

УДК 539.3: 004.94

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СОСТОЯНИЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ: ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ПУТЕМ**Ю.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, А.В. ТКАЧУК, О.В. КОХАНОВСКАЯ, И.Я. ХРАМЦОВА, А.А. ЗАРУБИНА, В.И. КОХАНОВСКИЙ, Н.А. ТКАЧУК, А.Н. МАЛАКЕЙ, А.В. НАБОКОВ, А.М. ГОЛОВИН, О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК**

Компьютерное моделирование процессов и состояний с на сегодня завычай основой прийняття основних проектно-технологічних рішень при створенні нових машин, споруд і агрегатів. Для отримання обґрунтованих рекомендацій необхідно мати у розпорядженні адекватні, точні та негромоздкі числові моделі досліджуваних об'єктів. З цієї метою пропонується розрахунково-експериментальний метод обґрунтування структури та параметрів цих моделей. Як приклад розглядаються елементи бойових броньованих машин, а як базові – метод скінченних елементів, з одного боку, та метод голографічної інтерферометрії – з іншого. На прикладі декількох об'єктів продемонстровано алгоритм і результати застосування запропонованого методу.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, розрахунково-експериментальний метод, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, метод спекл-голографічної інтерферометрії

Компьютерное моделирование процессов и состояний является на сегодня обычно основанием для принятия основных проектно-технологических решений при создании новых машин, сооружений и агрегатов. Для получения обоснованных рекомендаций необходимо иметь в распоряжении адекватные, точные и негромоздкие числовые модели изучаемых объектов. С этой целью предлагается расчетно-экспериментальный метод обоснования структуры и параметров этих моделей. В качестве примера рассматриваются элементы боевых бронированных машин, а как базовые - метод конечных элементов, с одной стороны, и метод голографической интерферометрии - с другой. На примере нескольких объектов продемонстрировано алгоритм и результаты применения предложенного метода.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, расчетно-экспериментальный метод, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, метод спекл-голографической интерферометрии

Today computer modeling of processes and states is a basis for making of fundamental design and technological solutions for creation of new machines, buildings and units. For well-founded recommendations it is necessary to have available adequate, accurate and not cumbersome numerical models of research objects. For this purpose calculation and experimental method is proposed for justification of structure and parameters of these models. As an example, elements of armored combat vehicles are considered; basic methods are finite element method and holographic interferometry method. The algorithm and results of the proposed method are demonstrated by several objects. The proposed method is theoretical and practical basis for building of reasonable model of research objects, processes and states. Later it will be a base for a series of computer researches and development of recommendations on choice of rational technical solutions in design of various engineering structures.

Keywords: computer modeling, calculation and experimental method, finite element method, stress-strain state, speckle-holographic interferometry method

Введение

В процессе автоматизированного проектирования различных машиностроительных конструкций, в частности, объектов бронетанковой техники (ОБТТ), а также оборудования и средств технологической оснастки для производства их деталей, возникают задачи обеспечения достоверности расчетных схем, применяемых для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) тел сложной формы при действии сложной системы нагрузок. Применение расчетных схем в методе конечных элементов (МКЭ), который фактически является наиболее мощным современным численным методом исследования НДС, требует в качестве исходных данных знания: параметров конечно-элементной разбивки исследуемых объектов, граничных условий и нагрузок. Точность исходных данных обеспечивает высокую точность численных результатов. В последующем при использовании данных моделей в специализированных интегрированных системах автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем обеспечивается и точность исследований, и высокие прочностные и жесткостные характеристики проектируемых изделий. В конечном итоге обеспечивается высокая точность моделирования НДС, а, соответственно, высокие технические и тактико-технические характеристики объектов бронетанковой техники, а также других машин, оборудования и сооружений.

Существующие в настоящее время численные

методы исследования НДС, среди которых, как уже отмечалось, лидирующее положение занимает МКЭ, не обеспечивают только за счет внутренних средств контроль точности результатов моделирования по сравнению с поведением реальных объектов. Актуальной становится задача обеспечения достоверности используемых расчетных схем при численном исследовании элементов исследуемых объектов. В работе предлагается расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) исследований, при использовании которого в качестве основного результата выступают достоверные и точные расчетные модели исследуемых объектов, в частности, элементов объектов бронетанковой техники, а также технологической оснастки для изготовления ее деталей.

Анализ состояния проблемы

Как известно, при разработке новых машин основной упор делается именно на использование компьютерных средств моделирования, которые обеспечивают оперативную разработку конструкторской и технологической документации, компьютерное моделирование процессов и состояний, возникающих при изготовлении, эксплуатации и боевом применении этих машин. Таким образом, все этапы жизненного цикла машин сначала реализуются на виртуальных

© Веретельник Ю.В., Ткачук А.В., Кохановская О.В., Храмова И.Я., Зарубина А.А., Кохановский В.И., Ткачук Н.А., Малакей А.Н., Набоков А.В., Головин А.М., Веретельник О.В., 2017

моделях, и только затем претворяются в реальные изделия. В результате особую ценность приобретают адекватность, точность и ресурсозатратность при создании упомянутых выше компьютерных моделей. В частности, это относится к численным моделям для исследования процессов и состояний тех или иных объектов, т.к. именно результаты расчетов прочности, жесткости, газо- и гидробетекания, колебаний, теплообмена играют определяющую роль в обосновании проектно-технологических параметров создаваемых машин. При этом не существует универсальных отработанных методик, способов или рекомендаций относительно параметров численных моделей, создаваемых для исследования тех или иных процессов и состояний. Так, для широко применяемого метода конечных элементов основными вопросами, на которые нельзя ответить априори, являются: степень адекватности физически или геометрически нелинейной постановки задачи, тип (Solid, Shell, Beam и т.п.) применяемых для дискретизации конечных элементов (КЭ), требуемое количество КЭ для описания исследуемого процесса или состояния в конкретном объекте, расположение зон сгущения–разрежения КЭ, необходимость задания тех или иных опций в конечных элементах и т.п.

К сожалению, на большинство из перечисленных вопросов однозначного ответа только с применением внутренних средств систем CAD/CAM/CAE, в которых МКЭ реализован в виде коммерческого программного обеспечения, как правило, получить не удается. Существуют только общие рекомендации [1, 2], а также результаты решения тестовых или отдельных прикладных задач [3, 4]. В то же время процессы исследования элементов боевых бронированных машин (ББМ) постоянно порождают все новые и новые вопросы применительно к новым объектам и задачам. Учитывая высокую степень ответственности принимаемых при создании ББМ решений, а также необходимость обеспечения при этом достаточной оперативности, возникает противоречие между потребностями машиностроения, в частности, бронетанкостроения, с одной стороны, и возможностями существующих инструментов исследований, – с другой.

Разрешение этого противоречия составляет актуальную и важную научно-практическую проблему. Для ее частичного решения применимы различные методы [5–7]. Однако полного решения весь комплекс возникающих задач до настоящего времени не получил.

Постановка задачи

Целью работы является разработка общих подходов к расчетно-экспериментальному обоснованию структуры и параметров компьютерных моделей для конечно-элементного исследования процессов и состояний в сложных механических системах.

Для достижения сформулированной цели, следуя работам [5–7], решены следующие задачи.

1. Общая постановка задачи расчетно-экспериментального исследования в сложных механических системах.

2. Разработка метода количественной оценки не-

соответствия результатов численного моделирования и экспериментального исследования состояния объекта на примере МКЭ и метода спекл-голографической интерферометрии (МСГИ).

3. Иллюстрация применимости предложенного метода к исследованию элементов проектируемых объектов.

В дальнейшем в качестве механической системы рассматриваются элементы ББТ и технологической оснастки для их изготовления, в качестве численного метода – метод конечных элементов, а в качестве экспериментального – метод спекл-голографической интерферометрии.

Постановка задачи синтеза расчетных моделей на базе МКЭ и МСГИ

Задачу исследования НДС элементов сложных механических систем, в том числе элементов ББТ и технологической оснастки, можно рассмотреть таким образом. Пусть \mathbf{R} – реальный объект, поведение которого формально описывается при помощи в общем случае неизвестного оператора L_R :

$$L_R(u_R, P_R, f, t) = 0, \quad (1)$$

где u_R, P_R, f, t – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно.

Математическую модель \mathbf{M} , получаемую в результате процесса идеализации I , описывает известный оператор L_M :

$$L_M(u_M, P_M, f, t) = 0, \quad (2)$$

где в скобках – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно.

Численную модель \mathbf{N} , получаемую в результате процесса дискретизации D , описывает в каждом конкретном случае оператор L_N :

$$L_N(u_N, P_N, f, t) = 0. \quad (3)$$

Индексы N в данном выражении соответствуют некоторой создаваемой численной модели исследуемого процесса или состояния.

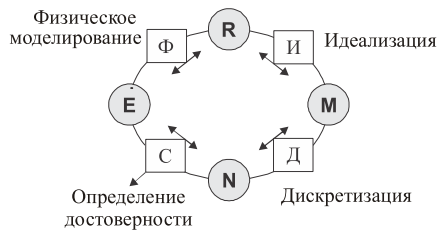
Численная модель подразумевает совокупность собственно дискретизированных уравнений, численных методов их решения, алгоритмов и программного обеспечения.

Если объект или его физическая модель (при физическом моделировании \mathbf{F}) подвергаются экспериментальному исследованию, то сам объект или его модель, метод исследований, измерительные схемы (регистрация, усиление, расшифровка, представление) и измерительная аппаратура образуют экспериментальную модель \mathbf{E} , поведение которой в операторном виде можно записать следующим образом:

$$L_E(u_E, P_E, f, t) = 0. \quad (4)$$

Соотношения (1)–(4) описывают различные формы реального объекта и исследуемого процесса или состояния (на рис. 1 приведена схема исследова-

ния и процесс сравнения данных численных и экспериментальных исследований (обозначен через С)).



R – реальный объект;
M – математическая модель;
N – численная модель;
E – экспериментальная модель;
Ф, F – физическое моделирование; **И, I** – идеализация;
Д, D – дискретизация;
С – сравнение

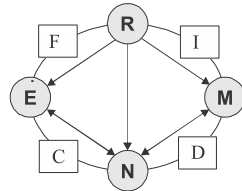


Рисунок 1 – Общая структура соотношений этапов исследования элементов исследуемых объектов

Ставится задача разработки математического аппарата для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов машиностроительных конструкций, в т.ч. – деталей объектов бронетанковой техники и оснастки в автоматизированном режиме.

Формализация задачи

При выборе метода экспериментального исследования для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов машиностроительных конструкций в автоматизированном режиме предпочтение было отдано методу спекл-голографической интерферометрии, который является одним из наиболее точных и информативных методов исследований [8–10].

Как показывает практика, именно этап сравнения результатов численных и экспериментальных результатов, причем в автоматизированном режиме, разработан недостаточно: нет отработанных механизмов *сравнения полей* u_R, u_M, u_N, u_E ; не производится *верификация* модели в части достоверности параметров P, f ; не определяется *полнота* модели (полнота множества P, f); не проводится *рационализация* моделей (определение значимых факторов).

Исходя из предположений: этап **I** – достаточно корректен; этап **D** – в принципе отработанный в литературе этап; этап **F** – при использовании МСГИ достаточно точен, требование соответствия результатов исследований **R, M, N, E** предполагает соответствие результатов в звене **C** (см. рис. 1).

В реальных случаях в силу того, что этап **I** – недостаточно "полный", подробный; на этапе **F** присутствуют погрешности физического моделирования, измерений, расшифровки; на этапе **D** нельзя избежать погрешностей дискретизации (размеры и расположение сетки конечных элементов, типы КЭ, методы решения систем уравнений), возникает несоответствие в конкретной цепочке **C**.

Поскольку в схеме на рис. 1 этап **I** – это аппарат механики деформированного твердого тела, достаточно разработанный для большей части спектра возникающих задач моделирования реакции сложных механических систем на различные типы воздействий; этап **M** – МСГИ, который дает интегральную точность измерения до долей микрона, в т.ч. на *реальном* объекте; этап **D** – МКЭ, который в *принципе* дает достаточно точное и полное описание любой сложности математической модели процесса в механических системах, то на первый взгляд погрешности в цепочках этапов **I** – **M** – **D** должны быть сведены (в принципе) к минимуму. Однако при этом узким местом является *обоснованный выбор* на различных этапах следующего:

этап **D**: задание параметров дискретизации;

этап **I**: определение значимых параметров;

этапы **I, D**: степени полноты множества (отсюда возникает необходимость обоснованного *пополнения* набора параметров модели).

Сведя к минимуму погрешности в цепочке этапа **F** (физическое моделирование и измерение), а также обоснованно допустив возможность добиться структурного и параметрического изменения математической и численной модели таким образом, чтобы обеспечить адекватное описание R , исходную задачу можно представить в виде определения такой рациональной структуры и множества параметров значений P_N , чтобы с заданной точностью описать поведение реального объекта:

$$P_N^*, f_N^* : I(u_N - u_E) \leq \varepsilon, \quad (5)$$

где I – некоторая мера, определяющая несоответствие результатов экспериментальных и численных исследований ($\Delta u_{NE} = u_N - u_E$).

При этом можно выделить следующие типы задач:

- определение типа численных моделей и (или) характеристик конечно-элементных разбивок;
- величины, структуры, типов и (или) закона распределения нагрузок на исследуемые объекты;
- граничных условий и условий сопряжения;
- свойств материалов;
- значимых параметров моделей;
- полноты множества значимых параметров; минимального полного множества параметров;
- границ применимости моделей;
- чувствительности моделей к изменению параметров;

• зависимости характеристик модели (например, прочностных и жесткостных) от конструктивных или иных параметров модели во всем или в выделенном диапазоне изменения, а также построение "экспресс-моделей" (обоснованно структурно упрощенных на основе многовариантных исследований) и "экспресс-систем" оценки прочностных и жесткостных характеристик отдельных элементов исследуемых объектов машиностроительных конструкций (аналитических зависимостей, графиков, таблиц, программных модулей или баз данных), в том числе справедливых не только для отдельно взятого, но и

для семейства объектов.

Обобщение исходной постановки при разработке расчетно-экспериментального метода исследований

Исходная постановка задачи по сравнению с соотношениями (5) может быть расширена, в частности, возможны следующие обобщения предлагаемого подхода.

Для классов конструкций или для множеств моделей при исследовании НДС элементов механических систем во многих случаях возникает проблема оценки достоверности результатов, получаемых при численном моделировании реакции исследуемых систем на различные виды воздействий. Чаще всего эта проблема разрешается сравнением полученных результатов с данными, полученными другим способом (численно, аналитически, экспериментально). Естественно, что данные, полученные в ходе экспериментальных исследований (при соблюдении определенных требований к условиям их проведения, а также характеристикам используемой регистрирующей и измерительной аппаратуры) представляют особый интерес, поскольку при этом могут проявиться такие свойства объекта, которые учитываются исходной математической моделью или не в полной мере, или вообще ею не учитываются. Анализ результатов экспериментальных исследований может также заставить изменить используемые при исследовании численные модели (например, при использовании МКЭ – типы применяемых конечных элементов, их размеры, расположение зон сгущения-разрежения конечно-элементных сеток). Существенными являются и следующие факторы: характер зависимости напряженно-деформированного состояния от времени, степень влияния на него условий контактного сопряжения, параметров окружающей среды и т.д.

В связи с этим большое развитие в последнее время получили методы исследований прочностных и жесткостных характеристик элементов механических систем, сочетающие численные и экспериментальные этапы. Традиционный подход к расчетно-экспериментальным исследованиям (рис. 2) направлен на исследование конкретного объекта, параметра, эффекта, и предполагает сопоставление результатов исследований "по горизонтали", т.е. полученных для одного объекта каким-либо из численных методов (или несколькими) и каким-либо из экспериментальных методов (или несколькими).

Данный подход эффективен во многих случаях, когда поведение исследуемого объекта достаточно полно описывается одним или небольшим количеством определяющих параметров. Однако при исследовании реальных механических систем в большинстве случаев имеет место ситуация, когда в исследуемом объекте нельзя заранее выделить эти определяющие параметры. Машина или механизм, состоящие из единиц, десятков и сотен основных элементов, находящихся в десятках, сотнях и тысячах взаимосвязей между собой и с внешней средой, описываются достаточно сложной математической моделью.

При использовании традиционной схемы проис-

ходит сопоставление как параметров P_M, P_N, P_E , так и зависимостей между ними, описываемых L_M, L_N, L_E , и последующая корректировка моделей до получения удовлетворительного соответствия. Одновременно может производиться как обоснованное расширение, так и сужение набора определяющих параметров, усложнение или упрощение зависимостей между ними.

Предлагается новая схема организации исследований, в которой можно устанавливать взаимосвязь не только между параметрами P_M, P_N, P_E и операторами L_M, L_N, L_E , а и между множествами тех и других (рис. 3).



Рисунок 2 – Традиционная схема расчетно-экспериментальных исследований



Рисунок 3 – Предлагаемая схема расчетно-экспериментальных исследований

Это позволяет использовать при организации баз данных, содержащих результаты численных и экспериментальных исследований, описывающих различные механические системы, проводимые в различное время различными исследователями с применением различной аппаратуры, различных численных методов, различных вычислительных методов и средств для установления искомых зависимостей. Более того, избыточность информации (которая имеет место в некоторых случаях) на самом деле не приводит к противоречиям, а служит дополнительным источником повышения достоверности результатов, степени адекватности моделей и точности методов. Причем сопоставление результатов можно производить как между элементами множеств M, N и E (математические модели, результаты численных и экспериментальных

исследований соответственно), так и внутри множеств, используя при этом различные весовые коэффициенты для выделения результатов более значимых исследований.

Получаемая в результате база знаний за счет постоянного пополнения множеств M , N и E не только растет в объеме, но и повышает достоверность содержащихся в ней элементов знаний. Предложенная схема нуждается в определенной формализации. Отдельной крупной задачей является организация, создание и сопровождение баз данных хотя бы по отдельным классам объектов, по тем или иным областям. Кроме того, еще одной важной проблемой является выбор критериев сопоставимости различных элементов различных множеств.

Естественно, что данный подход требует особой организации соответствующих баз данных, поскольку количество учитываемых факторов, параметров, воздействий и взаимосвязей в механических системах чрезвычайно велико, даже если ограничиться отдельным классом объектов. Лавинообразного роста информации можно избежать, используя иерархические структуры ее хранения, основанные на различных типах классификаций исследуемых объектов: по форме, по составу, по типам внешних воздействий, по функциональному назначению и т.д. При этом можно устанавливать различные виды соответствия: внутри определенного класса, подкласса, подподкласса, а также между элементами разных классов, подклассов, подподклассов и т.д.

Аналогичные подходы могут быть использованы для исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов самых разнообразных по форме, структуре, предназначению механических систем с применением различных вариантов РЭМ.

Формализация предложенного подхода может быть следующей. Пусть множество R – объединение элементов \bar{R}^i . Тогда множество параметров $\bar{P} = \bigcup P_i$, т.е. множество параметров \bar{P} является объединением множеств отдельных параметров отдельных представителей класса (для каждой из типов моделей R, N, M, E), и задача (5) записывается в виде

$$\bar{P}_N^* : I(\bar{P}, \bar{P}_N, \Delta u_{NE}) \leq \varepsilon. \quad (6)$$

Для расширенного множества параметров, исходя из идеи о формальной равноправности параметров P_E, P_N, P_M , можно формировать расширенное обобщенное параметрическое пространство, из которого можно выделять подпространства варьируемых параметров, уточняемых параметров, критериальных параметров, ограничительных параметров. При этом в процессе исследований все эти категории могут быть пересекающимися, перетекающими друг в друга. Тогда задача (5) записывается в виде

$$\bar{P}_V^* : I(\bar{P}, \bar{P}_V, \Delta u_{NE}) \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где \bar{P}_V – множество варьируемых параметров.

На случай динамического процесса обобщение

задачи

$$P_N^*, f^* : I(t) \leq \varepsilon \quad (8)$$

предполагает формирование критерия, позволяющего распространить функционал на некоторый характерный интервал времени.

На случай нелинейного процесса справедлива формулировка

$$P_N^*, \tau^* : I(\tau) \leq \varepsilon, \quad (9)$$

где τ – множество параметров, описывающих нелинейный процесс (например, параметры нагружения при упруго-пластическом деформировании).

На случай резко возрастающих требований к вычислительным ресурсам возникает проблема, если требование увеличения точности вступает в противоречие с существующими в распоряжении исследователя вычислительными ресурсами R_S (выступает в качестве штрафа: величина его резко возрастает при приближении к ограничению на имеющиеся ресурсы):

$$P_N^*, f^* : I(P_N, f) + R_S(P_N, f) \leq \varepsilon. \quad (10)$$

На случай сравнения состояний объекта через большие промежутки времени можно использовать идею хронологического "портретирования" (т.е. серия "снимков" объекта через большие промежутки времени, а отсюда – определение или изменения самого объекта, или физико-механических характеристик материала). Происходит как бы "привязка" "ромба" (см. рис. 1) предлагаемого РЭМ к разделенным моментам времени. В данном случае

$$P_N^*, f^* : I(t_1, t_2, \dots, t_n) \leq \varepsilon. \quad (11)$$

Здесь t_1, t_2, \dots, t_n – моменты времени, при которых производится сравнение состояний объекта.

Для формирования баз данных, знаний и экспертных систем на основе расчетно-экспериментальных исследований во многих случаях самостоятельную ценность имеют не только и не столько экспериментально проверенные результаты численных исследований, но и рационально сбалансированная достоверная численная модель объекта.

Конечно-элементная модель (КЭМ) сложного объекта может иметь также и большую коммерческую ценность. Кроме того, предложенная методика может быть положена в основу иерархической базы данных и знаний о том или ином классе объектов, причем объектами сравнения могут быть множества баз данных (как численных, так и экспериментальных). Здесь также могут быть введены соответствующие критерии улучшения модели, причем для сравнения могут быть взяты модели, полученные независимо из различных источников и в разное время.

Окончательным результатом исследования является достоверная численная модель для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) тех или иных объектов или классов объектов. При решении поставленной задачи при помощи предложенного расчетно-экспериментального метода ее можно обра-

тять: пусть имеется достаточно точный инструмент исследования численных моделей, однако существует сомнение в применимости тех или иных математических моделей. То же – на любом участке цепи "математическая модель – численная модель – экспериментальная модель с измерительной аппаратурой". В этом случае можно: определить структуру и параметры той или иной модели (*узкая задача*); определить в пространстве варьируемых параметров области, в пределах которых справедливы различные модели (*широкая задача*).

Формально в процессе исследований можно "уравнять в правах" все типы моделей, выделив группу уточняющих моделей и уточняемую модель. Кроме того, возможна и постановка "смешанной" задачи, т.е. задачи, в которой объектом уточнения является множество параметров, представляющее совокупность параметров из различных типов моделей. В этом случае вместо уточняющих и уточняемых моделей (и их параметров) в качестве основных объектов выступают соответственно подмножества параметров. Более того, состав этих множеств может изменяться за счет "миграции" параметров из группы в группу.

Предложенные схемы РЭМ позволяют оперативно проводить *серии* исследований групп конструкций, причем наиболее трудоемкая часть, а именно экспериментальная, проводится в минимально возможном объеме.

Используя преимущества INTERNET-технологий, исследования с применением предложенного расчетно-экспериментального метода можно, во-первых, распараллелить (т.е. одновременно выполнять отдельные этапы и подэтапы силами различных исследователей и исследовательских групп), а, во-вторых, разнести географически и хронологически. При организации сервера баз данных возможна также определенная организация хранения результатов исследований, позволяющая создавать банки данных по тем или иным группам конструкций. Придав таким базам данных свойства открытости и доступности, на определенной стадии их развития можно создавать "верификационные эталоны" для различных видов механических систем. Это в свою очередь позволяет создавать экспертные системы, само существование которых избавило бы от необходимости проводить большую часть экспериментальных исследований, поскольку перед предстоящим циклом исследований всегда была бы возможность обратиться к соответствующей (и все время пополняемой) базе знаний. Чем полнее и совершеннее эта база, тем больше вероятность получить необходимые рекомендации для построения достоверной численной модели исследуемой механической системы.

Естественно, что при проведении расчетно-экспериментальных исследований в предложенной постановке одним из требований является некоторая степень *избыточности* экспериментальных данных, которая позволяет повысить степень точности и полноты создаваемой численной модели.

Таким образом, предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований НДС элементов сложных механических систем,

а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований с привлечением современных информационных технологий, что дает возможность провести географическое и временное разделение процесса исследований.

Многошаговое уточнение параметров расчетных моделей элементов технологической оснастки. Процесс исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов современных машиностроительных конструкций характеризуется следующими особенностями: быстрая сменяемость изделий; предельно сжатые сроки проектирования и необходимость дальнейшего уменьшения сроков, отведенных для расчетов и испытаний изделий, подготовки производства, а также необходимость снижения стоимости данных этапов; высокие требования к техническим характеристикам изделий и к экологической безопасности их эксплуатации; наличие достаточного числа мощных универсальных CAD/CAM/CAE систем, которые автоматизируют большую часть этапов конструирования, исследований и технологической подготовки производства; высокая стоимость и большая длительность экспериментальных исследований; сложность формы, а также условий эксплуатации проектируемых машин; наличие большого количества разъемных и неразъемных соединений; необходимость учета явлений предварительного натяга, наличия микроразрывов, остаточных напряжений, одноосевых ограничений в зонах контакта; неоднородности, анизотропность материала; уникальность некоторых объектов и недостаток в этой связи данных по исследованиям аналогичных конструкций.

Указанные обстоятельства предполагают необходимость во многих случаях производить в сжатые сроки и теоретические, и экспериментальные исследования элементов вновь проектируемых машин. Целый ряд конструкций при этом естественным образом вписывается в интенсивную схему расчетно-экспериментальных исследований. Однако дальнейшее ужесточение требований к достоверности результатов исследований требует создания РЭМ исследований, которые позволяют учитывать индивидуальные особенности исследуемых конструкций. Это возможно только в том случае, когда процессы теоретических и экспериментальных исследований: параллельны во времени; взаимосвязаны по данным; взаимно интегрированы; согласованы по используемым подходам; взаимно корректируемые по моделям.

Предлагается многошаговая схема расчетно-экспериментальных исследований элементов механических систем, которая предполагает следующие этапы: создание пробной расчетной модели объекта (*модель первого уровня*) с использованием специализированной или универсальной системы автоматизированного проектирования; проведение численного исследования объекта; проведение экспериментального исследования объекта и сравнение результатов численных и экспериментальных исследований и определение значимых факторов модели; корректировка структуры и параметров расчетных моделей объекта (*модель второго уровня*); проведение повторного чис-

ленного исследования объекта; корректировка расчетной модели третьего уровня; проведение численных исследований объекта с различным набором конструктивных и эксплуатационных параметров и расчет значений параметров, обеспечивающих необходимый уровень прочности, жесткости, вибраций и т.д., а также корректировка исходной модели в САПР.

Одна из основных идей метода заключается в создании единой базы данных, в которую записываются в согласованной форме результаты численных и экспериментальных исследований, проводимых параллельно. Полученные расчетным и экспериментальным путем распределения искомым величин должны быть численно сопоставлены. В частности, наиболее естественным образом для сравнения при использовании МСГИ подходят величины перемещений точек поверхности исследуемого тела. В качестве критериев соответствия в некоторых случаях предлагается вычисление коэффициентов

$$k_B = \frac{\|u_E\|}{\|u_N\|}, \quad k_\Phi = \frac{\|u_E - k_B u_N\|}{\|u_E\|}. \quad (12)$$

Здесь u_E , u_N – поля перемещений точек поверхности, полученные соответственно экспериментальным и численным путями, $\|\cdot\|$ – некоторая норма, а k_B , k_Φ – коэффициенты соответствия величин и форм распределения.

Первый из коэффициентов описывает для многих случаев степень несоответствия характеристик материала (могут не соответствовать принятые расчетные и реальные для материала модели и самого объекта), применяемых гипотез (несоответствие расчетных и фактических моментов раскрытия стыков, величин предварительных натягов, а также дефекты материала или дефекты технологической операции), параметров КЭМ (неудачный выбор типов применяемых элементов, вида и густоты конечно-элементной сетки) и т.д. При этом необходимо заранее определять предельно допустимое значение k_B (в идеальном случае $k_B = 1$, и чем больше он отличается от 1, тем хуже соответствие). Коэффициент k_Φ в идеальном случае равен 0, а причины отклонения от идеального случая – те же, что и для k_B . Отличительной особенностью

данного коэффициента является то, что в некоторых случаях он не может быть уменьшен ниже некоторой предельной величины k_Φ^{np} вследствие того, что расчетная модель несет в себе неустранимые погрешности. В этом случае (если порог k_Φ^{np} неприемлемо высок) необходимо производить корректировку исходной расчетной модели.

Область применения предложенного метода охватывает самые широкие классы исследуемых конструкций, виды решаемых задач и типы анализируемых процессов.

Формирование критериев расчетно-экспериментального метода при построении рациональных расчетных моделей элементов исследуемых объектов

С учетом ограничений на варьируемые параметры P в реальных ситуациях, в предположении адекватной математической модели, минимизации различного вида погрешностей (измерения, округления, расшифровки), основную идею предполагаемого РЭМ можно представить в виде задачи:

$$P_N^* : I(P_N) \rightarrow \min \text{ на } S_{P_N}, \quad (13)$$

где S_{P_N} – область варьирования P_N .

Возможные варианты решения задачи:

1. $I(P_N^*) \leq \varepsilon$ – полученная расчетная модель признается удовлетворяющей критерию точности (рис. 4, а), а множество параметров – требованию полноты.

2. $I(P_N^*) \geq \varepsilon$, и не существует в пространстве параметров P_N такой точки, что $I(P) \leq \varepsilon$. Тогда пространство параметров – неполное, и необходимо добавлять параметры в структуру модели (рис. 4, б).

3. $I(P_N^*) \geq \varepsilon$, но существует в пространстве параметров P_N точка или область, где $I(P) \leq \varepsilon$. Отсюда – некорректные ограничения на параметры модели (или достоверная модель лежит за пределами возможностей варьирования параметров, например, размерность задачи очень высокая) (рис. 4, в).

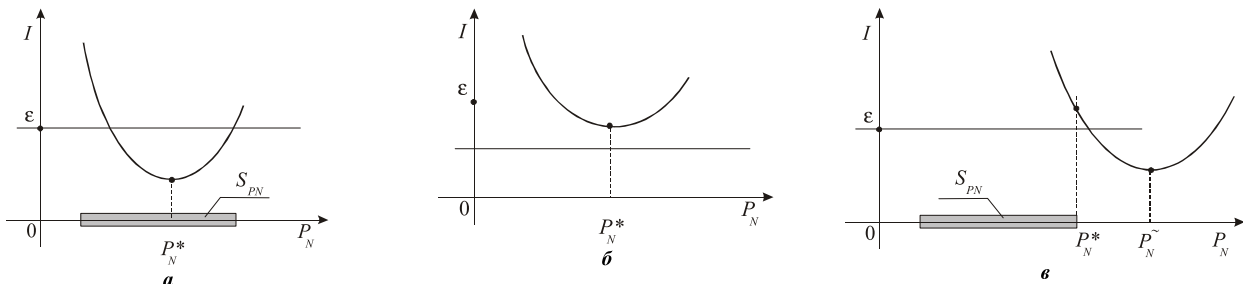


Рисунок 4 – К вопросу минимизации функционала несоответствия

Общая схема построения программно-аппаратного комплекса при реализации расчетно-экспериментального метода

Основное противоречие в процессе исследований

по традиционной схеме – отсутствие взаимовлияния результатов теоретических и экспериментальных исследований в процессе самих исследований непосредственно, причем на базе текущих результатов исследований.

Основной функциональной особенностью предла-

гаемого подхода является механизм *обратной связи* в цепи расчет-эксперимент, обеспечивающей *параллельное и взаимосогласованное* (и *взаимовлияющее*) изменение плана расчетно-экспериментальных исследований в ходе *самокорректирующегося* процесса.

При этом сформулированная в работе задача решается при *скользящем* изменении состава пространств значимых параметров. Результатом работы процесса (рис. 5) является достоверная КЭМ, обеспечивающая получение прочностных и жесткостных характеристик класса исследуемых конструкций с заданной точностью.



Рисунок 5 – Структурная схема системы автоматизированного расчетно-экспериментального исследования

Таким образом, предложенный РЭМ дает возможность создавать *самокорректирующийся* процесс уточнения параметров расчетной параметрической модели.

Общая постановка и схема построения программно-аппаратного комплекса (ПАК) на базе РЭМ предполагает в своей реализации решение следующих задач: определение структуры ПАК, разработку методов решения задачи автоматизации процессов расшифровки интерферограмм, разработку конкретной структуры программно-аппаратной реализации предложенных подходов, численную реализацию предложенных подходов.

Примеры применения предложенного метода

На рис. 6–8 представлены примеры объектов, исследованных с применением предложенного подхода, что дало возможность не только построить их качественные конечно-элементные модели, но и разработать удачные технические решения на этапе проектных разработок и технологической подготовки производства. Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований дало возможность обосновать расчетные модели технологической оснастки.

Предложенный метод расчетно-экспериментального обоснования структуры и параметров численных моделей исследуемых элементов механических систем применим к различным объектам. Так, для боевых бронированных машин одним из важнейших вопросов при компьютерном моделировании напряженно-деформированного состояния элементов сварного бронекорпуса является точность описания НДС сварных панелей гомогенными по свойствам материалами, т.е. без выделения сварного шва в отдельную область.

Кроме того, важным является выбор того или иного типа КЭ (Solid или Shell). Действительно Shell-модель в этом случае дает возможность более оперативного

проведения многовариантных исследований.

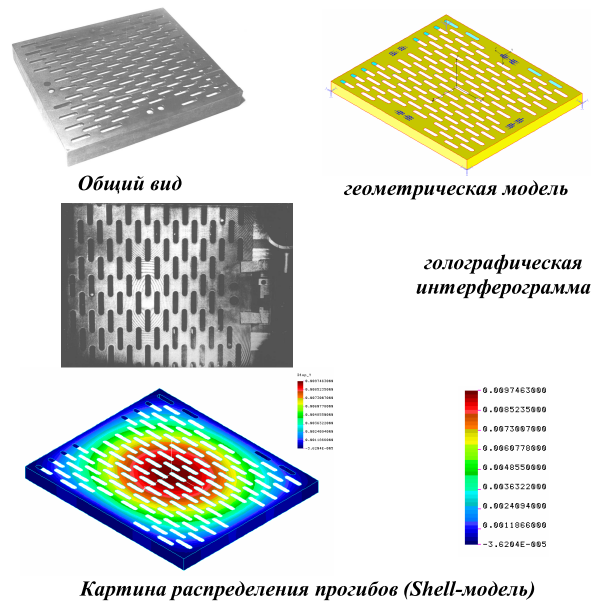
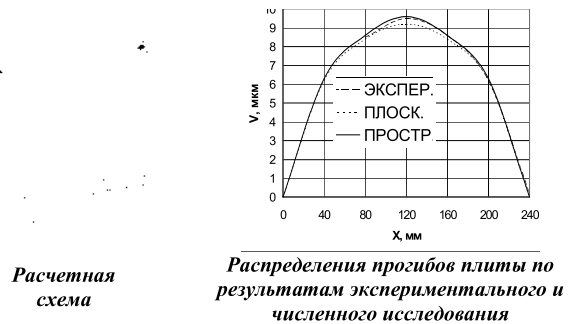
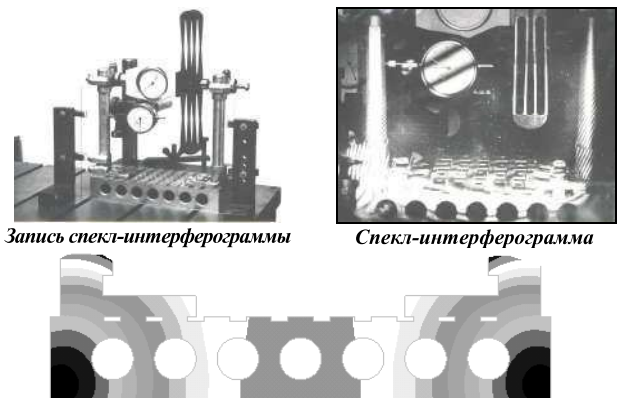


Рисунок 6 – Базовая плита для универсально-сборных приспособлений для сварочных работ



Распределения прогибов плиты по результатам экспериментального и численного исследования



Картинки распределения перемещений, полученные численно

Рисунок 7 – Переналаживаемое сборно-разборное приспособление для сборки трубопроводов под сварку

Для определения допустимости использования Shell-элементов был проведен конечно-элементный расчет и исследования с применением МСГИ. На рис. 9–11 представлены рабочие моменты и спекл-интерферограммы сварной и сплошной панелей.

Проведенные исследования дают основание для следующих выводов.

Для компьютерного моделирования НДС сварных бронекорпусов легкобронированных боевых машин применимо (в пределах упругого их деформирования)

использование конечных элементов типа Shell. Естественно, что на этапе оценки и прочностных характеристик необходимо дифференцировать механические свойства основного материала свариваемых панелей, материала сварного соединения и материала зоны термического влияния (околошовная область).

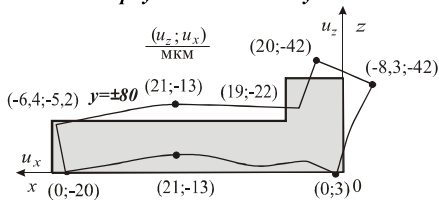
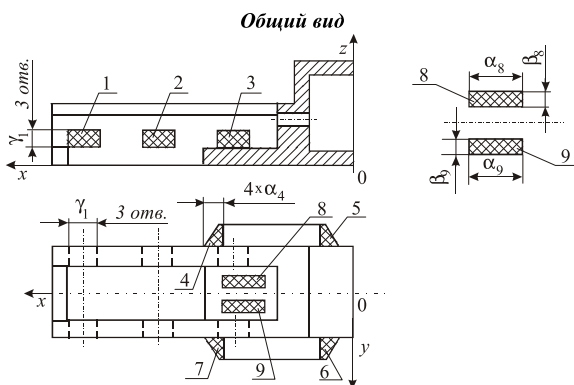


Рисунок 8 – Станочное приспособление тисочного типа



Голографическая установка СИИ-1



Система ввода графической информации в компьютер на базе цифровых камер

Рисунок 9 – Рабочие моменты лабораторных исследований на голографической установке СИИ-1

Анализ картин и тенденций изменения решения при измельчении сетки КЭ создают почву для назначения необходимой густоты конечных элементов исходя из принятого уровня требуемой точности.

Кроме результатов по обоснованию структуры и

параметров конечно-элементных моделей исследуемых фрагментов бронепанелей, косвенно была получена также и оценка качества проведения технологической операции сварки. Действительно, как видно из представленных интерферограмм (см. рис. 10, 11), по ним практически невозможно отличить сплошную пластину от сварной с точки зрения реакции на действие нагрузки. Таким образом, НДС как сплошной, так и сварной пластин оказываются практически идентичными. Это свидетельствует скорее не о "равнопрочности" (поскольку образцы тестировались только в пределах упругой деформации и делать вывод о механических свойствах различных зон образца нет основания), а, так сказать, о "равножесткости", с одной стороны, сварной пластины, а с другой, – сплошной. Качество же проведения сварки обеспечивает гомогенные физико-механические свойства различных зон свариваемой пластины.

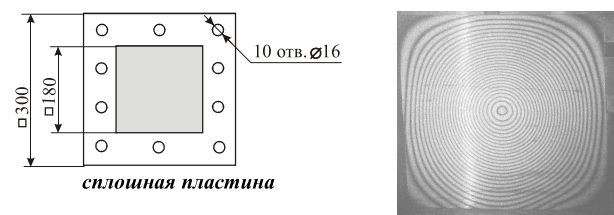


Рисунок 10 – Голографическая интерферограмма сплошной панели, полученные при помощи МСГИ

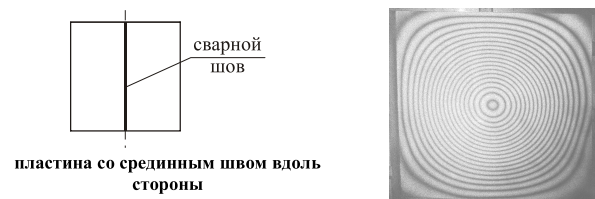
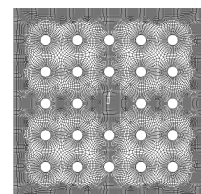


Рисунок 11 – Голографические интерферограммы сплошной и сварной панелей, полученные при помощи МСГИ

Дополнительно к анализу напряженно-деформированного состояния сварной пластины были проведены исследования образцов густоперфорированных пластин, которые используются, например, как базисные элементы технологической оснастки на предприятиях бронетанкостроения. На рис. 12–14 представлены результаты расчетов по МКЭ и экспериментов по МСГИ, а также сравнительные распределения прогибов для пластин с системой круговых отверстий.

Рисунок 12 – Конечно-элементная модель для исследования напряженно-деформированного состояния перфорированных пластин



Из анализа представленных картин и распределений следуют такие выводы. В целом картина деформирования густоперфорированных пластин по характеру соответствует случаю сплошной пластины, но ослабленной (например, за счет уменьшения толщины). В зоне каждого отверстия наблюдается местное искажение общей картины деформирования. Таким образом, для опре-

деления коэффициента концентрации напряжений следует локально сгущать сетку конечных элементов в зоне отверстий. Если же речь идет только о перемещениях (прогибах), то такое местное сгущение нецелесообразно, т.к. только дает незначительное уточнение прогибов при существенном росте конечно-элементных моделей.

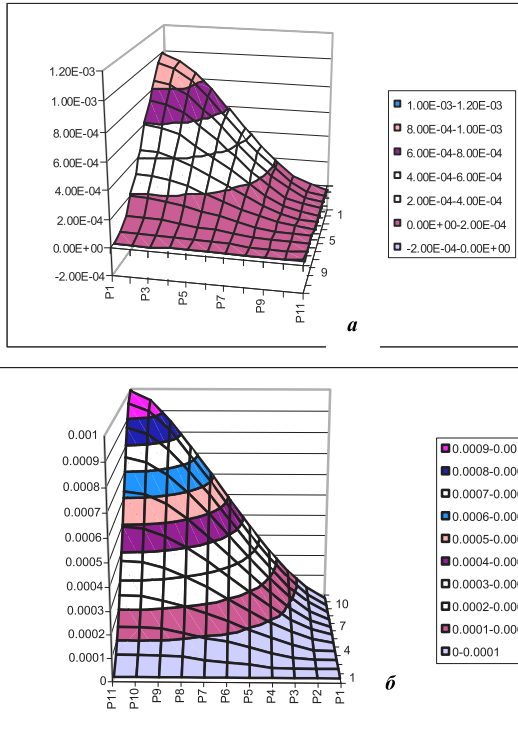


Рисунок 13 – Поля распределений прогибов сплошной и перфорированной пластин с дополнительно наклеенной фиксирующей пленкой:
а – расчет (2 мм); б – расшифровка – эксперимент

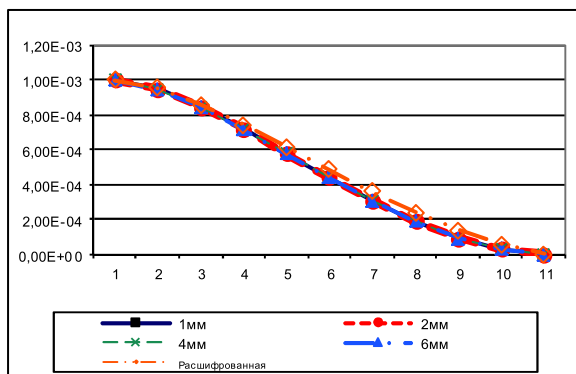


Рисунок 14 – Результаты численного сравнения экспериментальных и численных данных анализа напряженно-деформированного состояния тест-пластин (одна четверть)

Наличие тонкой регистрирующей (индикаторной) пленки, иногда применяемой для получения односвязной области фиксации голограмм вместо многосвязной, практически не искажает картину (качественно) и величины (количественно) прогибов ни сплошной, ни густоперфорированной пластин. С точки зрения фиксации и последующего сравнения результатов конечно-элементного и голографического исследования этот способ превращения многосвязной области в односвязную является удобным, правопмерным и не вносящим существенных иска-

жений в первоначальный объект.

Таким образом, на нескольких примерах были проиллюстрированы этапы обоснования параметров численных моделей НДС исследуемых объектов. На этих этапах были обоснованы типы конечных элементов, их количество и граничные условия. Это дало возможность оптимизировать технические и тактико-технические характеристики создаваемых объектов БТТ, технологической оснастки для их производства, а также других машин, агрегатов и сооружений.

Заключение

В работе описана технология расчетно-экспериментального исследования элементов механических систем, для которой характерны следующие особенности.

1. Предложенный РЭМ дает возможность организовывать самокорректирующийся процесс расчетно-экспериментальных исследований, основным результатом которого является достоверная расчетная параметрическая модель элементов механических систем.

2. Общая постановка и схема построения программно-аппаратного комплекса на базе расчетно-экспериментального метода и специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза предполагает решение следующих задач: определение структуры ПАК; организация информационных потоков; разработку конкретной структуры программно-аппаратной реализации предложенных подходов и численную реализацию.

3. Предложенный РЭМ устраняет противоречие, следующее из линейного характера процесса исследований в традиционной их постановке.

4. Разработанная технология расчетно-экспериментальных исследований встраивается в цикл проектирования, исследования, технологической подготовки производства и изготовления элементов машиностроительных конструкций, в т.ч. – деталей объектов бронетанковой техники.

5. Предложена схема определения значимых факторов расчетных моделей элементов механических систем по результатам экспериментальных исследований. Для изучения влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров на НДС наиболее нагруженных и ответственных деталей исследуемых объектов предлагается производить комплекс экспериментальных исследований, в которых при варьировании условий определяется реакция исследуемого объекта. При этом представляется возможным построение сбалансированных расчетных моделей с необходимым уровнем детализации.

По результатам опыта использования предложенного метода в условиях исследования реальных конструкций можно заключить:

1. Метод обеспечивает высокую эффективность, оперативность, достоверность, точность и низкую стоимость исследований.

2. Результатом применения метода (или его частичной схемы) могут быть или согласованные распределения искомых перемещений, напряжений, деформаций, или согласованная расчетная модель, готовая для прове-

дения дальнейших расчетов.

3. Класс конструкций и явлений, на которые может быть распространен предложенный метод исследований, достаточно широк, а сам метод достаточно гибок и легко модифицируем.

4. На примере ряда объектов проиллюстрирована широкая область применения разработанного подхода.

Это дает основание утверждать, что применение предложенного подхода приводит к многократному сокращению сроков, стоимости исследований, дает сбалансированную модель для анализа и оптимизации элементов машиностроительных конструкций.

Список литературы

1. **Зенкевич О.К.** Метод конечных элементов в технике / **О.К. Зенкевич.** – М.: Мир, 1975. – 541 с.
2. **Стренг Э.** Теория метода конечных элементов / **Стренг Э., Фикс Дж.** – М.: Мир, 1977. – 349 с.
3. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения: монография: [в 4 т.]. Т. 4. Методология исследования сложных систем военного назначения / **С.В. Лапицкий, А.В. Кучинский, А.И. Сбитнев [и др.]; ред.: С.В. Лапицкий.** – Киев: 2013. – 477 с.
4. **Чепков І.В.** Основні напрями розвитку озброєння і військової техніки. Організаційні і економічні механізми державної підтримки оборонної промисловості / **Чепков І.В.** // Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід (Київ, 22-23 вересня 2015 р.). – Київ: ТОВ "Міжнародний виставковий центр", 2015. – С. 8–13.
5. **Ткачук Н.А.** Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения / **Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А.** // Механіка та машинобудування, 2005. – № 1. – С.184–194.
6. **Ткачук Н.А.** Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / **Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н.** // Механіка та машинобудування, 2006. – № 1. – С.57–79.
7. **Ткачук Н.А.** Решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / **Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глушенко, А.В. Ткачук** // Механіка та машинобудування – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №2. – С.85–96.
8. **Капустин А.А.** Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов природных конструкций. В кн.: Физические основы голографии / **Капустин А.А.** – Л.: ЛИЯФ, 1979. – С.137–159.
9. **Капустин А.А.** Использование методов голографической и спекл-интерферометрии в задачах технической диагностики элементов

конструкций. В кн.: Тезисы докл. Всесоюз. научно-технической конференции "Применение лазеров в науке и технике" / **Капустин А.А., Мажура С.О.** – Ленинград, 1981. – С.116–118.

10. **Вест Ч.** Голографическая интерферометрия / **Ч. Вест.** – М.: Мир, 1982. – 504 с.

References (transliterated)

1. **Zenkevich O.K.** Metod konechnykh jelementov v tehnikе / **O.K. Zenkevich.** – Moscow: Mir, 1975. – 541 p.
2. **Streng Je.** Teorija metoda konechnykh jelementov / **Streng Je., Fiks Dzh.** – Moscow: Mir, 1977. – 349 p.
3. Osnovy voenno-tehnicheskikh issledovanij. Teorija i prilozhe-nija: monografija: [v 4 t.]. T. 4. Metodologija issledovanija slozhnykh sistem voennogo naznachenija / **S.V. Lapickij, A.V. Kuchinskij, A.I. Sbitnev [i dr.]; red.: S.V. Lapickij.** – Kiev: 2013. – 477 p.
4. **Chepkov I.B.** Osnovni napryamy rozvytku ozbrojennya i viyskovoyi tekhniki. Orhanizatsiyni i ekonomichni mekhanizmy derzhavnoyi pidtrymky oboronnoyi promyslovosti / **Chepkov I.B.** // Perspek-tyvy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrayiny: Infomatsiyno-komunikatyvnyy zakhid (Kyiv, 22-23 veresnya 2015 r.). – Kyiv: TOV "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015. – P. 8–13.
5. **Tkachuk N.A.** Struktura specializirovanykh integriro-vannykh sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza jelementov transportnykh sredstv special'nogo naznachenija / **Tkachuk N.A., Brul' S.T., Malakej A.N., Gricenko G.D., Orlov E.A.** // Mehanika ta mashinobuduvannya, 2005. – No 1. – P.184–194.
6. **Tkachuk N.A.** Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnykh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoy generacii i parametrizovannogo opisanija / **Tkachuk N.A., Gri-cenko G.D., Chepurnoj A.D., Orlov E.A., Tkachuk N.N.** // Mehanika ta mashinobuduvannya, 2006. – Np01. – P. 57–79.
7. **Tkachuk N.A.** Reshenija zadach raschetno-jeksperimental'nogo issledovanija jelementov clozhnykh mehani-cheskikh sistem / **N.A. Tkachuk, G.D. Gricenko, Je.V. Glushhenko, A.V. Tkachuk** // Mehanika ta mashinobuduvannya – Kharkov: NTU "KhPI", 2004. – No 2. – P.85–96.
8. **Kapustin A.A.** Teorija spekl-interferometricheskikh izmerenij napryazhenno-deformirovannogo sostojanija jelementov naturnykh konstrukcij. V kn.: Fizicheskie osnovy golografii / **Kapustin A.A.** – Leningrad: LIJaF, 1979. – P. 137–159.
9. **Kapustin A.A.** Ispolzovanie metodov golograficheskoy i spekl-interferometrii v zadachah tehniche-skoj diagnostiki jelementov konstrukcij. V kn.: Tezisy dokl. Vsesojuzn. nauchno-tehniche-skoj konferencii "Primenenie lazerov v nauke i teh-nike" / **Kapustin A.A., Mazhura S.O.** – Leningrad, 1981. – P. 116–118.
10. **Vest Ch.** Golograficheskaja interferometrija / **Ch. Vest.** – Moscow: Mir, 1982. – 504 p.

Поступила (received) 19.01.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Комп'ютерне моделювання процесів і станів складних систем: обґрунтування параметрів моделей розрахунково-експериментальним шляхом / Веретельник Ю.В., Ткачук Г.В., Кохановська О.В., Храмцова І.Я., Зарубіна А.О., Кохановський В.І., Ткачук М.А., Малакей А.М., Набоков А.В., Головін А.М., Веретельник О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – № 12 (1234). – С. 14–25. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0775.

Компьютерное моделирование процессов и состояний сложных систем: обоснование параметров моделей расчетно-экспериментальным путем / Веретельник Ю.В., Ткачук А.В., Кохановская О.В., Храмцова И.Я., Зарубина А.А., Кохановский В.И., Ткачук Н.А., Малакей А.Н., Набоков А.В., Головин А.М., Веретельник О.В. // Вестник НТУ "ХПІ". Серия: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПІ", 2017. – № 12 (1234). – С. 14–25. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0775.

Computer modeling of processes and states of complex systems: justification of model parameters by computational and experimental way / **Veretelnik Yu.V., Tkachuk AV, Kokhanovska O.V., Khramtsova I.Ya., Zarubina A.A., Kokhanovsky V.I., Tkachuk N.A., Malakey A.N., Nabokov A.V., Golovin A.M., Veretelnik O.V.** //

Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – № 12 (1234). – P. 14–25. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Веретельник Юрій Вікторович – ТОВ "БІП Україна", Одеса.

Веретельник Юрій Вікторович – ООО "БИП Украина", Одесса.

Veretelnyk Yuriy – "BIP Ukraine", Odessa.

Ткачук Ганна Володимирівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ "ХПІ", старший науковий співробітник кафедри "Інформаційні технології і системи колісних і гусеничних машин ім. О.О. Морозова", тел.: (057) 707-63-35.

Ткачук Анна Владимировна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТУ "ХПИ", старший научный сотрудник кафедры "Информационные технологии и системы колесных и гусеничных машин им. А.А. Морозова", тел.: (057) 707-63-35.

Tkachuk Ganna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, NTU "KhPI", Senior Researcher at Information Technology and Systems of Wheeled and Tracked Machines behalf of A.A. Morozov Department; tel.: (057) 707-63-35.

Кохановська Ольга Владиславівна – НТУ "ХПІ", провідний інженер кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 7076672.

Кохановская Ольга Владиславовна – НТУ "ХПИ", ведущий инженер кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел.: (057) 7076672.

Kokhanovska Olga – NTU "KhPI", lead engineer of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 7076672.

Храмцова Ірина Яківна – НТУ "ХПІ", науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01.

Храмцова Ирина Яковлевна – НТУ "ХПИ", научный сотрудник кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: (057) 707-61-66; e-mail: iyakhram@gmail.com.

Khramtsova Irina – NTU "KhPI", research associate of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01.

Зарубіна Алла Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, НТУ "ХПІ", професор кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01.

Зарубина Алла Александровна – кандидат технических наук, доцент, НТУ "ХПИ", профессор кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел.: (057) 707-69-01.

Zarubina Alla – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, NTU "KhPI", Professor of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01

Кохановський Володимир Ілліч – кандидат технічних наук, керівник відділу впровадження CAD/CAM систем, ПАТ "У.П.Е.К.", тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Кохановский Владимир Ильич – кандидат технических наук, руководитель отдела внедрения CAD/CAM систем, ПАТ "У.П.Е.К.", тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Kokhanovskiy Volodymyr – Ph.D., Head of implementation of CAD/CAM-systems Department, UPEC Industrial Group, tel.: (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Ткачук Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, НТУ "ХПІ", завідувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Ткачук Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор, НТУ "ХПИ", заведующий кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Tkachuk Mykola – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, NTU "KhPI", Chief of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Малакей Андрій Миколайович – заступник генерального директора з якості ДП "Завод ім. Малишева", Харків; тел. (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Малакей Андрей Николаевич – заместитель генерального директора по качеству ГП "Завод им. Малышева", Харків; тел. (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Malakei Andrii – deputy general director for quality at "Malyshev Plant", Kharkov; tel.: (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Набоков Анатолій Володимирович – НТУ "ХПІ", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 7076901.

Набоков Анатолий Владимирович – НТУ "ХПИ", аспирант кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел.: (057) 7076901.

Nabokov Anatoliy – NTU "KhPI", post-graduate student of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 7076901.

Головін Андрій Михайлович – НТУ "ХПІ", студент гр. ТМ-84б кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин", тел.: (057) 707-69-01.

Головин Андрей Михайлович – НТУ "ХПИ", студент гр. ТМ-84б кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел.: (057) 707-69-01.

Golovin Andrey – NTU "KhPI", student gr. ТМ-84b of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01.

Веретельник Олег Вікторович – НТУ "ХПІ", молодший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин"; тел.: (057) 707-69-01.

Веретельник Олег Викторович – НТУ "ХПИ", младший научный сотрудник кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел.: (057) 707-69-01;

Veretelnyk Oleg – NTU "KhPI", junior researcher of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: (057) 707-69-01