательных аппаратов и тепловых нагрузок потребовало комплексного изучения всех характеристик этих материалов для обеспечения расчетов конструкций. Изучение процессов, происходящих в материалах, на основании данных об их тепло- и электрофизических характеристиках – как наиболее чувствительных к процессам перестройки структуры и взаимодействиям компонентов – стало еще одним направлением активного использования результатов измерений.

Необходимость развития экспериментальной базы потребовала административных решений, и в 1960 г. по инициативе академика С.Т. Кишкина был организован сектор исследований теплофизических свойств сплавов.

В 1971 г. в лаборатории, руководимой профессором Б.И. Паншиным, был организован сектор теплофизических исследований неметаллических

материалов. Объектами исследования стали клеи, герметики, пластики, керамические формы и стержни для литья, керамические и металлокерамические покрытия, наносимые на детали горячего тракта газотурбинного двигателя, теплоизоляция, в том числе и для орбитального корабля «Буран», углерод-углеродные и углерод-керамические материалы.

В 2004 г. два сектора были объединены в самостоятельную лабораторию «Исследование теплофизических свойств». Для лаборатории приобретено новое оборудование, обеспечивающее измерение всех теплофизических свойств в широком диапазоне температур. Наряду с экспериментальными исследованиями, решением методических задач, все большая роль отводится расчету характеристик. Высокая стоимость образцов для измерений и стоимость экспериментальных установок, необходимость оценки характеристик материалов в условиях эксплуатации по результатам измерений, полученным при эксперименте в стандартных условиях, привели к развитию методов расчета теплофизических свойств, построению моделей теплопереноса, разработке возможных вариантов структуры материалов, обеспечивающих требуемый уровень свойств.

Экспериментальные исследования теплофизических свойств жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов

Для совершенствования технологий литья лопаток и деталей ГТД из жаропрочных сплавов методом направленной кристаллизации с управляемым градиентом температуры необходимо моделирование процесса формирования оптимальной структуры с использованием численных значений комплекса теплофизических свойств [2–5] как самого металла, так и керамических форм и стержней, используемых для литья по выплавляемым моделям. Одним из основных требований получения высокого градиента на фронте кристаллизации при литье лопаток ГТД является повышение теплопроводности керамических форм [6].

В большинстве случаев теплофизические свойства жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) определены до температуры 1000°C [7, 8]. Известны отдельные работы, в которых приводятся результаты измерений теплофизических свойств ограниченного числа сплавов до 1300°C и даже выше температуры плавления [9, 10]. Кроме отсутствия свойств в необходимом температурном интервале, существует неопределенность в их интерпретации [11].

В настоящее время наиболее универсальным и распространенным методом определения теплопроводности является нестационарный метод лазерной вспышки. Однако пористая керамика формы и стержней является полупрозрачной для лазерного импульса, что приводит к значительным

погрешностям при измерении, а при температурах $>800^{\circ}\text{C}$ при использовании стандартной методики [12] – к невозможности получения результата. Измерения же температуропроводности жаропрочных сплавов этим методом не вызывают особенных затруднений и в большинстве случаев выполняются корректно. Вместе с тем измерения теплоемкости при температуре $>1000^{\circ}\text{C}$ методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) выполняются со значительной погрешностью из-за несоблюдения равенства условий теплообмена образца ЖНС и инертного стандартного образца при калибровке, что вызвано окислением и взаимодействием с материалом тигля. Применение метода лазерной вспышки при определенных условиях подготовки образца позволяет получить корректные результаты по теплоемкости ЖНС.

Результаты измерений тепло- и электрофизических свойств

В ходе исследований разработана методика использования высоко-температурного покрытия на образец для метода лазерной вспышки и определены теплофизические свойства материалов керамических форм и стержней для литья жаропрочных сплавов в диапазоне температур от 20 до 1400°C [13]. Измерения теплоемкости материалов керамики

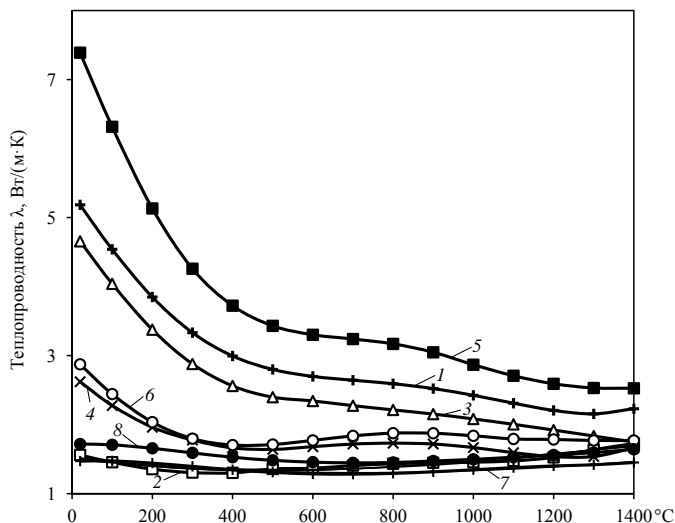


Рис. 1. Теплопроводность материалов отдельных слоев керамических форм (1–6) и стержней (7, 8) в среде воздуха при атмосферном давлении (ВГНК – высокоградиентная направленная кристаллизация):
 1, 2 – лицевые слои (ВГНК и равноосный соответственно);
 3, 5 – наружные слои (ВГНК, равноосные); 4, 6 – промежуточные слои (ВГНК, равноосные)

выполнены на дифференциальном сканирующем калориметре в среде гелия в платиновых тиглях до температур 1500°C.

Анализ результатов определения теплопроводности керамики литейных форм и стержней (рис. 1) подтверждает превалирующий фононный механизм теплопередачи при температурах <800°C.

В работе измерены теплофизические свойства жаропрочных никелевых сплавов и интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al с монокристаллической структурой (см. таблицу).

Характеристики жаропрочных никелевых и интерметаллидного сплавов

Сплав	Содержание основных легирующих добавок, % (по массе)					Содержание γ'-фазы, %	КГО*	Состояние	Плотность, кг/м ³
	Al	Re	Mo	Ru	Другие				
ЖС36 [14]	5,8	2,0	1,6	–	4Cr; 7Co; 11W	65	МОНО <001>	ТО**	8720
ВЖМ4 [14]	6	6,5	4,0	4,0	Cr; Co; Ta	60	МОНО <001>	ТО	8965
Интерметаллидный ВКНА-25 [15]	8,4	1,4	3,8	–	4,6Cr; 5Co; 2,1W	85	МОНО <111>	Литое	8105
CMSX-10 [14]	5,7	6,0	0,4	–	2Cr; 3Co; 8Ta; 5W	70	МОНО <001>	ТО	9050

* Кристаллографическая ориентация.

** После термообработки.

Из анализа результатов измерений температуропроводности сплавов следует одинаковый характер изменения ее температурной зависимости (рис. 2), обусловленный как фазовой стабильностью состояния сплава, так и ее нарушением, вызванным процессами растворения упрочняющей интерметаллидной γ'-фазы на основе Ni₃Al при нагреве >800°C. Следует отметить более высокие абсолютные значения температуропроводности интерметаллидного сплава ВКНА-25 по сравнению с дисперсионно-упрочняемыми сплавами ЖС36, ВЖМ4 и CMSX-10, что связано, по-видимому, с более высоким содержанием алюминия (см. таблицу).

Для определения удельной теплоемкости жаропрочных никелевых сплавов методом лазерной вспышки при температурах от 20 до 1350°C использовано силикатное эмалевое покрытие [16], предназначенное для защиты изделий из жаропрочных сплавов при термообработке. Покрытие характеризуется высоким и стабильным значением излучательной способности (0,8–0,9) при температурах от 20 до 1300°C.

Из результатов измерений следует, что удельная теплоемкость сплавов ЖС36, ВЖМ4 и сплава ВКНА-25 в диапазоне температур от 20 до 1350°C (рис. 3) характеризуется схожими температурными зависимостями. Наблюдаются изменения, характеризующиеся значительным эндотермическим эффектом в диапазоне температур растворения γ'-фазы

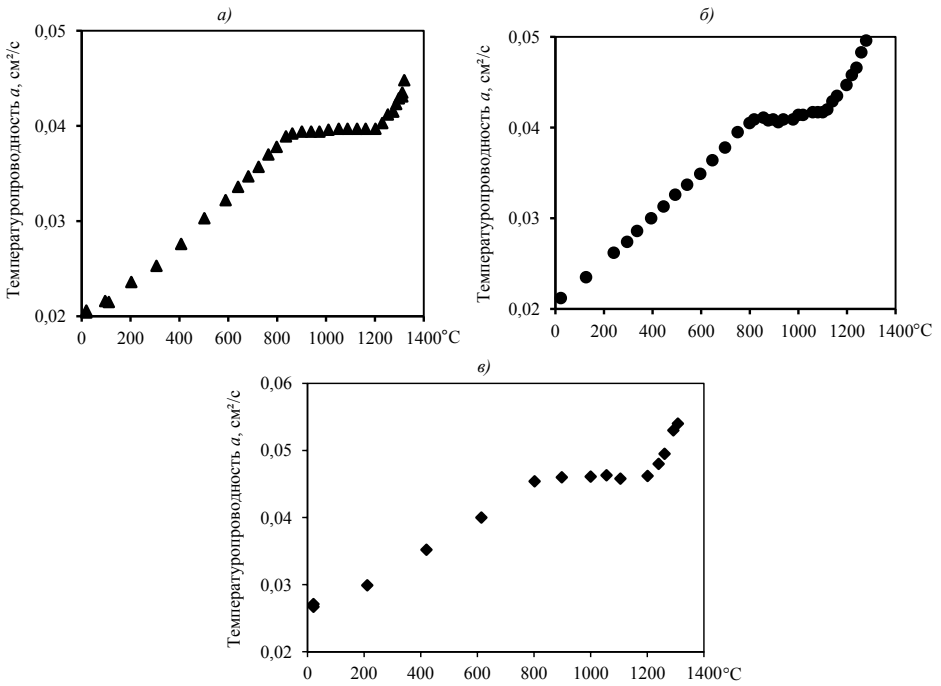


Рис. 2. Изменение температуропроводности сплавов ЖС36 <001> (а), ВЖМ4 <001> (б) и ВКНА-25 <111> (в), термообработанных при нагреве от 20 до 1350°С в среде аргона

~(820–1290)°С — для сплава ВЖМ4 и ~(820–1250)°С — для сплавов ЖС36 и ВКНА-25. Конечная температура диапазона определяет температуру полного растворения γ' -фазы.

При анализе температурной зависимости теплоемкости следует различать изменения кажущейся теплоемкости, связанные с изменением состояния γ -твердого раствора и образования зон ближнего порядка (К-состояние) (рис. 4), которое имеет место в диапазоне температур от 400 до 750°С, и изменения кажущейся теплоемкости в диапазоне температур растворения γ' -фазы — от ~800°С до температуры полного растворения γ' -фазы $T_{п.р\gamma'}$. Увеличение теплоемкости при изменении степени ближнего порядка γ -твердого раствора >650°С трактуют иногда как начало растворения γ' -фазы [11].

Значения теплоемкости от температур начала растворения до температуры полного растворения без учета теплового эффекта растворения γ' -фазы хорошо описываются линейной зависимостью, представляющей температурную зависимость истинной удельной теплоемкости от 20 до 1350°С (рис. 3). Температурная зависимость истинной удельной теплоемкости

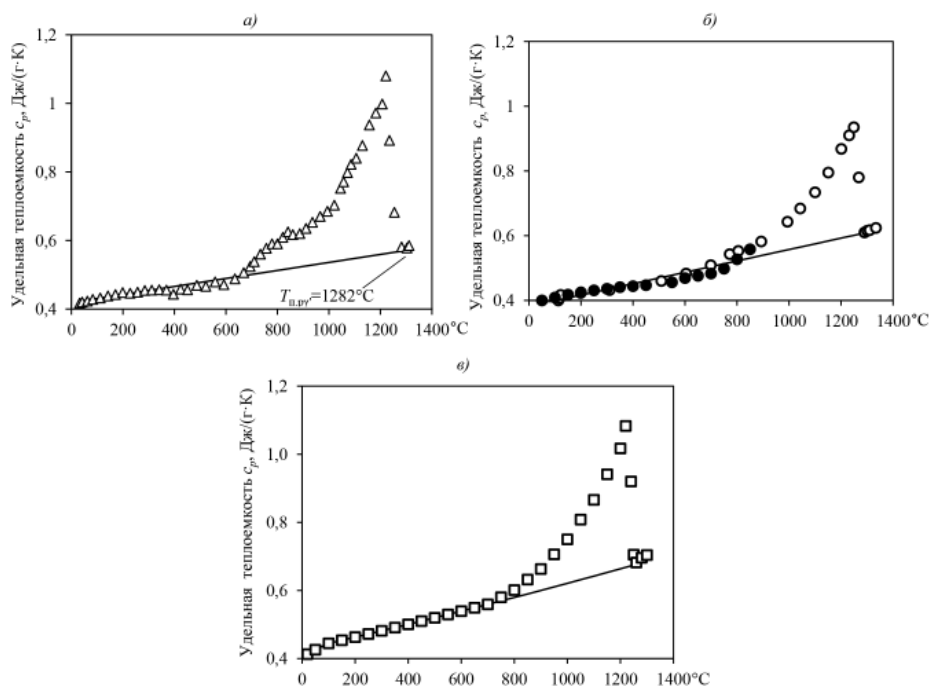


Рис. 3. Изменение удельной теплоемкости сплавов ЖС36 (а), ВЖМ4 (б) и ВКНА-25 (в) при нагреве от 20 до 1350°C в среде аргона (— истинная теплоемкость; Δ , \square — кажущаяся теплоемкость; \circ — лазерная вспышка; \bullet — адиабатический калориметр)

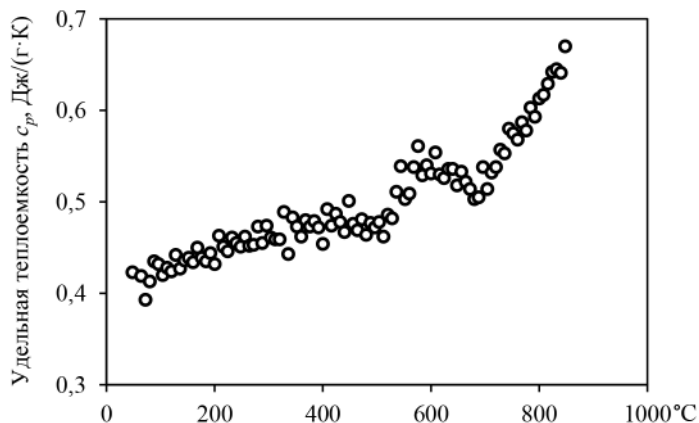


Рис. 4. Изменение удельной теплоемкости сплава ЭИ617 в состоянии после стандартной термообработки при нагреве со скоростью 4 К/мин в адиабатическом калориметре

используется при расчете теплопроводности сплавов ЖС36, ВЖМ4 и ВКНА-25 в диапазоне температур от 20 до 1350°С.

Для сплава ВЖМ4 приведены также результаты измерений теплоемкости методом адиабатического калориметра (рис. 3, б) с погрешностью не более 3%. Максимальное отклонение при сравнении результатов измерений разными методами не превышает погрешности измерений.

Температурные зависимости истинных значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) сплавов (рис. 5) характеризуются такими же температурными зависимостями, что и удельная теплоемкость c_p . Следует отметить, что средние значения ТКЛР для сплава ВЖМ4 <001^p> заметно ниже, чем значения ТКЛР для сплавов ЖС36 <001> и ВКНА-25 (рис. 5, а), что объясняется более сильными межатомными связями как у самой γ' -фазы, так и на межфазных границах γ/γ' . Ранее замечено, что значения ТКЛР гетерогенного сплава, содержащего интерметаллидную упорядоченную γ' -фазу, ниже, чем у сплава на основе γ -фазы [17, 18], причем эта разница увеличивается с увеличением содержания алюминия. Подобная тенденция наблюдается при сравнении теплоемкости сплавов с различным содержанием γ' -фазы. Причем уменьшение теплоемкости с увеличением количества γ' -фазы происходит не благодаря легированию сплава тяжелыми тугоплавкими элементами, а вследствие усиления межатомного взаимодействия в γ' -фазе [19].

Теплопроводность сплавов и ее изменение при нагреве в диапазоне температур от 20 до 1350°С (рис. 6) определили по выражению (1), используя результаты измерений температуропроводности и удельной теплоемкости. Плотность сплавов при нагреве до 1350°С (рис. 7) рассчитывали по значениям плотности при 20°С и измеренным значениям ТКЛР.

Для оценки соответствия между теплопроводностью и электропроводностью, выражаемого правилом Видемана–Франца–Лоренца

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L_0 \cdot T, \quad (1)$$

где L_0 – число Лоренца, Вт·Ом·К⁻²; T – температура, К; $\sigma=1/\rho$ – удельная электрическая проводимость, Ом⁻¹·м⁻¹; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Выполнены измерения удельного электрического сопротивления при нагреве в диапазоне температур от 20 до 1350°С (рис. 8). Удельное электрическое сопротивление γ' -фазы выше чем у γ -фазы [20]. Причем чем выше содержание γ' -фазы (или алюминия) в сплаве, тем выше электрическое сопротивление. Уменьшение удельного электрического сопротивления ЖНС с увеличением температуры >900°С связано с уменьшением объемного содержания γ' -фазы [21].

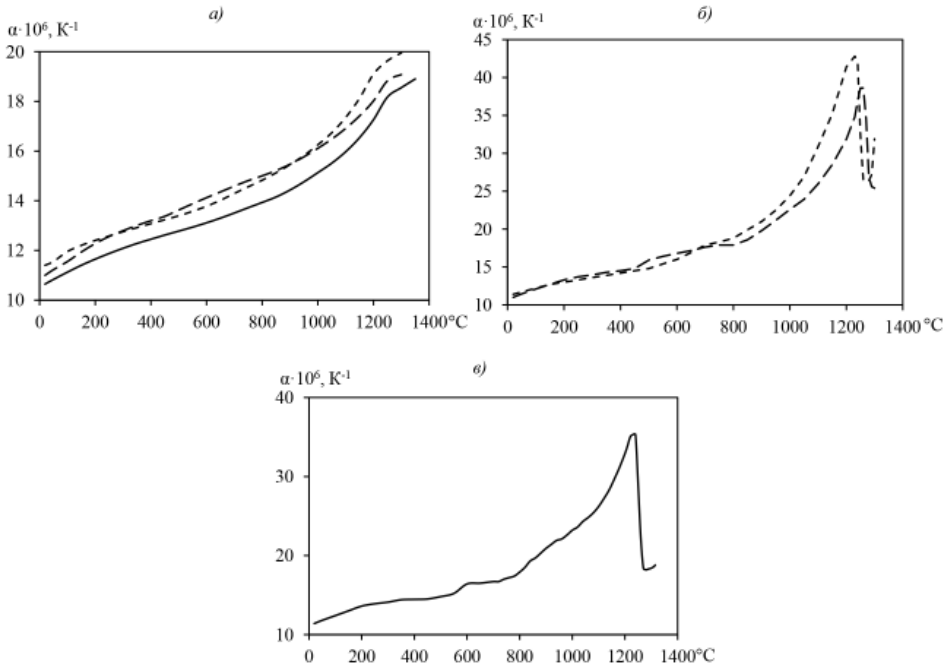


Рис. 5. Средние (а) и истинные значения (б, в) температурного коэффициента линейного расширения (α) для сплавов ЖС36 <001> (---), ВЖМ4 <001> (—) и ВКНА-25 <111> (- - -), термообработанных при нагреве со скоростью 5 К/мин в среде аргона

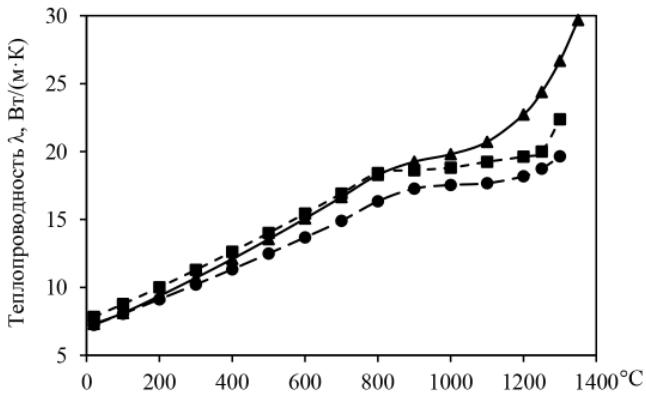


Рис. 6. Теплопроводность сплавов ЖС36 <001> (---), ВЖМ4 <001> (—) и ВКНА-25 <111> (- - -) после термообработки

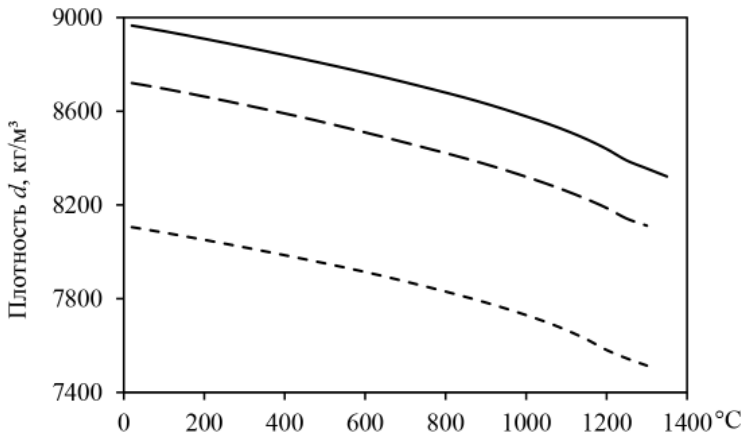


Рис. 7. Изменение плотности сплавов ЖС36 <001> (---), ВЖМ4 <001> (—) и ВКНА-25 <111> (- - -) при нагреве в диапазоне температур от 20 до 1350°C

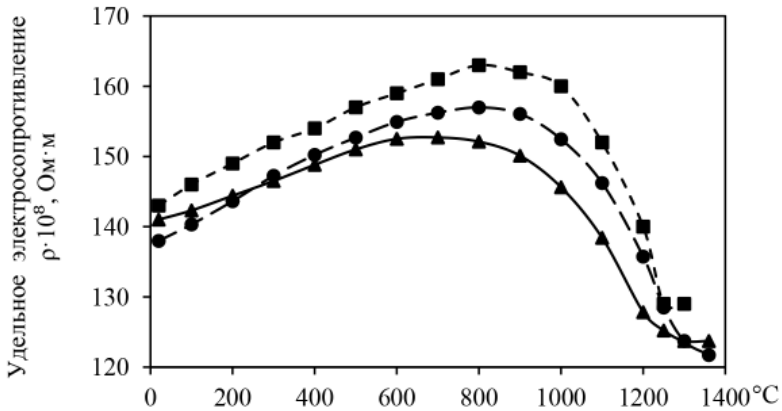


Рис. 8. Удельное электрическое сопротивление сплавов ЖС36 <001> (---), ВЖМ4 <001> (—) и ВКНА-25 <111> (- - -)

Величина числа Лоренца L_0 определяется соотношением

$$L_0 = \frac{\lambda \cdot \rho}{T} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e^2}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона, и равняется $L_0 = 2,445 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{Ом} \cdot \text{К}^{-2}$.

Температурные зависимости числа Лоренца, рассчитанного по выражению (1), для сплавов по измеренным характеристикам теплопроводности и электрического сопротивления представлены на рис. 9. Температурная зависимость средних значений для сплавов ЖС36, ВЖМ4 и ВКНА-25 описана математическим выражением

$$L \cdot 10^8 = 3,72 - 6,63 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,56 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1,54 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 4,98 \cdot 10^{-12} \cdot T^4. \quad (3)$$

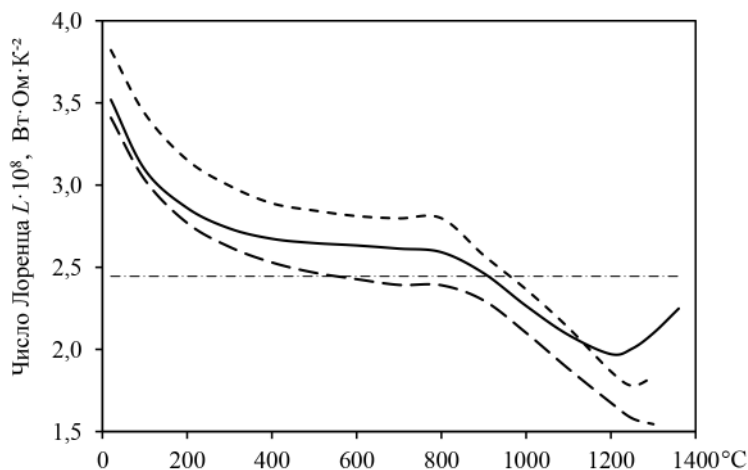


Рис. 9. Температурная зависимость числа Лоренца для сплавов ЖС36 <001> (---), ВЖМ4 <001> (—) и ВКНА-25 <111> (- · - · -); — · — · — теоретическое число, равное 2,445

Полученное выражение применимо в диапазоне температур от 20 до 1300°C. Максимальное отклонение экспериментальных значений числа Лоренца исследованных сплавов от усредненной зависимости (3) не превышает 10%.

С использованием найденной эмпирической зависимости числа Лоренца от температуры (3) и известного удельного электрического сопротивления в диапазоне температур от 20 до 1320°C сплава CMSX-10 [17] по выражению (1) рассчитаны значения его теплопроводности.

Из проведенного сопоставления рассчитанной теплопроводности сплава CMSX-10 с опубликованными результатами измерений (рис. 10) [7] следует, что максимальное отклонение не превышает 10%. Таким образом, эмпирическая зависимость числа Лоренца (3) может быть применена для оценки теплопроводности жаропрочных (γ/γ')-сплавов и интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al в диапазоне температур от 20 до 1300°C с погрешностью не более 10%. При этом следует учитывать, что погрешность измерений теплопроводности — от 7 до 8%, а погрешность

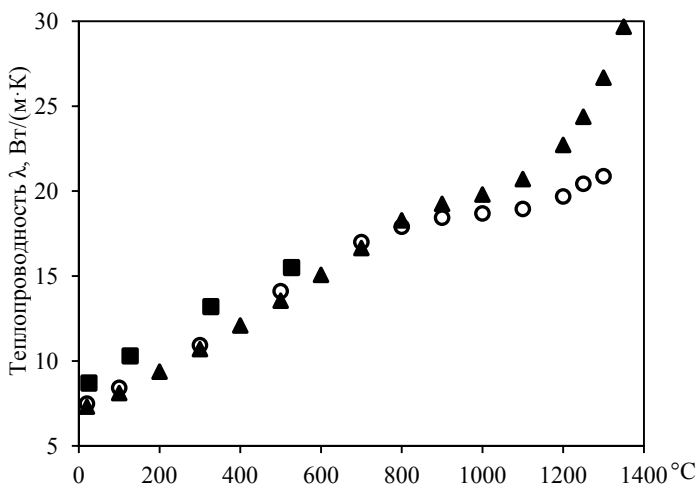


Рис. 10. Сопоставление экспериментальных (■) и расчетных значений (○) теплопроводности сплава CMSX-10 после термообработки в сравнении с экспериментальными значениями для сплава ВЖМ4 (▲)

измерений удельного электрического сопротивления — от 1 до 1,5%, однако трудоемкость при определении теплопроводности намного выше, чем при измерении электросопротивления.

Расчет теплопроводности

При разработке новых материалов, обладающих уникальными свойствами, задача выбора возможных компонентов, особенностей структуры, а также сокращения времени и, соответственно, стоимости всей работы может решаться с использованием методов расчета и прогнозирования свойств. По этой причине в Стратегических направлениях развития института отдельно выделена разработка физических моделей процессов в композиционных материалах и математических моделей для получения численных результатов. Именно расчет теплового процесса и одной из его основных характеристик — теплопроводности, имеет универсальное значение, поскольку все процессы сопровождаются выделением или поглощением тепла.

Решение задач, связанных с анализом влияния структуры и свойств компонентов на характеристики материала, возможно с помощью так называемой теории обобщенной проводимости, в основе которой лежит построение модели структуры и расчет теплопереноса в ней [22–24]. Для анализа работоспособности композита в реальных температурно-временных условиях надежно зарекомендовала себя теория обратных задач теплообмена [25]. Особенности ее применения заключаются в том, что ее

математический аппарат позволяет использовать более строгие модели тепло- и массопереноса.

Рассмотрим несколько конкретных примеров. Универсальность методов расчета иллюстрируют выбранные примеры для материалов, относящихся к разным классам.

Материал керамической формы для литья жаропрочных сплавов

Материал стандартной керамической формы, применяемой при литье жаропрочных сплавов, представляет собой полидисперсную зернистую систему со связующим. Модель структуры должна учитывать не только размеры, свойства и распределение частиц, но и процессы, происходящие в материале, что позволяет рассчитывать изменение теплопроводности материала для разных температурно-временных режимов.

При нагревании в материале формы происходят процессы: спекания, диффузионного взаимодействия с образованием твердого раствора и фазовые превращения в связующем. Структура материала формы, прошедшего только предварительную термообработку при температуре ниже температуры заливки расплава, даже нагретого потом до максимальной температуры в эксперименте, не будет соответствовать ее структуре в рабочих условиях, при остывании отливки в форме. Это объясняется тем, что время выдержки в печи в экспериментальной установке не соответствует реальным температурно-временным условиям подготовки горячей формы к заливке сплава в печи.

В результате неизбежны ошибки при расчете условий остывания слитка по измеренным значениям теплопроводности. При решении задачи можно, конечно, нагревать образцы для измерения теплопроводности и выдерживать их в печи часами, как этого требует технология подготовки формы для заливки. Но это дорого и долго. Другой путь – применение расчетных методов.

На рис. 11 показано сопоставление результатов измерений и расчета теплопроводности формы с порошками электрокорунда после разных термообработок – от 950 до 1620°С. Видно, что результаты расчета близки к экспериментальным данным, т. е. выбранные физические модели процессов разработаны в принципе правильно и отражают по крайней мере основные особенности материала.

Кроме оценки изменения теплопроводности от температуры и времени термообработки, расчет позволяет определить, почему происходят именно такие изменения в свойствах материала.

На рассмотренном примере для материала керамической формы показана возможность прогнозирования его эффективной теплопроводности в соответствии с температурно-временной предысторией, выбранной по заданным технологическим режимам литья.

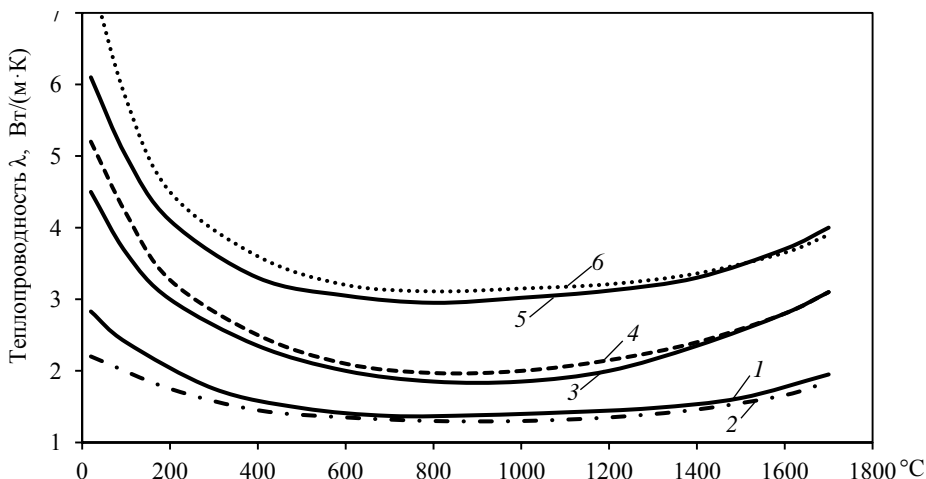


Рис. 11. Сравнение результатов измерений и расчета теплопроводности керамики литейной формы из Al_2O_3 в вакууме при давлении 10^{-2} Па:

- 1, 2 – температура термообработки $950^\circ C$ в течение 4 ч;
 3, 4 – экспериментальная и расчетная температура термообработки $1350^\circ C$ в течение 4 ч; 5, 6 – температура термообработки $1620^\circ C$ в течение 4 ч;
 1, 3, 5 – эксперимент; 2, 4, 6 – расчет

Волокнистый теплоизоляционный материал

В качестве второго примера выбран полупрозрачный для теплового излучения волокнистый высокопористый материал со связующим, работающий в широком интервале температур. Материал волокон и связующего – аморфный оксид кремния. Такие материалы использовались в качестве элемента внешней тепловой защиты аппарата «Буран». Основная особенность теплопереноса в таких структурах заключается в том, что материал из-за высокой пористости полупрозрачен для теплового излучения. Это создает проблемы при измерениях из-за отличия показаний термопары от температуры материала вокруг нее, что объясняется их существенно различными оптическими свойствами. Из-за сложности описания радиационно-кондуктивного теплопереноса в таких системах простой математический аппарат теории обобщенной проводимости позволяет отразить лишь в общих чертах тенденцию роста эффективной теплопроводности с ростом температуры (рис. 12). Однако, как и в других случаях, применение моделей структуры и теплопереноса позволяет понять влияние характеристик волокон на теплопроводность материала.

Применение расчета эффективной теплопроводности с использованием теории обратных задач позволяет не только более корректно рассчитать теплоперенос в стационарных тепловых условиях, но и,

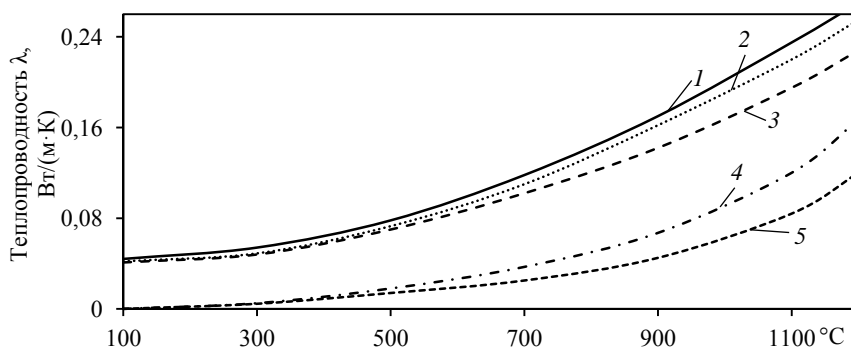


Рис. 12. Зависимость эффективной теплопроводности материала ТЗМК-10 от температуры на воздухе при нормальном давлении [26, 27]:
 1 — эксперимент при стационарном температурном режиме;
 2, 3 — расчет с помощью обратных задач и теории обобщенной проводимости соответственно; 4, 5 — расчет вклада в эффективную теплопроводность излучения с помощью обратных задач и теории обобщенной проводимости соответственно

в отличие от теории обобщенной проводимости, описать его в нестационарных температурно-временных режимах любой сложности. [26, 27].

Радиационная составляющая теплопроводности высокопористого волокнистого материала в стационарном режиме может отличаться от значений, полученных при скоростях нагревания, характерных для полета аппарата «Буран» со скоростью нагревания ~ 300 К/с, в несколько раз (рис. 13) [28–30]. По этой причине использование напрямую результатов измерений, полученных в стационарном режиме, для расчета толщины и массы внешней тепловой защиты приведет к значительному увеличению стоимости вывода на орбиту одного килограмма полезного груза, поскольку общее число плиток с высокопористой волокнистой теплоизоляцией на борту аппарата «Буран» составляет 37500 шт. [31].

Особенные сложности возникают при описании теплопереноса при высоких температурах в тонких слоях таких материалов между экранами. Решение такой задачи позволит получить математический аппарат для обработки экспериментальных данных [32, 34] по измерению теплопроводности полупрозрачных для теплового излучения высокопористых материалов при температурах $>2000^\circ\text{C}$, что весьма актуально [32]. Решение задачи радиационно-кондуктивного теплопереноса в тонких слоях позволит использовать импульсный метод измерения теплофизических свойств для изучения высокопористых материалов до максимально возможных температур на стандартных серийно выпускаемых экспериментальных установках.

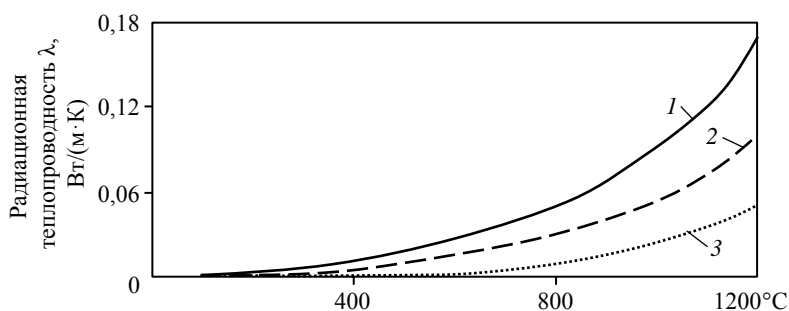


Рис. 13. Зависимость радиационной составляющей теплопроводности материала ТЗМК-10 от температуры при скоростях нагрева: 0 (1), 3 (2) и 300 К/с (3) [28, 31]

Стеклопластик

Все большее распространение в связи с уникальными свойствами получают полимерные композиционные материалы на эпоксидных связующих. В процессе отверждения стеклопластика происходят экзотермические процессы, которые искажают оптимальный температурный режим получения композита. Особенно это проявляется при отверждении толстостенных изделий или деталей переменного сечения [35, 36]. В таких случаях внутри детали возникает перегрев, возможна даже деструкция полимерного связующего. В результате в изделии увеличенной толщины невозможно реализовать характеристики материала, достигнутые разработчиками на тонких пластинах.

Для расчета температурных полей при отверждении стеклопластика предложена физическая модель происходящих процессов и математическая модель для получения численных результатов [37]. Проведен расчет температурных полей, возникающих в плите стеклопластика толщиной 20 мм на основе клевого эпоксидного связующего и стеклянной ткани марки Т-10 при его отверждении в прессе. Получены значения температуры перегревов срединных слоев по отношению к поверхностному слою для половины толщины плиты стеклопластика, равной 10 мм, при условии, что температурное поле симметрично относительно центрального сечения плиты (рис. 14). Установлено влияние величины перегрева слоев на механические характеристики.

Заключения

Разработана методика использования высокотемпературного силикатного покрытия, нанесенного на образцы, при измерениях теплопроводности керамических материалов для форм и стержней для литья лопаток ГТД, а также теплоемкости ЖНС до температуры 1350°C.

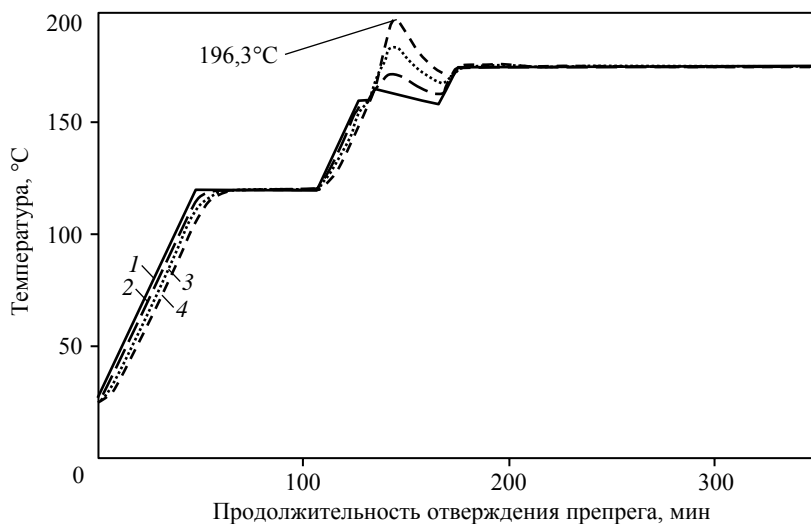


Рис. 14. Распределение температуры по толщине плиты стеклопластика в зависимости от продолжительности отверждения препрега на внешней поверхности (1) и на расстоянии 2 (2), 4 (3) и 6 мм (4) от поверхности

Показано существенное влияние на теплофизические свойства изменения структуры и внутрифазовых изменений при нагреве сплавов ЖНС в диапазоне температуры от 600 до 1300°C.

Показана возможность использования соотношения закона Видемана—Франца—Лоренца и полученной эмпирической зависимости числа Лоренца от температуры в диапазоне от 20 до 1300°C для расчета теплопроводности сплавов ЖНС по данным электрического сопротивления.

На примере существенно отличающихся по структуре, плотности, теплопроводности и условиям эксплуатации материалов керамических форм для точного литья жаропрочных сплавов, высокопористой волокнистой теплоизоляции и стеклопластика показаны области применения, универсальность и результативность использования расчетных методов, высокоинформативных для задач материаловедения, при организации эксперимента или расчета и, соответственно, получение надежного результата. Необходимо также учитывать особенности получения и эксплуатации материала.

Применение расчетных методов позволяет сократить объем, продолжительность и стоимость экспериментальных исследований, определить, каким образом надо изменить структуру композита, чтобы повысить его эксплуатационные качества.

Сочетание результатов расчета различных физических свойств позво-

ляет проводить комплексные исследования и прогнозирование структуры, технологии получения и характеристик композиционного материала.

Следующим этапом развития расчетных методов может стать разработка методов проектирования материала под задачи, формулируемые заказчиком. При этом, видимо, должно проводиться ранжирование важности тех или иных характеристик будущего материала, чтобы определить, какие свойства в большей степени обеспечивают выполнение технического задания. С установленной «весовой» функцией важности каждого свойства должно происходить планирование основных требований к структуре и свойствам компонентов.

Отдельные результаты работы получены при поддержке РФФИ (грант №13-08-12154_офи-м).

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 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2016).
3. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 105–117.
4. 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.
5. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.
6. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Сулова В.А. Особенности высокоградиентной направленной кристаллизации и оборудование для литья монокристаллических образцов и турбинных лопаток из жаропрочных сплавов, содержащих рений // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-технич. сб. М.: Наука, 2006. С. 194–205.

7. Mills K.C., Youssef Y.M., Zushu Li. The effect of aluminium content on thermophysical properties of Ni-based superalloys // *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. No. 1. P. 50–57.
8. Ousted P.N., Brooks R.F., Chapman L., Morrell R., Youssef Y., Mills K.C. Measurement and estimation of thermophysical properties of nickel based superalloys // *Materials and Technology*. 2009. Vol. 25. No. 2. P. 154–162.
9. Wilthan B., Preis K., Tanzer R., Schützenhüfer W., Pottlacher G. Thermophysical properties of the Ni-based alloy Nimonic 80A up to 2400 K, II // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 452. P. 102–104.
10. Hazotte A., Perrot B., Archambault P. High temperature thermal diffusivity of nickel-based superalloys and intermetallic compounds // *Journal de Physique IV*. 1993. Vol. 3. No. 11. P. 351–354.
11. Чеховской В.Я., Пелецкий В.Е. Теплофизические свойства жаропрочного никелевого сплава ХН55ВМТКЮ // *Теплофизика высоких температур*. 2005. Т. 43. №1. С. 51–56.
12. ASTM E 1461-01. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. 2001. P. 1–13.
13. Лощинин Ю.В., Фоломейкин Ю.И., Рыкова Т.П., Мараховский П.С., Пахомкин С.И. Теплофизические свойства материалов керамики форм и стержней для литья лопаток ГТД из жаропрочных сплавов // *Материаловедение*. 2014. №3 (204). С. 47–52.
14. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-технич. сб.* М.: Наука, 2006. С. 56–78.
15. Базылева О.А., Унчикова М.В., Туренко Е.Ю., Багетов В.В., Шестаков А.В. Исследование влияния термической обработки на микроструктуру, параметры дендритной ликвации и время до разрушения интерметаллидного ренийсодержащего сплава на основе Ni₃Al // *Труды ВИАМ: электр. науч.-технич. журн.* 2016. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam.ru> (дата обращения: 02.11.2016) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-4-4.
16. Лощинин Ю.В., Фоломейкин Ю.И., Пахомкин С.И. Измерение теплоемкости образцов с покрытием методом лазерной вспышки // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81. №9. С. 40–44.
17. Рябцев Л.А., Корнилов И.И., Пряхина Л.И. Жаропрочность и физико-химические свойства многокомпонентных никелевых сплавов // *Структура и свойства жаропрочных металлических материалов*. М.: Наука, 1967. 143 с.
18. Ковалев А.И., Логунов А.В., Хацинская И.М., Зверев А.Ф. Теплофизические свойства жаропрочных никелевых сплавов //

- Теплофизические и электрические свойства металлов и сплавов: сб. статей. М.: ВИАМ, 1973. 13 с.
19. Kovalev A.I., Bronfin M.B., Loshchinin Yu.V., Vertogradskii V.A. Heat capacity of the Ni₃Al intermetallide and its change upon alloying with refractory transition metals // High Temperatures – High Pressures. 1976. Vol. 8. P. 581–584.
 20. Логунов А.В., Петрушин Н.В., Хацинская И.М. Температуры растворения упрочняющих интерметаллидных фаз в жаропрочных никелевых сплавах // Металловедение и термическая обработка металлов. 1977. №6. С. 67–68.
 21. Epishin A.I., Svetlov I.L., Petrushin N.V., Loshchinin Yu.V., Link T. Segregation in Single-Crystal Nickel-Base Superalloys // Trans. Tech Publications. Switzerland, 2011. P. 121–125.
 22. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962, 456 с.
 23. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справочная книга. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
 24. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 248 с.
 25. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
 26. Зуев А.В., Просунцов П.В., Майорова И.А. Расчетно-экспериментальное исследование процессов теплопереноса в высокопористых волокнистых теплоизоляционных материалах // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. №9. С. 410–419.
 27. Зуев А.В., Просунцов П.В. Модель структуры волокнистых теплоизоляционных материалов для анализа процессов комбинированного теплопереноса // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. №6. С. 1319–1329.
 28. Резник С.В., Просунцов П.В., Зуев А.В. Особенности применения обратных задач для определения теплопередачи в высокопористых материалах при высоких скоростях нагревания // Обратные задачи, проектирование и оптимизация: тр. II Междунар. симпозиума. США, 2007. С. 657–665.
 29. Просунцов П.В., Резник С.В. Использование данных по коэффициенту теплопроводности полупрозрачных рассеивающих материалов в тепловых расчетах // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. М.: МАТИ им. К.Э. Циолковского, 1990. С. 17.
 30. Prosuntsov P.V. Parametric Identification of Thermophysical Properties of Highly Porous Partially Transparent Materials Based on the Solution of a

- Two-Dimensional Problem of Radiative-Conductive Heat Transfer // Heat Transfer Research. 2005. No. 6. P. 481–500.
31. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
 32. Просунцов П.В., Зуев А.В. Применение метода лазерной вспышки для комплексной параметрической идентификации теплофизических и оптических свойств частично прозрачных материалов // 6-ой Минский международный форум по тепломассообмену. Минск, 2008. С. 379–381.
 33. Просунцов П.В., Майорова И.А., Зуев А.В. Использование моделей комбинированного теплопереноса для анализа температурного состояния элементов тепловой защиты многоразовых космических аппаратов // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. №7. С. 317–323.
 34. Майорова И.А. Просунцов П.В., Зуев А.В. Оптимальное тепловое проектирование мультиэкранной системы тепловой защиты многоразовых космических аппаратов // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. №2. С. 1–6.
 35. Дмитриев О.С., Мищенко С.В., Шаповалов А.В., Кириллов В.Н. Математическое моделирование процесса отверждения изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумного автоклавного формования в технологическом пакете // Вестник ТГТУ. 2001. Т. 7. №1. С. 7–19.
 36. Дмитриев О.С., Кириллов В.Н., Кавун Н.С., Зуев А.В. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов // Тепловые процессы в технике. 2013. №10. С. 467–475.
 37. Баринов Д.Я., Майорова И.А., Мараховский П.С., Зуев А.В., Куцевич К.Е., Лукина Н.Ф. Математическое моделирование температурных полей при отверждении толстостенной плиты стеклопластика // Перспективные материалы. 2015. №4. С. 5–14.