

УДК 004.9:669.018.44

Ю.И. Димитриенко¹, А.Н. Луценко², Е.А. Губарева¹, Е.И. Орешко²,
С.В. Сборщиков¹, О.А. Базылева², Е.Ю. Туренко²

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ПО СВОЙСТВАМ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ И РАСЧЕТА ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-86-94

Разработанная интегрированная информационная система (ИИС) авиационных материалов включает базу данных по жаропрочным никелевым, титановым и алюминиевым сплавам, которая будет использоваться для накопления и хранения данных по авиационным материалам, а также расчетный модуль, используемый при создании новых материалов. С помощью ИИС можно прогнозировать механические характеристики моделируемых сплавов в зависимости от их фазового состава.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 3.1. «Компьютерное конструирование и моделирование композиций литейных и деформируемых сплавов и сталей, включая естественные композиты и интерметаллиды, процессов их изготовления и переработки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: микроструктура, интерметаллиды, монокристаллические сплавы, численное моделирование, метод асимптотического осреднения, метод конечного элемента, пластичность, повреждаемость, диаграммы деформирования.

The developed integrated information system (IIS) of aviation materials includes a database on heat resistant nickel, titanium and aluminum alloys which will be used for accumulation and data storage on aviation materials and also the calculation module using in creation of new materials, predicting mechanical characteristics of simulated alloys depending on their phase structure.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 3.1. «Computer designing and modeling of compositions of cast and wrought alloys and steels, including natural composites and intermetallic compounds, technologies of their manufacturing and processing» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: microstructure, intermetallic compound, single-crystal alloys, computational modeling, asymptotic homogenization method, finite element method, elasticity, plasticity, damageability, deformation diagram.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University]; e-mail: bauman@bmstu.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Существующие методы поиска состава авиационных материалов с требуемыми свойствами, основанные на эмпирическом опыте, являются трудоемкими и включают многократные выплавки опытных образцов с последующим испытанием их на механические свойства и математическую обработку результатов [1–4]. Из-за сложного характера изменения свойств материала в зависимости от фазового состава, режимов термической обработки и условий испытаний подобрать адекватную математическую зависимость между составом и свойствами материала достаточно сложно, а иногда и невозможно. Вследствие этого наиболее перспективные сплавы могут оказаться за пределами исследовательских возможностей.

Зачастую в выборе нужных сплавов приходится руководствоваться чутьем исследователя, при этом могут затрачиваться значительные финансовые ресурсы на приобретение исходных дефицитных материалов, дорогостоящее оборудование и проведение большого числа плавов и тестовых испытаний. Эти затраты могут не окупаться результатами поиска, поглощая большие материальные и временные ресурсы [5]. Решение задач экспериментального поиска оптимальных рецептур сплавов может быть эффективно заменено использованием информационно-вычислительных технологий, которые уменьшают сроки создания новых жаропрочных сплавов с заданными свойствами, ускоряя поиск и выбор материалов, необходимых для разработки новых образцов авиационной техники.

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» накоплено достаточно большое количество данных по свойствам жаропрочных сплавов, в связи с чем существует необходимость в сборе, систематизации и формализации этих данных в единой информационной системе, обеспечивающей «прозрачный» доступ к информации по свойствам и характеристикам авиационных материалов, для повышения эффективности использования этих данных и прогнозирования (расчета) механических свойств новых материалов. Такая интегрированная информационная система (ИИС) позволит уменьшить расходы на поиск и создание материалов, обладающих необходимыми свойствами, для применения в гражданской и военной авиации.

Основные задачи данной работы – сбор и формализация имеющихся данных по свойствам и характеристикам жаропрочных сплавов для базы данных ИИС авиационных материалов, построение математических моделей зависимостей «фазовый состав–механические свойства» жаропрочных интерметаллидных сплавов на основе никеля и физико-химических процессов, происходящих при их изготовлении; разработка макета ИИС хранения и обработки данных по свойствам авиационных материалов с возможностью прогнозирования (расчета) свойств жаропрочных сплавов и руководства пользователя ИИС.

Материалы и методы

Объектом исследования были характеристики и свойства авиационных материалов (жаропрочных никелевых, титановых и алюминиевых сплавов), анализ их условий эксплуатации и технологии получения: физико-механические свойства (данные из паспорта, справочника, ТУ и расчетные значения), структурные особенности (данные из атласа), фазовый состав и т. д.

Для построения математических моделей «фазовый состав–механические свойства» выбран интерметаллидный сплав на основе системы Ni_3Al –ВКНА-1В следующего химического состава, % (по массе): 5,5 Cr; 8,5 Al; 1,1 Ti; 3,3 W; 3,5 Mo; 0,02 Zr; Ni – основа.

Прутковые (шихтовые) заготовки выплавляли вакуумным индукционным (ВИ) методом, мерные шихтовые заготовки переплавляли методом ВГНК на установках типа УВНС, что обеспечивает формирование однородной тонкодендритной структуры с меньшими дендритной ликвацией и пористостью [6, 7].

Для получения монокристаллической структуры (МК-структуры) заданной КГО использовали затравки из Ni–W, имеющие (как и интерметаллид Ni_3Al) гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку. Для исследования структуры и свойств использовали цилиндрические заготовки образцов с МК-структурой и КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, отклонением от КГО $<10^\circ$ град.

Микроструктурное исследование сплавов проводили с помощью растрового электронного мик-

роскопа на микрошлифах после травления. Для этого структуру выявляли в специально подготовленной смеси трех кислот – соляной, серной и азотной.

Для расчета статической прочности в зависимости от фазового состава моделируемого материала типа ВКНА-1В использован метод конечных элементов (МКЭ) и метод асимптотического осреднения композитов с периодической структурой [8–21].

Результаты

Проведен анализ научно-технических литературных данных по принципам разработки и существующим информационным системам, который показал, что в настоящее время прямых аналогов разрабатываемой ИИС не существует.

Существующие базы данных по характеристикам материалов (Granta, SpringerMaterials, ASM Handbooks, MatWeb, MMPDS) и программные продукты для расчета термодинамических равновесий (FactSage, MTDATA, PANDAT, ThermoCalc, NUCLEA/GEMINI) предоставляют справочную информацию или рассчитывают фазовые диаграммы, но не позволяют проводить расчет механических свойств материалов нового поколения.

Проведенное исследование позволило сформулировать требования к разрабатываемой ИИС хранения и обработки данных по свойствам авиационных материалов с возможностью прогнозирования свойств жаропрочных сплавов. Она должна иметь иерархическое, модульное строение, отвечать принципу поэтапности создания и иметь возможность адаптации и модификации системы при изменении внешних требований.

Проведен анализ имеющихся данных по свойствам авиационных материалов различных классов – полимерных композиционных материалов, жаропрочных сплавов и т. д. Цель анализа – установить список открытых источников, содержащих данные, которые впоследствии будут использованы для наполнения базы данных и полноту этих данных. Наиболее приемлемыми источниками конечных характеристик оказались паспорта на материалы ВИАМ, справочники: ВИАМ, The Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS), SpringerMaterials, ASM Handbooks. Особое внимание уделялось жаропрочным сплавам, для которых в макете ИИС должен быть реализован механизм прогнозирования конечных свойств.

Таким образом, проведен анализ отечественной и зарубежной научно-технической информации по следующим критериям: имеющиеся данные о физико-механических свойствах (жаропрочных никелевых сплавов, титановых и алюминиевых сплавов), о структурных особенностях и их влиянии на механические свойства, о влиянии фазового состава и условий изготовления на механические свойства авиационных материалов, включенные в макет интегрированной информа-

ционной системы, приведение их в форму, необходимую для хранения в базе данных (формализация) ИИС.

В результате анализа характеристик авиационных материалов (на примере жаропрочных сплавов) установлено, что для хранения и использования в ИИС их целесообразно разделить на две группы: исходные данные (фазовый состав, структурные особенности и др.) и конечные данные (расчетные или экспериментальные физико-механические свойства).

Проведен анализ существующих математических методов получения зависимостей «фазовый состав–механические свойства» авиационных материалов для возможного использования в интегрированной информационной системе, который выявил методы для их возможной реализации в макете ИИС:

- статистический метод с использованием регрессионного анализа;
- метод атомно-дискретного моделирования равновесного состояния γ -фазы в никелевых жаропрочных сплавах;
- методика расчета фазового состава сплавов исходя из физико-химических диаграмм многокомпонентных систем и материального баланса;
- метод конечных элементов в сочетании с методом асимптотического осреднения композитов с периодической структурой.

Для расчета механических характеристик сплавов использована математическая модель многоуровневой иерархической структуры, на основе которой разработан асимптотический метод осреднения процессов в таких структурах [22, 23]. С помощью этого метода получены рекуррентные формулы для вычисления эффективных характеристик многоуровневых иерархических структур, включая компоненты тензора эффективных модулей упругости. Проведенный расчет эффективных модулей упругости материала показал хорошую точность предложенного метода.

Разработаны математические модели зависимостей «фазовый состав–механические свойства» жаропрочных сплавов и физико-химических процессов, происходящих при их изготовлении (изменение структуры и фазового состава при термической обработке), с учетом мезомеханических процессов внутризеренного и межзеренного деформирования сплавов, основанных на конечно-элементном расчете мезомеханического процесса деформирования сплавов, и распространения мезофазных трещин в материалах при растяжении.

При проведении расчетов в рамках модели упругопластических деформаций А.А. Ильюшина фазы сплавов рассматривали со степенным законом упрочнения. При моделировании деформирования сплавов учитывали возможность их микроразрушения с последующим распространением трещин – вплоть до полного разрушения материала.

В качестве критерия прочности фаз использовалась модифицированная модель Писаренко–

Лебедева, которая позволяет анализировать различные сценарии микроразрушения композитов при изменении действующих нагрузок для различного сочетания комплекса упруго-прочностных характеристик различных фаз сплавов. Разработанные модели позволяют проводить численные исследования процессов микроразрушения жаропрочных монокристаллических никелевых сплавов. Сравнение результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований подтвердило адекватность математических моделей.

Получены результаты численных расчетов упруго-прочностных свойств жаропрочных сплавов (ЖС) с типовой мезоструктурой на основе разработанных математических моделей.

При разработке макета ИИС по свойствам авиационных материалов принята следующая структурная схема (рис. 1):

- блок ввода информации;
- макет базы данных по авиационным материалам, содержащий информацию по отечественным жаропрочным никелевым, титановым и алюминиевым сплавам, в виде текстовой, табличной и графической информации по физико-механическим свойствам (паспорт, справочные данные, ТУ), структурным особенностям (атлас), химическому составу и т. д.;
- блок прогнозирования свойств новых материалов, включающий математические модели, разработанные на предыдущем этапе работы, и позволяющий рассчитывать механические характеристики жаропрочных сплавов типа ВКНА-1В системы легирования $\text{Ni}_3\text{Al-Ti-Cr-W-Mo}$;
- модуль накопления информации по результатам расчетов;
- модуль, содержащий разработанные ранее конечно-элементные модели и результаты расчетов их напряженно-деформированного состояния при различных схемах нагружения;
- модули для визуализации результатов расчетов;
- руководство пользователя ИИС, содержащее: описание этапов работы с ИИС; методики расчета свойств ЖС с помощью ИИС; инструкции по подключению дополнительных расчетных модулей и наполнению баз данных.

Макет базы данных по авиационным материалам (жаропрочным никелевым, титановым и алюминиевым сплавам) содержит информацию по физико-механическим свойствам авиационных материалов, используемую вычислительным модулем при расчете (модули упругости и сдвига, коэффициенты Пуассона, предел текучести, пределы прочности при растяжении по соответствующим осям и т. д.), и справочные данные (химический состав, механические свойства по ГОСТ, ТУ и ОСТ, механические свойства при различных температурах, физические свойства, коррозионная стойкость, технологические данные, применение, микроструктуры, графический материал).

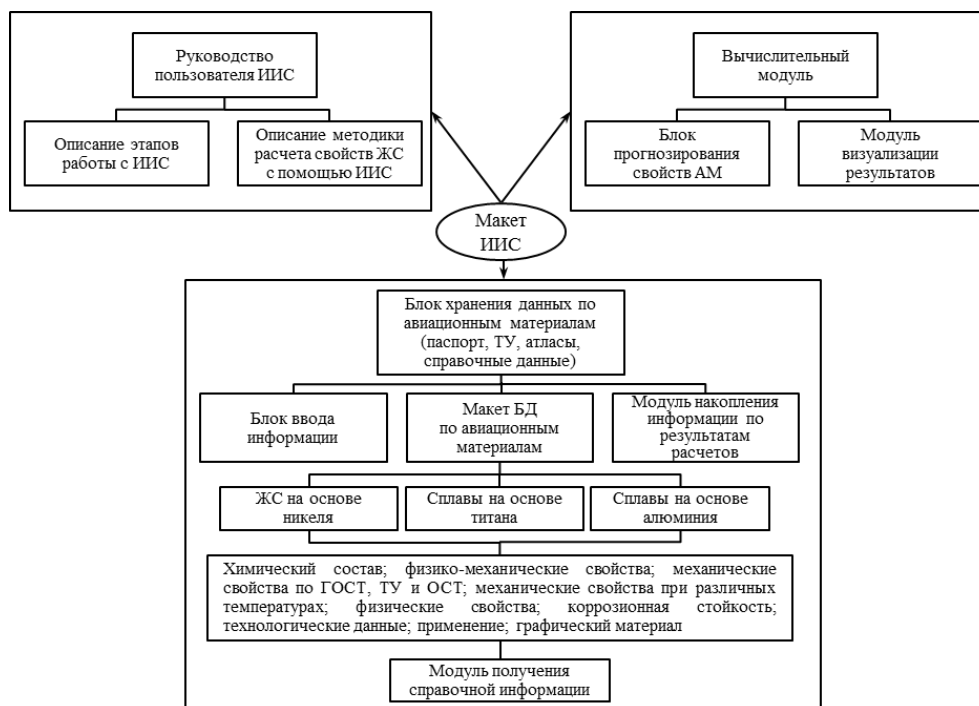


Рис. 1. Структура макета ИИС

Модуль накопления информации по результатам расчетов, входящий в блок хранения данных по авиационным материалам, содержит разработанные ранее конечно-элементные модели и результаты расчетов их напряженно-деформированного состояния при различных схемах нагружения.

Проведен анализ собранных данных по авиационным материалам, в результате которого разработана структура макета базы данных ИИС, разработан макет оболочки базы данных ИИС и созданы шаблоны по авиационным материалам с их наполнением информацией по жаропрочным сплавам на основе никеля, титана и алюминия (более ста отечественных сплавов). На рис. 2 показан фрагмент разработанного макета базы данных по авиационным материалам.

Прогнозирование механических характеристик отрабатывали на жаро-

прочных интерметаллидных сплавах типа ВИН, которые по сравнению с другими жаропрочными сплавами обладают высокой жаростойкостью, более низкой плотностью и высокой стабильностью свойств при рабочих температурах.

Рассмотрены экспериментальные данные по модельным сплавам системы легирования $\text{Ni}_3\text{Al-Ti-Cr-W-Mo}$, описывающие химический состав, атомную массу, электронную концентрацию, дисбаланс структуры, температуры фазовых превращений – ликвидус и солидус, значения структурных параметров (периоды кристаллических решеток γ' - и γ -фаз, мисфит γ/γ' , объемная доля фаз), характеристики кратковременной прочности и текучести при температуре 20°C. Эти данные использованы для построения математических моделей зависимостей «состав–структура–свойства» жаропрочных никелевых сплавов. Сплав рассматривался как двухкомпонентный материал, состоящий из однородного материала (γ -фаза) и упрочняющей γ' -фазы.

При моделировании напряженного состояния жаропрочных никелевых сплавов применен структурно-феноменологический подход. Он заключается в том, что уравнения механики деформируемого твердого тела и критерии прочности рассматриваются на нескольких, в частности на двух уровнях – мезоскопическом и микроскопическом. Микроскопический уровень связан с элементами структуры сплава, а мезоскопический – отражает поведение материала как однородного с эффективными свойствами. Связь между физическими величинами, установленная в рамках указанного подхода, определяет структурно-феноменологическую модель.

База материалов	
Наименование категории	
▲ Титановые сплавы	
▲ Литейные титановые сплавы	
	BT9L
	BT6L
	BT5L
	BT40L
	BT21L
	BT20L
▷ Деформируемые титановые сплавы	
▷ Алюминиды титана и сплавы на их основе	
▲ Жаропрочные никелевые сплавы	
Эвтектические сплавы	
▷ Сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al	
▲ На основе интерметаллида Ni_3Al	
▲ с поликр. равноосной структурой	
	ВКНА-4УР
	ВКНА-18Р
▲ с монокристаллической структурой	
	ВКНА-4У
	ВКНА-25
▷ ВКНА-18	
	ВИН-4
	ВИН-2
для расчета	
▷ Для лопаток турбины ГТД	
▲ Алюминиевые сплавы	
▲ Технический алюминий	
	АДР(011); АД1(013)
▷ С медью и марганцем	
▷ С медью и магнием (дуралюмины)	
▷ С марганцем	
▷ С магнием, кремнием и медью	
▷ С магнием и кремнием	
▷ С магнием (магналий)	
▷ С бериллием высокопрочные	
▷ Коррозионностойкие сплавы	
▷ Жаропрочные сплавы	
▷ Герметичные сплавы	
▷ Высокопрочные сплавы	

Рис. 2. Структура базы данных ИИС

Воспроизведение реальной микроструктуры материала при компьютерном моделировании практически невозможно ввиду ее случайного характера. Кроме того, детальное воспроизведение реальной геометрической формы фаз создает сложность при генерации конечно-элементных сеток, существенно увеличивает размер такой сетки и, следовательно, время расчета. В некоторых случаях детально моделируемая сложная геометрическая форма может быть источником концентрации напряжений, которых в действительности нет в фазах, создавая значительную погрешность расчета или проблемы сходимости решения. Поэтому целесообразно использовать идеализированные модели, которые содержат только наиболее важные особенности геометрической формы микроструктуры. Такая идеализированная многоуровневая структура для жаропрочных монокристаллических сплавов типа ВКНА-1В показана на рис. 3.

На рис. 4 представлена формализованная математическая модель многоуровневой иерархической структуры (МИС) с вложенными уровнями. Геометрическая структура МИС может включать произвольное число уровней, при этом каждый низший n -й уровень вложен в высший $(n-1)$ -й уровень. Предполагается, что МИС занимает первый уровень, состоящий из ячеек периодичности, число которых достаточно большое. Ячейка периодичности первого уровня состоит из компонентов, каждый из которых представляет собой совокупность ячеек периодичности второго уровня, которые могут различаться для различных компонентов.

После построения математических моделей для прогнозирования механических характеристик интерметаллидных сплавов на основе никеля разработан макет ИИС, включающий базу данных по авиационным материалам и вычислительный модуль для расчета механических характеристик авиационных материалов по характеристикам фаз материала. При работе с блоком прогнозирования

свойств авиационных материалов нужно задать концентрацию упрочняющей фазы, выбрать вычисляемые свойства материала и вид нагружения, материал γ - и γ' -фаз (рис. 5).

Физико-механические свойства γ - и γ' -фаз задаются таблицей, в графы которой вводятся следующие параметры: модули упругости, коэффициенты Пуассона, модули сдвига, предел текучести, деформация при разрыве, коэффициент аппроксимирующей функции пластичности, пределы прочности при растяжении и сжатии по соответствующим осям (рис. 6).

Описание столбцов таблицы (рис. 6):

- «Наименование» – наименование материала;
- «E_xx», «E_yy», «E_zz» – модули упругости;
- «nu_xy», «nu_xz», «nu_yz» – коэффициенты Пуассона;
- «G_xy», «G_xz», «G_yz» – модули сдвига;
- «SigmaY» – предел текучести;
- «EpsilonT» – деформация при разрыве;
- «alpha» – коэффициент аппроксимирующей функции пластичности;
- «SigmaT_x», «SigmaT_y», «SigmaT_z» – пределы прочности при растяжении по соответствующим осям;
- «SigmaC_x», «SigmaC_y», «SigmaC_z» – пределы прочности при сжатии по соответствующим осям;
- «SigmaS_xy», «SigmaS_xz», «SigmaS_yz» – пределы при сдвиге в соответствующих плоскостях;
- «Директория» – название папки, в которой хранятся связанные с материалом файлы (результаты расчетов, иллюстрации и т. д.);
- «Комментарий» – пояснение или дополнительная информация по материалу.

Для визуализации результатов моделирования в ИИС предусмотрены:

- средство компьютерной визуализации MicroYes_Graph для графического представления результатов моделирования (главным образом, диаграмм деформирования материалов) в виде двухмерных графиков (рис. 7);

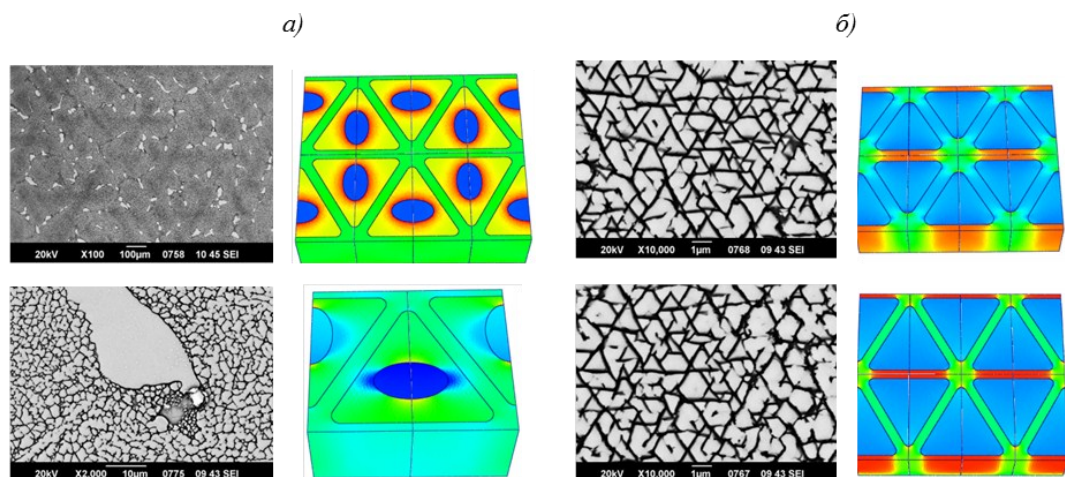


Рис. 3. Двухуровневая модель микроструктуры жаропрочного монокристаллического сплава типа ВКНА-1В <111>:

a – мезоуровень; b – микроуровень

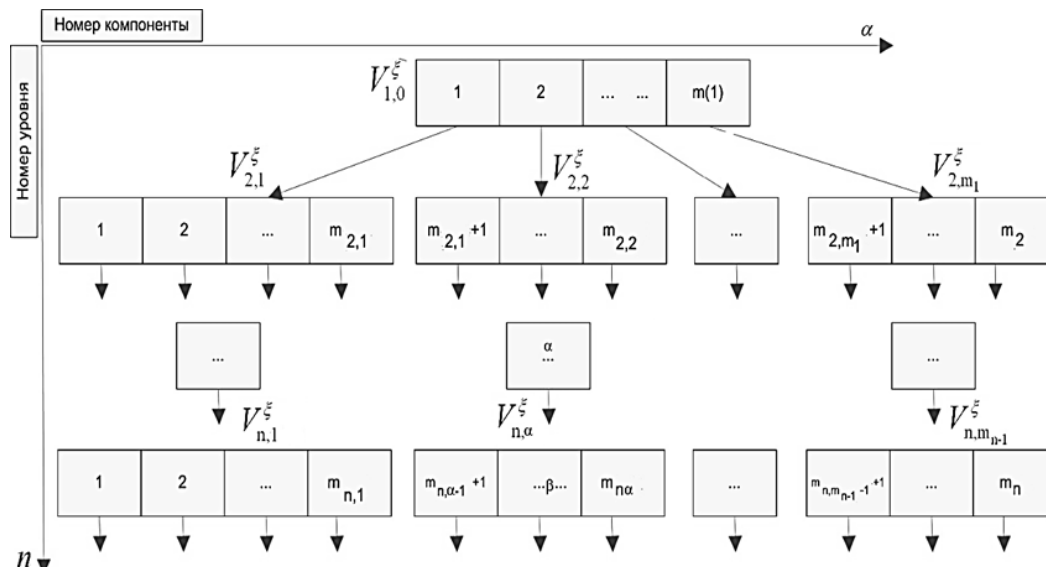


Рис. 4. Формализованная математическая модель многоуровневой иерархической структуры с иерархически вложенными уровнями

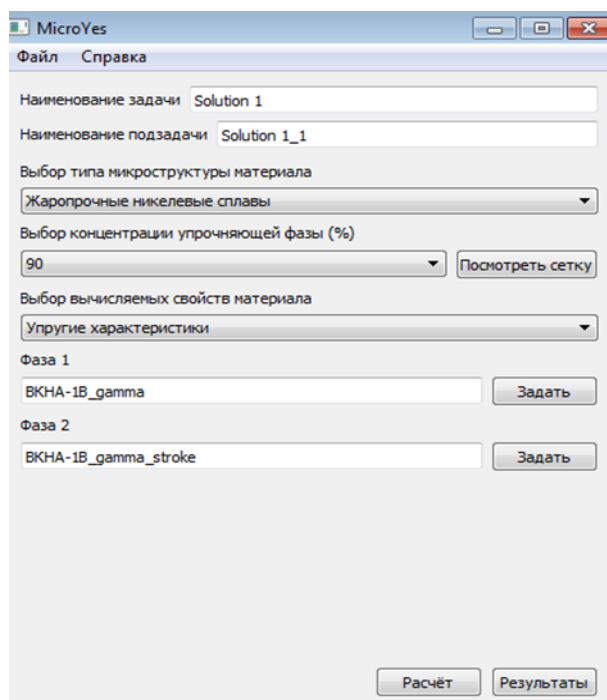


Рис. 5. Рабочее окно ИИС

Наимено	E _{xx}	E _{yy}	E _{zz}	nu _{xy}	nu _{xz}	nu _{yz}	G _{xy}	G _{xz}	G _{yz}
Ni_g... 230000	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0
Ni_g... 180000	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0
▸ Ni_a... 213023	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0
▸ Ni_a... 219121	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0

Наимено	E _{xx}	E _{yy}	E _{zz}	nu _{xy}	nu _{xz}	nu _{yz}	G _{xy}	G _{xz}	G _{yz}	SigmaY	EpsilonT	alpha	SigmaT _x	SigmaT _y	SigmaT _z	SigmaC _x	SigmaC _y	SigmaC _z	SigmaS _{xy}	SigmaS _{xz}	SigmaS _{yz}	Директор	Комментарий
Ni_g... 230000	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0	1750	0,01013	0,6	1800	0	0	1800	0	0	1000	0	0	Интерметаллид Ni3Al	
Ni_g... 180000	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0	610	0,15	0,6	1500	0	0	1500	0	0	1000	0	0	Твердый раствор	
▸ Ni_a... 213023	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0	475	0,01	0,6	1392	0	0	1392	0	0	90	0	0		
▸ Ni_a... 219121	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0	498	0,01	0,6	1272	0	0	1272	0	0	90	0	0	Ni_alloy...	

Рис. 6. Таблица задания физико-механических свойств материалов γ - и γ' -фаз

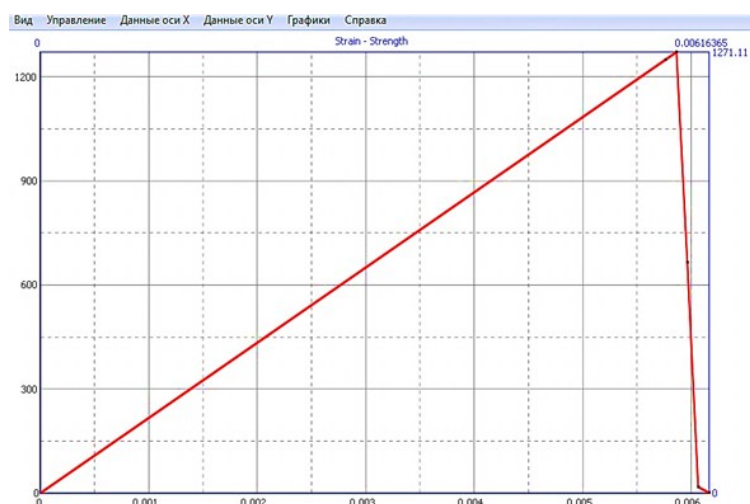


Рис. 7. Рабочее окно визуализатора MicroYes_Graph для графического представления результатов моделирования (диаграмм деформирования) в виде двухмерных графиков

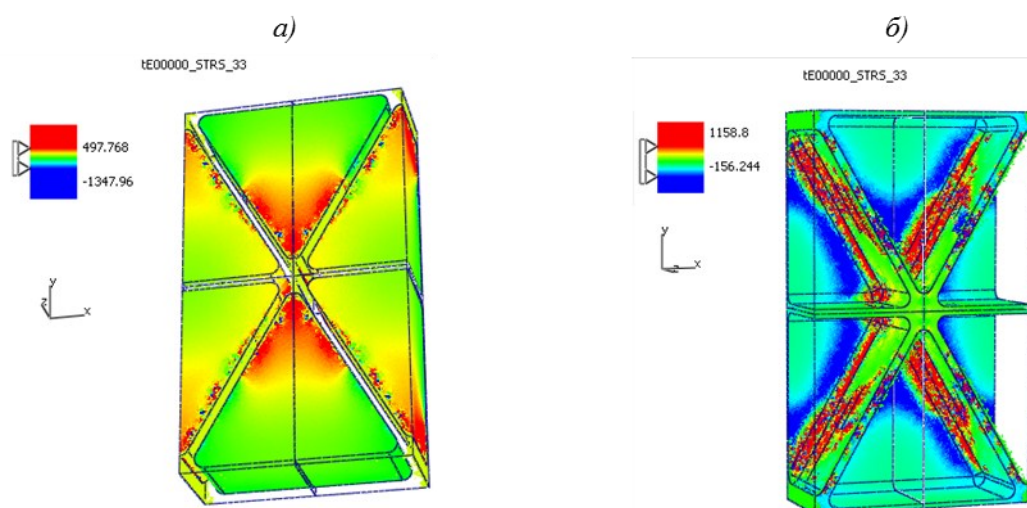


Рис. 8. Рабочее окно визуализатора MicroYes_Netgazer для 3D-представления и анализа результатов моделирования параметров микроструктуры материалов

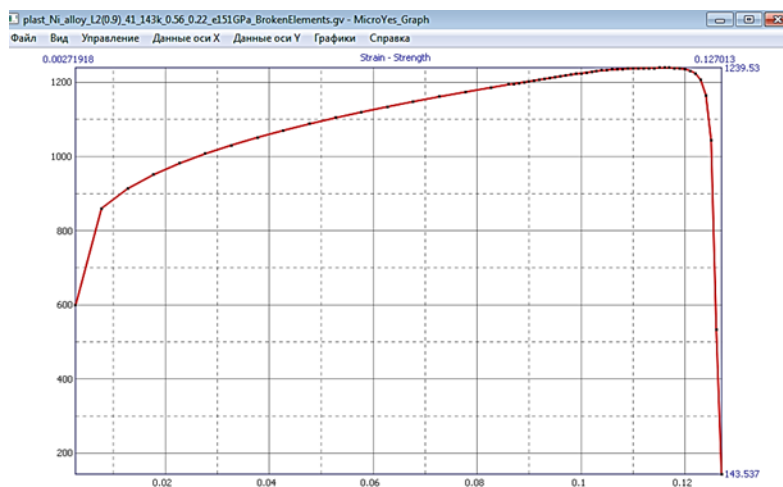


Рис. 9. Расчетная диаграмма деформирования интерметаллидного сплава на основе никеля при растяжении с концентрацией γ' -фазы 90%

Сравнение свойств интерметаллидного сплава на основе никеля
с концентрацией γ' -фазы 90%

Свойства	Расчетные значения	Экспериментальные данные
E , ГПа	220	220
$\sigma_{0,2}$, МПа	600	580–620
σ_B , МПа	1239	1200–1350

– средство компьютерной визуализации MicroYes_Netgazer для 3D-представления и анализа результатов моделирования полей напряжений и деформаций в микроструктуре материала (рис. 8).

Сравнение результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований подтвердило адекватность математических моделей блока прогнозирования свойств новых материалов.

На рис. 9 представлена расчетная диаграмма деформирования интерметаллидного сплава на основе никеля с концентрацией γ' -фазы 90% при растяжении и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными (см. таблицу), которое показало хорошее совпадение значений.

Исходные данные для компонентов материала:

γ -фаза	γ' -фаза
$E=151000$ МПа;	$E=230000$ МПа;
$\mu=0,28$;	$\mu=0,28$;
$\sigma_{0,2}=610$ МПа;	$\sigma_{0,2}=800$ МПа;
$\delta=56\%$;	$\delta=22\%$;
$\sigma_s=1000$ МПа	$\sigma_s=1500$ МПа.

Обсуждение и заключения

Разработан макет ИИС по свойствам авиационных материалов, включающий:

- блок ввода информации;
- макет базы данных по авиационным материалам, содержащий информацию по отечественным жаропрочным никелевым, титановым и алюминиевым сплавам в виде текстовой, табличной и графической информации по физико-механическим свойствам (паспорт, справочные данные, ТУ), структурным особенностям (атлас), химическому составу и т. д.;
- блок прогнозирования свойств новых материалов, включающий математические модели, разработанные на предыдущем этапе работы, и позволяющий рассчитывать механические характеристики жаропрочных сплавов типа ВКНА-1В системы легирования $Ni_3Al-Ti-Cr-W-Mo$;

– модуль накопления информации по результатам расчетов;

– модуль, содержащий разработанные ранее конечно-элементные модели и результаты расчетов их напряженно-деформированного состояния при различных схемах нагружения;

– модули для визуализации результатов расчетов;

– руководство пользователя ИИС, содержащее: описание этапов работы с ИИС; методики расчета свойств ЖС с помощью ИИС; инструкции по подключению дополнительных расчетных модулей и наполнению баз данных.

Для описания структуры материала в блоке прогнозирования свойств ИИС использовался иерархический многомасштабный подход, предполагающий описание двух структурных уровней материала – мезоуровня и микроуровня.

Проведено сравнение результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований, подтверждающее адекватность математических моделей блока прогнозирования свойств новых материалов.

Разработанная интегрированная информационная система предназначена для использования при проведении научно-исследовательских работ по разработке авиационных материалов для прогнозирования свойств новых составов, что позволит уменьшить объем экспериментальных исследований и ускорить процесс разработки. Такая система может также использоваться в качестве источника данных по существующим авиационным материалам для разработки новых изделий авиационной техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.595.21.0002 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор №RFMEFI59514X0002, с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания ФГУП «ВИАМ».

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., Гриневич А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б., Базы-

- лева О.А., Морозова Г.И., Казанская Н.К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al // *Металлы*. 1999. №1. С. 58–65.
5. Нургаянова О.С., Ганеев А.А. Математическое моделирование влияния легирующих элементов на жаропрочность никелевых сплавов с монокристаллической структурой // *Вестник УГАТУ*. 2008. Т. 8. №4. С. 91–95.
 6. Enomoto M., Harada. Analysis of γ/γ' Equilibrium in Ni–Al–X Alloys by the Cluster Variation Method with the Lennard–Jones Potential // *Metallurgical Transactions*. 1989. V. 20A. №4. P. 649–664.
 7. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 3–7.
 8. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Юрин Ю.В. Асимптотическая теория термолучности многослойных тонких пластин // *Математическое моделирование и численные методы*. 2014. №4. С. 18–36.
 9. Димитриенко Ю.И., Дрогоблюб А.Н., Губарева Е.А. Оптимизация многокомпонентных дисперсно-армированных композитов на основе сплайн-аппроксимации // *Наука и образование: электрон. науч.-технич. изд.* 2015. №2. URL: <http://technomag.bmstu.ru> (дата обращения: 02.06.2015). DOI: 10.7463/0215.0757079.
 10. Димитриенко Ю.И., Федонюк Н.Н., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Прозоровский А.А. Многомасштабное конечно-элементное моделирование трехслойных сотовых композитных конструкций // *Наука и образование электрон. науч.-технич. изд.* 2014. №10. URL: <http://technomag.bmstu.ru> (дата обращения: 02.06.2015). DOI: 10.7463/1014.0730105.
 11. Димитриенко Ю.И., Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Федонюк Н.Н., Сборщиков С.В., Губарева Е.А., Крылов В.Д., Григорьев М.М., Прозоровский А.А. Разработка многослойного полимерного композиционного материала с дискретным конструктивно-ортотропным наполнителем // *Композиты и наноструктуры*. 2014. Т. 6. №1. С. 32–48.
 12. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В. Асимптотическая теория конструктивно-ортотропных пластин с двухпериодической структурой // *Математическое моделирование и численные методы*. 2014. №1. С. 36–57.
 13. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В. Конечно-элементное моделирование эффективных вязкоупругих свойств однонаправленных композиционных материалов // *Математическое моделирование и численные методы*. 2014. №2. С. 28–48.
 14. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Особенности расчетов устойчивости стержней и пластин // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4. С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-74-79.
 15. Гусев Д.Е., Коллеров М.Ю., Рудаков С.С., Королев П.А., Орешко Е.И. Оценка биомеханической совместимости имплантируемых опорных пластин из сплавов на основе титана и никелида титана методом компьютерного моделирования // *Титан*. 2011. №3 (33). С. 39–44.
 16. Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Орешко Е.И. Экспериментально-теоретическое обоснование выбора метода и имплантатов для устранения воронкообразной деформации грудной клетки // *Научные труды (Вестник МАТИ)*. 2012. №19 (91). С. 331–336.
 17. Коллеров М.Ю., Усиков В.Д., Куфтов В.С., Гусев Д.Е., Орешко Е.И. Медико-техническое обоснование использования титановых сплавов в имплантируемых конструкциях для стабилизации позвоночника // *Титан*. 2013. №1 (40). С. 39–45.
 18. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Выбор схемы расположения высокомодульных слоев в многослойной гибридной пластине для ее наибольшего сопротивления потере устойчивости // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S4. С. 109–117.
 19. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Математическое моделирование деформирования конструкционного углепластика при изгибе // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №2 (41). С. 50–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-50-59.
 20. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. Расчет на прочность гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава и слоистого алюмокомпозита // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 53–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-53-61.
 21. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н., Терентьев В.Ф., Слизов А.К. Построение диаграмм деформирования в трехмерном пространстве σ – ϵ – t // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №1 (46). С. 61–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-61-68.
 22. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Базылева О.А., Луценко А.Н., Орешко Е.И. Моделирование упруго-пластических характеристик монокристаллических интерметаллидных сплавов на основе микроструктурного численного анализа // *Математическое моделирование и численные методы*. 2015. №2. С. 3–22.
 23. Димитриенко Ю.И., Луценко А.Н., Губарева Е.А., Орешко Е.И., Базылева О.А., Сборщиков С.В. Расчет механических характеристик жаропрочных интерметаллидных сплавов на основе никеля методом многомасштабного моделирования структуры // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 33–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-3-33-48.