

**Н.А. ТКАЧУК**, зав. каф. ТММиСАПР, докт. техн. наук,  
**Г.Д. ГРИЦЕНКО**, проф. каф. ТММиСАПР, канд. техн. наук,  
**А.Н. ТКАЧУК**, бакалавр каф. ДПМ,  
**А.В. БОНДАРЕНКО**, бакалавр каф. КГМ, НТУ „ХПИ”,  
**С.Т. БРУЛЬ**, начальник Центрального бронетанкового  
управления вооружения Главного управления логистики Командования  
сил поддержки Вооруженных Сил Украины, г. Киев

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Запропоновані теоретичні основи розрахунково-експериментального методу для обґрунтування параметрів числових моделей елементів механічних систем, які застосовуються для досліджень елементів корпусів транспортних засобів методами скінченних елементів і голографічної інтерферометрії.

Theoretical bases of computational and experimental method are offered for the ground of numerical models' parameters of elements of mechanical systems which are used for researches of elements of transport vehicles' hulls by the finite-element methods and holographic interferometry.

**Введение.** Численное моделирование физико-механических процессов в сложных механических системах является составным этапом процесса проектно-исследовательских работ при разработке и подготовке производства новых изделий. В числе основных при этом возникает задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов проектируемых конструкций, решаемая в современных условиях во многих случаях при помощи моделирования с использованием CAD/CAE-систем высокого уровня (ANSYS, NAS-TRAN и др.), реализующих метод конечных элементов (МКЭ).

Однако при этом во многих случаях возникает проблема оценки достоверности результатов, получаемых при численном моделировании реакции исследуемых систем на различные виды воздействий. Чаще всего эта проблема решается 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 метода конечных элементов – типы применяемых конечных элементов, их размеры, расположение зон сгущения-разрежения конечно-элементных сеток). Существенны-

ми 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 целом ряде работ [1-6] предложены и развиты подходы, основанные на применении расчетно-экспериментальных технологий исследований, соединяющих, например, МКЭ и голографическую интерферометрию [7-10] в рамках единого исследовательского процесса. В данной работе эти подходы модифицируются и иллюстрируются на примере исследования конкретного класса объектов – фрагментов пластинчато-оболочечно-стержневых конструкций в виде пластин разной толщины с различными системами отверстий и с различными способами сварного соединения.

### Общая технология исследований.

Одним из основных вопросов при проведении исследования напряженно-деформированного состояния сложных механических объектов является вопрос адекватности применяемых численных моделей, точности и достоверности получаемых численными методами результатов. В связи с этим большое развитие в последнее время получили методы исследований прочностных и жесткостных характеристик элементов механических систем, сочетающие численные и экспериментальные этапы. В частности, в [1-3] описаны расчетно-экспериментальные методы, сочетающие возможности метода конечных элементов, методов спекл-голографической интерферометрии (МСГИ), электротензометрии и непосредственных измерений. При этом схемы исследований, предлагаемые в данных работах, отличаются от традиционной. Традиционный подход (рис. 1), направленный на исследование конкретного объекта, параметра, эффекта, 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



Рис. 1. Традиционная схема расчетно-экспериментальных исследований

моделью

$$F_M(P_M) = 0, \quad (1)$$

где  $P_M$  – массив параметров, определяющих состояние модели;  $F_M$  – некоторый оператор.

Численная и экспериментальные исследования позволяют установить зависимости

$$F_N(P_N) = 0, \quad F_E(P_E) = 0, \quad (2)$$

где  $P_N, P_E$  – массивы параметров, определяющих численные и экспериментальные модели (образцы);  $F_N, F_E$  – соответствующие операторы.

При использовании традиционной схемы происходит сопоставление как параметров  $P_M, P_N, P_E$ , так и зависимостей между ними, описываемых  $F_M, F_N, F_E$ , 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  $F_M, F_N, F_E$ , а и между множествами тех и других (рис. 2).

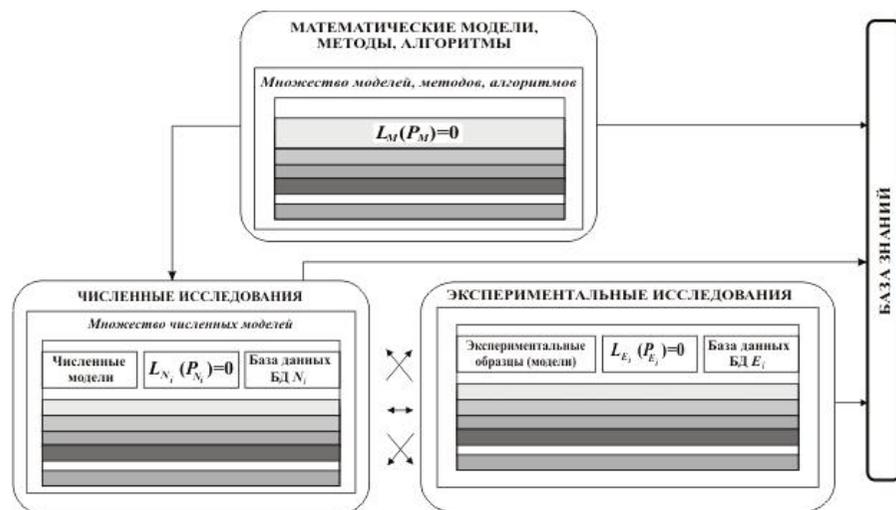


Рис. 2. Предлагаемая схема расчетно-экспериментальных исследований

Это позволяет использовать при организации баз данных, содержащих результаты численных и экспериментальных исследований, описывающих различные механические системы, проводимые в различное время различны-

ми исследователями с применением различной аппаратуры, различных численных методов, различных вычислительных методов и средств, и устанавливать искомые зависимости. 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.

Естественно, что 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. Более того, в большом количестве случаев могут выявиться противоречия между сопоставляемыми данными, причем они могут на первый взгляд просто взаимно исключать друг друга.

Однако такое состояние предлагаемой схемы соответствует в общих чертах состоянию знаний во многих отраслях науки и техники. Это нормальный процесс установления новых, уточнения и опровержения старых представлений о поведении объекта (машин, узлов, механизмов, агрегатов и т.д.). В практике проектировщиков нередки случаи, когда конструкторы, исследователи с большим опытом работы по памяти устанавливают аналогии между элементами нового проекта, находящегося в разработке, с элементами своих или чужих проектов, выполненных гораздо раньше. Это находит в последующем подтверждение при сопоставлении моделей и результатов. Таким образом, предлагаемый подход является в некоторой степени схемой, действующей в практике проектирования: накопление данных, выявление аналогий и установление зависимостей.

**Примеры применения.** В качестве примеров использования предложенного расчетно-экспериментального метода исследований рассмотрим фрагменты пространственных пластинчато-оболочечно-стержневых конструкций. Во многих случаях их конструктивное исполнение, отношение толщины сечения к габаритам или способ соединения этих фрагментов заставляют сомневаться в обоснованности применения классических моделей поведения тонкостенных элементов конструкций при описании напряженно-деформированного состояния. Естественно, что и конечно-элементные модели (КЭМ), построенные на этой базе (например, с применением SHELL-, BEAM-элементов), также могут страдать неустраняемыми при сгущении и изменении формы погрешностями. Чис-

ленные эксперименты и аналитические оценки для определения такого типа погрешностей неэффективны, поскольку для первых характерен охват только конкретного набора случаев, а вторые во многих случаях дают только асимптотические оценки. Все это обусловило необходимость «прямого» сравнения результатов численных расчетов, получаемых при использовании МКЭ, и экспериментальных. В качестве последнего предлагается использовать метод голографической интерферометрии (МГИ) [7-10]. Поскольку скорость получения численных результатов для выбранных объектов практически мгновенна, то основное внимание было уделено трудоемкому этапу экспериментальных исследований.

### 3. Объекты исследования

Исследуются квадратные стальные пластины 180x180 (мм) (рис. 3), заземленные по контуру. Толщины пластин варьировались от 1 мм до 5 мм. В некоторых из них – системы регулярно расположенных отверстий, некоторые изготовлены с помощью сварки (см. рис. 3). Основным решаемым вопросом является допустимость моделирования напряженно-деформированного состояния этих объектов при помощи пластинчатых конечных элементов (КЭ).



Пластина, сваренная из 2-х равных прямоугольников



Пластина, сваренная из 2-х равных треугольников

Рис. 3. Примеры объектов исследований

**4. Выбор варианта фиксации голографических интерферограмм.** Для получения наиболее достоверной информации в результате экспериментальных исследований предлагается использование метода спекл-голографической интерферометрии [7-10]. В отличие от других экспериментальных методов (метод непосредственных измерений, электротензометрии и др.) данный метод позволяет получать полные непрерывные картины распределения перемещений точек поверхности исследуемых элементов непосредственно на объекте измерения.

Поскольку предложенный в работах [1-6] расчетно-экспериментальный метод характеризуется высокой гибкостью, то при его использовании в каждом конкретном случае возникает задача рационализации общей схемы исследования и каждого этапа в отдельности. В частности, к методу спекл-голографической интерферометрии предъявляются следующие требования:

- максимальная информативность при минимальных сроках, стоимости и количестве привлекаемых исследователей;
- наличие достаточно простых и эффективных способов исключения смещений тела как жесткого целого из картины его деформированного состояния;
- возможность варьирования диапазонов различных типов нагрузок (реализации отличных от простых законов нагружения с целью обнаружения влия-

ния каждого силового фактора на общую картину деформирования; последнее связано с тем, что различные силовые факторы по разному оказывают влияние на разных этапах нагружения на напряженно-деформированное состояние исследуемых элементов, и при малой величине перемещений от действия данного фактора по сравнению с аналогичными перемещениями от действия других факторов составляющая от перемещений от действия указанного фактора „теряется” („тонет”, „размывается”) в общей картине получаемых спекл-интерферограмм).

Сформулированным требованиям удовлетворяет предложенный ранее вариант метода спекл-голографической интерферометрии, использующий схему записи спекл-интерферограмм во встречных пучках с размещением регистрирующей среды непосредственно на объекте исследований или в непосредственной близости от него [10]. При этом достаточно просто определяются нормальные и тангенциальные составляющие вектора перемещений точек исследуемой поверхности.

Подбор диапазонов нагрузок, позволяющих „проявить” эффект от действия того или иного силового фактора, может быть осуществлен как с использованием метода „живых полос”, так и проведением дополнительных измерений (возможно, с применением других методов: непосредственных измерений, тензометрии и т.д.).

Метод конечных элементов, применяемый для численных расчетов напряженно-деформированного состояния элементов механических систем на расчетных этапах, наряду с такими возможностями, как учет неоднородности, анизотропии свойств материалов, нелинейность их физико-механических характеристик, обладает и таким ценным свойством, как возможность адаптации для работы с данными, представляемыми в различных форматах (табличный, графический, аналитический и т.д.). Это свойство особенно необходимо при организации взаимосогласованной работы программного обеспечения МКЭ с данными, получаемыми на экспериментальных этапах. При совместном использовании с методом спекл-голографической интерферометрии в расчетно-экспериментальных исследованиях программное обеспечение, реализующее метод конечных элементов, должно удовлетворять требованиям:

- согласованность величин нагрузок на расчетную модель с нагрузками, прикладываемыми при проведении экспериментальных исследований (с целью повышения точности определения количественного соответствия полученных результатов, а также для удобства визуальной идентификации получаемых на различных этапах картин распределения перемещений точек поверхности объектов);
- подготовка выходной информации в различных формах: табличной для численного сравнения, графической – для наглядности и т.д.;
- возможность учета реальных граничных условий, моделирующих различные типы сопряжения с другими элементами исследуемых систем;
- использование при подготовке конечно-элементных моделей параметризованных твердотельных пространственных моделей, получаемых при помощи современных систем автоматизированного проектирования.

Сформулированные требования в каждом конкретном случае в сочетании с целями и задачами исследований дают возможность разработать соответствующие планы экспериментов и расчетов.

**5. Экспериментальная установка.** Для исследований привлекалась голографическая установка СИН-1 (рис. 4), на столе которой размещалось нагрузочно-фиксирующее устройство „КРАБ” (рис. 5). Это устройство создает закрепление пластин по контуру с нагружением силовым винтом (или виброактуатором) с тыльной части, оставляя свободным фронтальную часть, со стороны которой и проводится фиксация интерферограмм Денисюка методом двойной экспозиции (статика) или методом усреднения во времени (собственные формы колебаний) [7-10] (рис. 6).



Рис. 4. Голографическая установка СИН-1



Рис. 5. Нагрузочно-фиксирующее устройство „КРАБ”

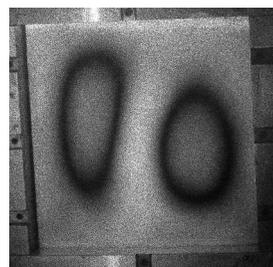
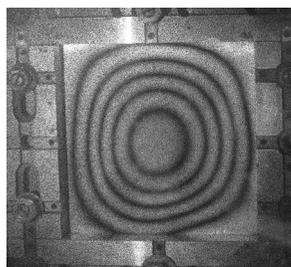


Рис. 6. Примеры интерферограмм (статика и собственные колебания)

**6. Результаты экспериментов.** На рис. 7 представлены некоторые голографические интерферограммы объектов, полученные в ходе экспериментов на созданной установке.

**7. Анализ результатов.** Для количественного анализа результатов можно применить различные методы, предлагаемые в работах [1-5]. В то же время первичные оценки можно сделать на основе качественного визуального анализа интерферограмм. Представленные картины интерференционных полос (см. рис.7, а) свидетельствует о том, что все исследуемые объекты ведут себя в соответствии с предполагаемым характером деформирования пластин, несмотря на разницу толщин, диаметров и способа размещения отверстий, а также способов сварного соединения.



Рис. 7. Примеры интерферограмм (сплошные и перфорированные пластины)

Для количественного сравнения проанализированы распределения перемещений пластин при действии центральной изгибающей силы (эксперимент) и для каждого случая полученные численно на моделях с различным количеством конечных элементов (расчет картины) (рис. 7,б). Анализ показал, что уже при небольшом количестве конечных элементов (2-3 тысячи) наблюдается удовлетворительное соответствие результатов (до  $1 \div 1,5\%$ ). Эти конечно-элементные сетки и были рекомендованы для дальнейших расчетов реальных конструкций.

Для оценки точности моделирования инерционно-жесткостных свойств можно сравнить спектры собственных колебаний, полученные численно и экспериментально (рис. 7, в). Уровень допустимой погрешности составляет 5-7 %, что позволяет рекомендовать КЭМ подобного типа для анализа динамических процессов в реальных конструкциях.

**Заключение.** Полученные результаты экспериментальных исследований, кроме подтверждения адекватности, определения параметров достоверных численных моделей и оценки точности результатов моделирования, могут послужить основой для более широкого рассмотрения при сопоставлении результатов множеств численных и экспериментальных исследований. Результаты этих сопоставлений могут выражаться как в виде количественных, так и качественных соотношений. Например, выводы об аналогичном характере напряженно-деформированного состояния пластин с аналогичной геометрией и о применимости для определения их прочностных и жесткостных характеристик пространственных моделей является примерами качественных выводов. Примером количественных могут быть: определение погрешностей результатов численных исследований в сравнении с экспериментальными данными, вычисление коэффициента влияния отверстий в пластинах исследованных конфигураций на их напряженно-деформированное состояние и т.д.

Естественно, что круг исследуемых вопросов, количество рассматриваемых соответствий и варьируемых параметров можно расширять. Важно отметить, что в данном случае использованы результаты ранее проведенных экспериментальных исследований. Это избавляет исследователей от необходимости проведения целой серии дополнительных дорогостоящих экспериментов и экономит время. Кроме того, имеющиеся базы данных позволяют прогнозировать поведение еще

не созданных образцов новой техники, причем в некоторых случаях произвести даже оценку допускаемой при таком прогнозе погрешности.

Предложенный 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 расчетно-экспериментальных методов.

В дальнейшем планируется более подробный количественный анализ полученных результатов численных и экспериментальных исследований.

**Список литературы: 1.** Капустин А.А., Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем. – В сб.: Динамика и прочность машин. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 1999. – Вып.57. – С.148-155. **2.** Ткачук Н.А. Комбинированные расчетно-экспериментальные методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем. – Механіка та машинобудування. – 1999. – №1. – С.37-46. **3.** Ткачук Н.А. Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем. – В сб.: Динамика и прочность машин. – 1998. – Вып.56. – С.175-181. **4.** Гриценко Г.Д., Гладких В.И., Капустин А.А., Орлов Е.А., Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов механических систем: математическое, численное и экспериментальное моделирование // Вісник НТУ “ХПІ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – № 60. – С.44-67. **5.** Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Липовецкий Л.С., Глуценко Э.В., Гоголь Н.А. Методика экспериментального исследования элементов механических систем методом голографической интерферометрии // Механіка та машинобудування. – 2005. – №1. – С.88-99. **6.** Головченко В.И., Барчан Е.Н., Пеклич М.М., Ткачук А.Н. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния пространственных крупногабаритных конструкций // Вісник НТУ “ХПІ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ “ХПІ”, 2006. – № 3. – С.49-57. **7.** Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с. **8.** Капустин А.А. Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций / В кн.: Физические основы голографии. – Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.137–159. **9.** Капустин А.А. Методы, использующие голографическую интерферометрию для спекл-интерферометрических измерений / В кн.: Методические указания / Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий. – Горький: ГФ. ВНИИМАШ, 1980.– С.45–53. **10.** Капустин А.А. Количественная оценка голографических интерферограмм с помощью спекл-интерферометрии в прочностных исследованиях / В кн.: Оптико-когерентные информационно-измерительные системы. – Харьков, 1977. – С.149–154.

Поступила в редколлегию 05.12.07