

УДК 539.3: 621.9: 004.94

*Н. А. ТКАЧУК, А. В. ХЛАНЬ, А. В. НАБОКОВ, А. В. ГРАБОВСКИЙ,
Д. В. БИБИК, А. В. ТКАЧУК, М. С. САВЕРСКАЯ*

СИНТЕЗ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТНЫХ И ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Описано загальний підхід до синтезу проектно-технологічних рішень при проектуванні та технологічній підготовці виробництва виробів на машинобудівних підприємствах України. Основою прийняття рішень є критерії міцності та жорсткості елементів цих виробів. На прикладі низки машинобудівних конструкцій проілюстровані етапи та результати досліджень.

Ключові слова: проектно-технологічне рішення, міцність, жорсткість, легкоброньована машина, тактико-технічна характеристика, елемент штампової оснащення

Описан общий подход к синтезу проектно-технологических решений при проектировании и технологической подготовке производства изделий на машиностроительных производствах Украины. Основой принятия решений является критерий прочности и жесткости элементов этих изделий. На примере ряда машиностроительных конструкций проиллюстрированы этапы и результаты исследований.

Ключевые слова: проектно-технологическое решение, прочность, жесткость, легкобронированная машина, тактико-техническая характеристика, элемент штамповой оснастки.

A general approach to the design and technological solutions synthesis in the design and technological preparation of products at machine-building plants in Ukraine is described. The basis for decision-making is the criterion of strength and rigidity of these products elements. Stages and results of studies are illustrated using the example of a number of machine-building designs. In particular, the stress-strain state of the elements of separation stamps, devices for welding, base plates for machine tools has been studied. Also, the deformed state of assemblies from a set of universal collection devices, adjustable vices and molds was investigated. The developed approaches, models, methods and means of research are applicable to a wide range of engineering structures.

Keywords: design and technological solution, strength, rigidity, lightly armored vehicle, tactical and technical characteristics, die tooling element.

Введение. Анализ состояния вопроса проектирования, изготовления и эксплуатации различных машиностроительных конструкций отечественных и зарубежных боевых бронированных машин (ББМ) [1–5] позволяет сделать вывод о том, что для современного бронетанкостроения характерны высокие требования к техническим (особенно рельефно выделяются данные тенденции в сфере производства вооружения и военной техники) и тактико-техническим характеристикам (ТТХ) этих машин, а также их систем и агрегатов. В частности, среди тенденций современного бронетанкостроения можно выделить следующие:

– концептуальная проработка проектов новых боевых машин XXI века, в том числе на основе использования новых физических процессов, специальных конструкционных материалов и компоновок (интенсивно разрабатывается целый ряд доктрин новой боевой машины будущего);

– глубокая модернизация состоящих на вооружении танков и легких бронированных машин (ЛБМ) с целью повышения их тактико-технических характеристик с ограниченными затратами на проектные работы, испытания и технологическую подготовку производства (ТПП);

– бурное развитие легкобронированных колесных и гусеничных машин (как вновь проектируемых, так и модернизируемых) с приданием им некоторых ТТХ, характерных для тяжелых бронированных машин;

– резкое повышение требований к точности и мощности вооружений, к удельной мощности, экономичности и экологичности силовой установки, к автоматизации управления процессами функционирования всех систем и агрегатов на базе бортовых компьютеров, к улучшению маневренности, комфортности обитания экипажа и десанта, а также к высокой степени защиты от действия поражающих факторов разнообразной природы;

– создание современных технологичной сквозного проектирования, испытаний, технологической подготовки производства ББМ, которые позволяют оперативно откликаться на современные тенденции в развитии вооружений и проводить изменение конструкций, а также обеспечивать изготовление деталей и узлов новых изделий в предельно сжатые сроки с высокой точностью.

Таким образом, проблема создания принципиально новой машины или глубокой модернизации существующих образцов представляет собой в современных условиях масштабную задачу. В этой проблеме наряду с проектными работами, испытаниями и исследованиями большое место занимает процесс ТПП и, соответственно, изготовление изделия.

В данном случае необходимо вычленив 2 аспекта проблемы, связанные с производством тяжелых боевых машин и легкобронированных машин.

С одной стороны, для отечественного производства специальных транспортных средств на современном этапе наряду с созданием новых представляет интерес вариант модернизации существующих легкобронированных машин, поскольку при этом обеспечивается: экономия на стадии проектных работ; экономия на этапе технологической подготовки; конкурентоспособность на мировом рынке вооружений модернизированных машин, имеющих удовлетворительный уровень ТТХ и в то же время – относительно низкую стоимость. Этому способствует также большое распространение в мире ЛБМ советского производства и, соответственно, сформировавшийся рынок заказчиков.

Кроме того, в условиях ведения боевых действий в восточных областях Украины ремонт и восстановление техники можно совмещать с мероприятиями по модернизации.

С другой стороны, при этом для производства танков характерна высокая степень проработанности конструкций новых машин, освоенных в серийном производстве, вариантов модернизации устаревших машин, а также интенсивная проработка конструкций новых машин. В данном случае сдерживающим фактором является не отсутствие проектных наработок, а проблемы технологической подготовки производства.

Стремительность процесса повышения тактико-технических характеристик отечественных и зарубежных образцов бронетанковой техники обеспечивается ускорением и качественным изменением самого характера процессов проектирования, исследования и ТПП. В частности, данные процессы приобретают вид замкнутого автоматизированного взаимодействия разработчиков, исследователей, испытателей и технологов в рамках единой базы данных с возможностью взаимобмена информацией и сквозной ассоциативной связью. Несомненно, что этот путь является магистральным как в общемировом масштабе, так и в плане долгосрочной перспективы. Эти черты присущи и предприятиям отечественного бронетанкостроения.

В результате приходим к ситуации, когда объективно необходимо решение задачи синтеза проектно-технологических решений по критериям прочностных и жесткостных характеристик машиностроительных конструкций, а инструменты для ее решения несовершенны. В то же время необходимы методы обоснования технических решений, которые обеспечивают высокие ТТХ создаваемых изделий. Однако на сегодня достаточно общего подхода разработанных методов, моделей и средств решения данной проблемы не существует. Это обуславливает актуальность задачи разработки методов синтеза таких решений.

Состояние вопроса. Критериальные требования к техническим и тактико-техническим характеристикам ББМ [1–3] предполагают удовлетворению комплексу уровней компонент ТТХ за счет соответствующих технических решений. При этом требуется создание математического аппарата для оперирования с различной информацией: проектные модели, технологические режимы, эксплуатационные требования, характеристики средств поражения и т.п. Для этих целей естественным образом необходим метод обобщенного параметрического моделирования [6–10]. Этот метод, развитый и адаптированный для сформулированного выше круга задач, был принят в качестве базового на этапе исследования и обоснования проектно-технологических решений для машиностроительных конструкций по критериям прочности и жесткости (на примере элементов объектов бронетанковой техники (ЭОБТТ) и технологических систем для их изготовления).

Системный подход к автоматизации процесса проектирования, исследования и изготовления деталей объектов бронетанковой техники. При рассмотрении проблемы автоматизации процесса проектирования, исследования и изготовления деталей объектов бронетанковой техники плодотворно использовать системный подход [7, 11, 12]. Сами боевые машины, представляющие собой сложные системы, с точки зрения системного подхода имеют специфические исходные источники создания. Изменяющиеся во времени потребности конкретизируются в тактико-технических характеристиках. Боевые бронированные машины на протяжении всего цикла жизни описываются целым рядом параметров (конструктивных, технологических, эксплуатационных, а также режимов боевого применения). При этом сама машина, представляющая собой сложную разнокомпонентную систему, в процессе создания требует проведения целого ряда исследований, в том числе определения напряженно-деформированного состояния (НДС) наиболее нагруженных и ответственных элементов для обоснованного выбора основных конструктивных параметров. Необходимо проведение многовариантных исследований для определения реакции элементов транспортного средства на внешние воздействия. Аналогичные исследования проводятся и при проектировании и исследовании элементов технологической оснастки (ЭТО) для производства деталей транспортных средств специального назначения (рис. 1). Речь в данном случае идет о повышении точности изготовления деталей и обеспечении, соответственно, высоких ТТХ боевых машин.

Таким образом, процесс создания боевых бронированных машин представляет собой (см. рис. 1) единый цикл взаимосвязанных этапов. При этом на всех этапах производится интенсивный обмен информацией. Важной особенностью этой информации является ее двунаправленность и итерационный многоша-



Рис. 1 – Этапы создания боевых бронированных машин и элементов технологической оснастки для их изготовления

говый характер уточнения на основе решения глобальных и локальных задач анализа, синтеза, оптимизации и компромиссов. Например, изменение конструкции того или иного узла или детали проектируемого объекта бронетанковой техники на любом из этапов проектирования влечет необходимость изменения соответствующего элемента технологической оснастки или технологических режимов обработки. И наоборот, любые технологические ограничения на любом из этапов ТПП предполагают изменение конструкторской документации на детали проектируемого основного изделия. Для оперативного обеспечения такого типа связей в системах автоматизированного проектирования высокого уровня используются принципы **параметричности** и **ассоциативности**.

В современных условиях процессы проектирования, конструирования, изготовления и исследования элементов бронетанковой техники представляются совокупностью CAD/CAM/CAE/PDM – систем, интегрированных в той или иной степени в составе единой системы (рис. 2).

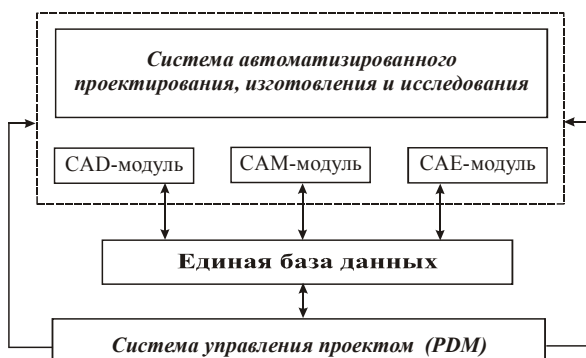


Рис. 2 – Схема обмена информацией в единой интегрированной CAD/CAM/CAE/PDM-системе

Для современных компьютерных систем характерно соединение функций CAD, CAE, CAM, PDM – систем в интегрированных CAD/CAE/CAM/PDM – системах с единой базой данных (см. рис. 2). При этом тенденция эта является ведущей (примеры: ProENGINEER (Creo), CATIA, SolidWorks). Данное соединение приносит очевидные преимущества: беспроблемный обмен данными; оперативность; сквозная параметричность; ассоциативность; возможность создания внутренних оптимизационных процедур, включая математическое моделирование физических процессов; расширение базы параметров (наряду с геомет-

рической частью появляется часть, содержащая негеометрическую: температуру, нагрузки, напряжения, технологические параметры и т.д.); возможность комплексного решения проблемы создания сквозной автоматизированной системы в цепи "проектирование – конструирование – исследование – изготовление – управление проектом – управление документооборотом"; возможность создания (с учетом блочно-модульной структуры и наличия средств интеграции) системы автоматизированного проектирования, исследования, изготовления (САПИИ) с учетом специфических потребностей того или иного предприятия (т.е. "закрытие" потребностей предприятия с поставкой САПИИ "под ключ").

Основным недостатком универсальных систем автоматизированного проектирования высокого уровня является *неучет специфики* конструкций отечественных боевых бронированных машин, свойств специальных конструкционных материалов для изготовления деталей объектов бронетанковой техники (ДОБТТ), технологического оснащения предприятий отечественного бронетанкостроения, а также отсутствие в этих системах средств описания *трудноформализуемой специальной информации*. Это относится в первую очередь к этапу технологической подготовки производства (см. рис. 1), который в силу исторически сложившихся причин является наименее автоматизированным этапом в процессе создания боевых бронированных машин.

В связи с этим возникают следующие задачи:

- 1) формирование критериев для автоматизированного проектирования элементов ДОБТТ и технологической оснастки для их изготовления;
- 2) разработка технологий автоматизированного проектирования, исследования и изготовления, которые позволяют использовать широкие возможности и инструментарий современных систем автоматизированного проектирования высокого уровня и в то же время избавленных от их основных недостатков;
- 3) разработка технологии описания трудноформализуемых данных, встраиваемой в существующую технологию проектирования;
- 4) создание единой технологии и системы автоматизированного анализа и синтеза деталей объектов бронетанковой техники и элементов технологической оснастки для их изготовления.

В работах [4–8] этому вопросу уделено значительное внимание. Определены пути создания специализированных интегрированных систем проектирования, исследования и технологической подготовки деталей объектов бронетанковой техники и элементов технологической оснастки для их производства. Созданные программные средства были использованы для решения задач анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза по критериям прочностных и жесткостных характеристик некоторых машиностроительных конструкций.

Результаты исследований. Для иллюстрации эффективности работы предложенных подходов, моделей и методов рассмотрим решение задач оперативного анализа и синтеза структуры и параметров расчетных моделей и элементов технологической оснастки.

1. Система автоматизированного анализа и синтеза параметров переналаживаемых штампов в системе "САПР-ШТАМП". Для современного машиностроительного производства характерна тенденция интенсификации процессов проектирования, ТПП и изготовления. Это приводит к необходимости интенсификации также и процессов исследования прочностных и

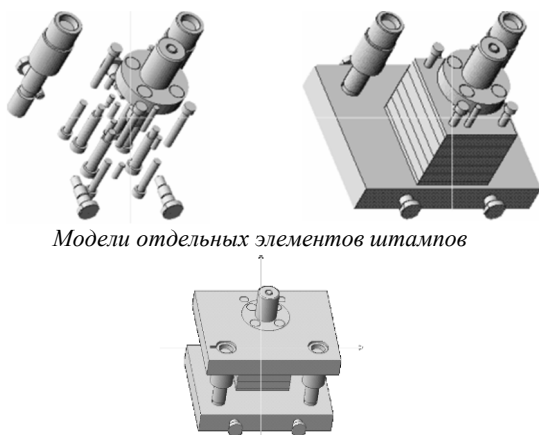
жесткостных характеристик элементов технологических систем, используемых для изготовления продукции. В частности, актуальной является задача построения специализированных систем, сопряженных с существующими и разрабатываемыми САПР штампов для листовой штамповки. При этом их важнейшим свойством должен быть более полный учет специфики условий эксплуатации, нагружения и взаимодействия элементов исследуемых объектов.

При разработке комплекса методов, алгоритмов и программного обеспечения необходимо удовлетворить следующим требованиям: непосредственная связь с CAD/CAM системами; работа в режиме реального времени; автоматизация всех этапов исследований и учет контактного взаимодействия в технологических системах.

При этом схема решения задач в рамках систем автоматизированного анализа и синтеза (СААС) элементов технологических систем листовой штамповки (ЭТС-ЛС) предполагает решение следующего комплекса проблем: классификация объектов исследования; определение условий нагружения; определение условий сопряжения; идентификация расчетных моделей; расчет напряженно-деформированного состояния ЭТС-ЛС; обеспечение наглядности отображения; организация обратной связи в САПР. Данные этапы являются предметами самостоятельных исследований и оказывают существенное влияние на результаты исследований в целом.

Технологические системы листовой штамповки представляют собой замкнутые цепочки взаимосвязанных, взаимодействующих и взаимовлияющих элементов. Данные системы штамповки включают: прессы, штампы (включая формообразующие и режущие части) и заготовку (штампующий материал). На рис. 3, 4 представлены этапы создания и примеры моделей штампов, полученные в САПР "Харьков-штамп" разработки ХНИИТМ [13].

Наибольший интерес в качестве объекта исследований с точки зрения обеспечения прочности, жесткости, долговечности представляют: режущие элементы штампов (пуансоны, матрицы, пуансон-матрицы); плиты штампов (верхняя, нижняя). Данные элементы представляют собой сложные конструкции, в состав которых входят тела вращения, пластины, стержневые конструкции и массивные тела. Соответственно выделяются 2 типа задач: расчет напряженно-деформированного состояния пуансонов, матриц и пуансон-матриц с целью обоснованного выбора технологических параметров процесса штамповки и прогнозирования ресурса инструмента; расчет НДС плит с целью обоснованного выбора их конструктивных параметров.



Модели отдельных элементов штампов
Модель штампа в графическом редакторе САПР
Рис. 3 – Этапы моделирования и анализа в САПР "Харьков-штамп"

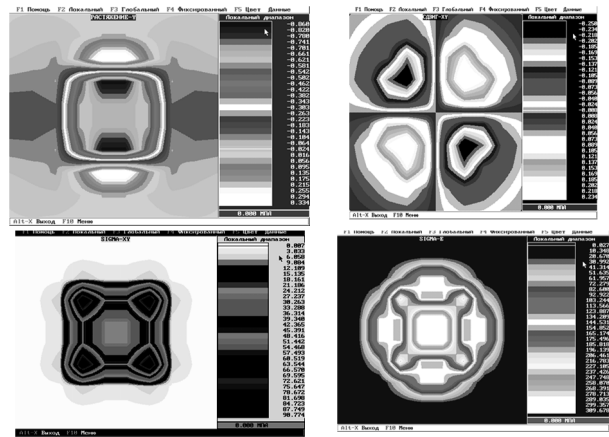


Рис. 4 – Визуализация полей напряжений штампов

Исследование функционирования разработанных систем автоматизированного анализа прочности и жесткости ЭТС в САПР штампов показало высокую их эффективность для снижения металлоемкости оснастки, рационального подбора ее параметров и сокращения сроков и стоимости проектирования.

Определение характера физического процесса и значимых параметров на примере базовых плит для сварочных работ. Речь идет об уточнении типа оператора начально-краевой задачи и констант, описывающих характеристики материалов.

Например, для густоперфорированных плит с подкрепляющими ребрами (рис. 5) важно определить характер напряженно-деформированного состояния (или существенно 3-мерное, или комбинация плоского НДС и НДС изгиба пластин; если верно последнее, то возможно ли моделирование густоперфорированных областей анизотропными пластинчатыми элементами с эквивалентными в некотором смысле параметрами; если указанная замена возможна, то каковы характеристики "эквивалентная толщина – эквивалентные свойства материала").



Рис. 5 – Плита УСПС

На рис. 6 представлена модель базовой плиты для универсально-сборных приспособлений для сварочных

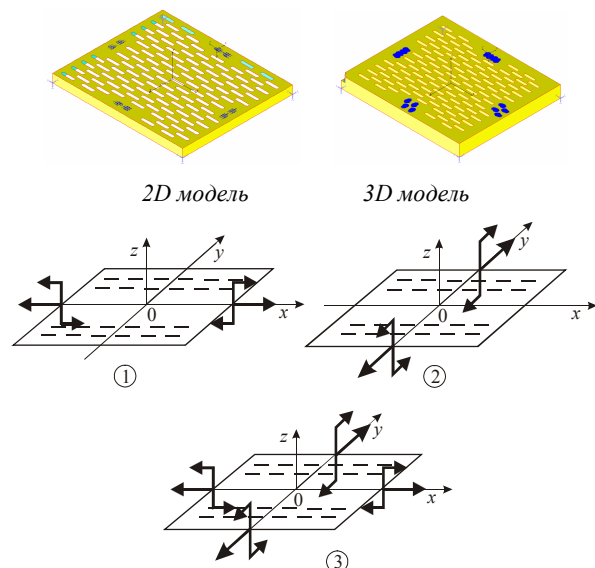


Рис. 6 – Модель плиты УСПС и схемы ее нагружения

работ (УСПС) и схемы ее нагружения (силы и моменты вдоль двух осей, прикладываемые симметричным образом к зонам в районе отверстий). Размеры базового варианта конструкции плиты в плане 272x320 мм, толщина – 9 мм, высота с ребром жесткости – 40 мм. Угловые точки плиты закреплены от смещений.

Поскольку базовая плита представляет собой тонкостенную густоперфорированную конструкцию, то закономерно возникает вопрос о конечно-элементном моделировании напряженно-деформированного состояния: применима ли в данном случае Shell-модель и какова погрешность расчета по сравнению с Solid-моделью?

Для расчета плиты УСПС были построены 2 параметрические модели: трехмерная объемная (Solid-элементы) и пластинчато-оболочочная (Shell-элементы). Построение моделей производилось в программном

комплексе COSMOS/M. В качестве параметров выступают геометрические размеры бортов (высота и толщина) и размер конечных элементов.

На рис. 7 приведены иллюстрации этапов и результатов исследования НДС базовой плиты УСПС методом спекл-голографической интерферометрии и методом конечных элементов (Shell-элементы и Solid-элементы). Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

1) Как показывает картина интерференционных полос, на базовой поверхности плиты отсутствуют резкие перепады градиентов нормальных перемещений.

2) Сравнение результатов Shell- и Solid-моделирования подтверждает качественное совпадение распределения нормальных перемещений. Количественно полученные результаты отличаются менее чем на 3%.

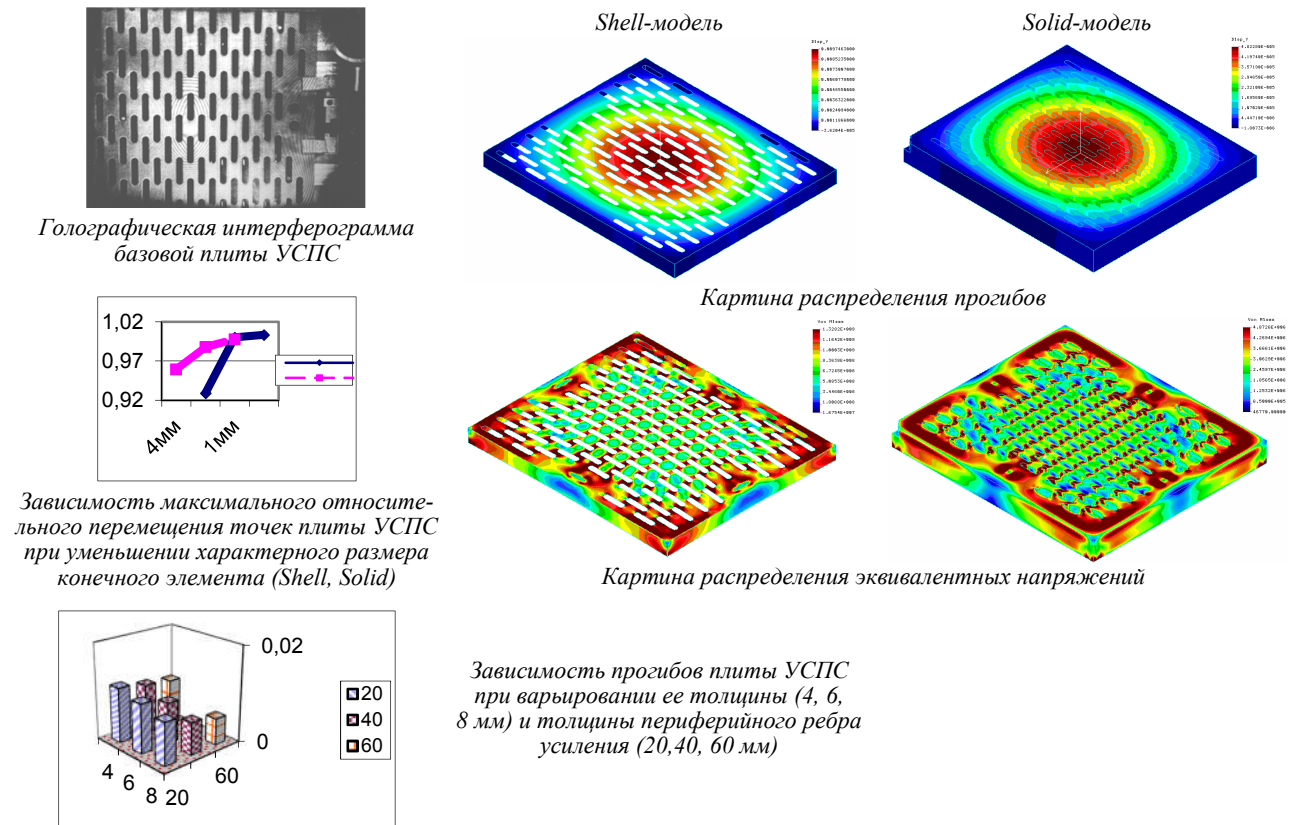


Рис. 7 – Результаты экспериментального и численного исследования НДС базовой плиты УСПС

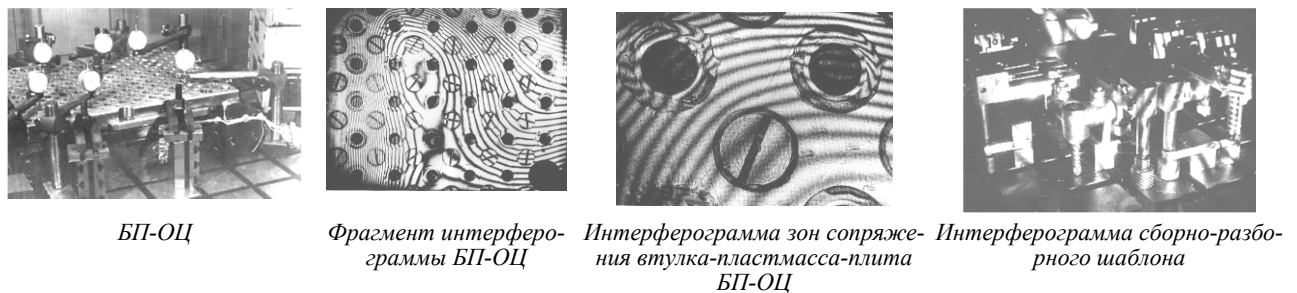


Рис. 8 – Базовая плита для оснащения приспособлений для станков типа "ОЦ" (БП-ОЦ), фрагменты интерферограмм БП-ОЦ и сборно-разборного шаблона для установки приварок в боевом отделении бронированных машин

Таким образом, в принципе подтверждена возможность моделирования конструкций элементов технологической оснастки подобного типа (например, базовых плит приспособлений для оснащения станков типа "ОЦ", рис. 8) Shell-элементами. При этом достигается высокая точность в определении перемещений. Учитывая, что уровень напряженного состояния данных элементов не является определяющим фактором,

оправданным шагом является применение Shell-элементов при многовариантном исследовании жесткостных характеристик данных плит. Однако для уточнения картины напряженного состояния перфорированных плит, а также особенностей картины деформирования в зоне отверстий и сопряжений различных материалов требуется полная пространственная модель. Картина деформирования элементов сборно-разборных шабло-

нов для расположения приварок для установки приварок в боевом отделении бронированных машин (см. рис. 8) свидетельствует об отсутствии элементов, в которых бы уровень перемещений был намного выше, чем в остальных, а распределение перемещений в пределах каждого элемента достаточно плавное, поэтому для этих систем применима стержневая конечно-элементная модель.

Примеры применения предложенного подхода для уточнения граничных условий. Использование предложенной технологии уточнения граничных условий может быть проиллюстрировано на примерах исследования элементов технологических систем. В частности, одной из важных проблем в области проектирования элементов технологической оснастки для производства деталей бронетанковой техники является обоснованный выбор способов ее крепления и базирования. Действительно, при наличии большого количества стыков именно перемещения в сопряжениях ЭТО могут оказывать существенное влияние на баланс перемещений в технологической системе. В то же время расчетное определение жесткости сопряжений во многих случаях затруднено в силу большого количества трудноучитываемых факторов. В связи с этим решающее значение приобретают экспериментальные исследования типовых схем сопряжения. В частности, представляет интерес определение жесткости в сопряжениях сборок универсально-сборных приспособлений (УСП). Та или иная конструктивная реализация сопряжений в универсальных сборных приспособлениях оказывает, в конечном счете, влияние на точность базирования и обработки деталей на металлорежущих станках.

В качестве примера в соответствии с методикой спектрографических измерений были проведены исследования двух компоновок, показанных на рис. 9, 10.

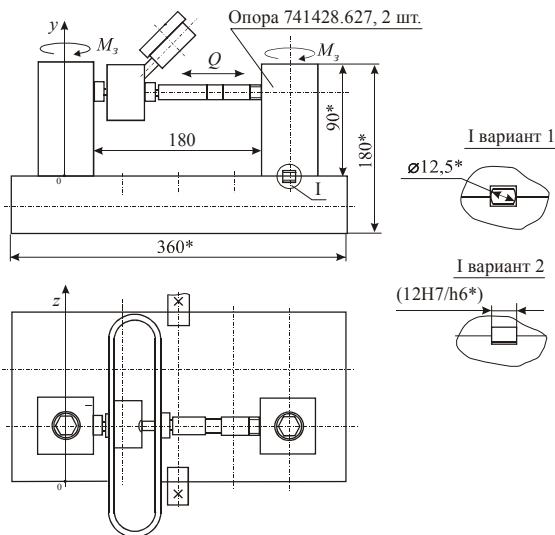


Рис. 9 – Компоновка УСП (вариант I)

Первая компоновка состоит из базовой плиты и опорного элемента, закрепленного на ней с помощью болтового соединения. Компоновка была выполнена в двух вариантах: с фиксацией опоры цилиндрической шпонкой (рис. 11) и с фиксацией опоры обычной призматической шпонкой (рис. 12).

Голографическое исследование двух указанных вариантов были проведены при перепаде моментов затяжки $\Delta M_z = 100 \div 10$ (Н·м). На рис. 13, 14 представлены голографические интерферограммы, характеризующие геометрические изменения, произошедшие с компоновками в процессе затяжки. Голографирование проводилось при освещении объекта вдоль оси z.

По голографическим интерферограммам, представленным на рис. 13–16, построены графические зависимости (рис. 17, 18) перемещений точек поверхности компоновок, показанных на рис. 11, 12, вдоль осей x и y. На графических зависимостях введены обозначения $x_{цил}$, $y_{цил}$ и $x_{пр}$, $y_{пр}$ – координаты точек на компоновках с фиксацией опор цилиндрической шпонкой и с фиксацией призматической шпонкой соответственно.

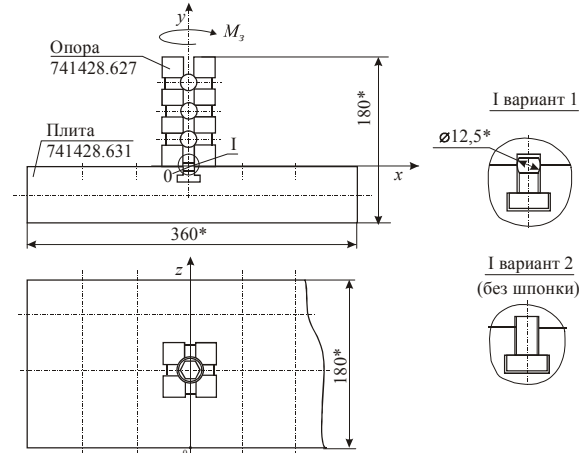


Рис. 10 – Компоновка УСП (вариант II)

Вторая компоновка состоит из базовой плиты и двух опорных элементов, закрепленных с помощью болтового соединения моментом затяжки 150 Н. Исследуемый опорный элемент фиксируется в одном варианте цилиндрической шпонкой (рис. 19), в другом – обычной призматической (рис. 20). Внешней нагрузкой служит распирающая сила Q. Голографические исследования этих двух вариантов были проведены при перепаде распирающего усилия $\Delta P = (7,5 \text{ кН} - 6,3 \text{ кН}) = 1,2 \text{ кН}$ (рис. 21, 22). По голографическим интерферограммам построены графические зависимости (рис. 23, 24) перемещений точек поверхности компоновок, показанных на рис. 19, 20, вдоль осей x и y соответственно.

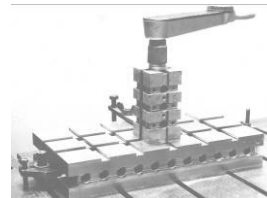


Рис. 11 – Компоновка УСП с фиксацией опоры цилиндрической шпонкой

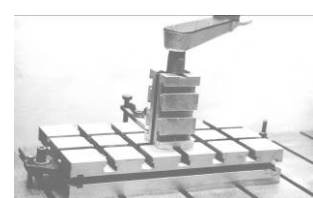


Рис. 12 – Компоновка УСП с фиксацией опоры обычной призматической шпонкой

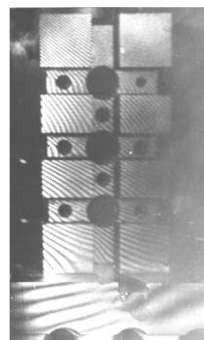


Рис. 13 – Голографическая интерферограмма компоновки с фиксацией опоры цилиндрической шпонкой (вид сбоку)

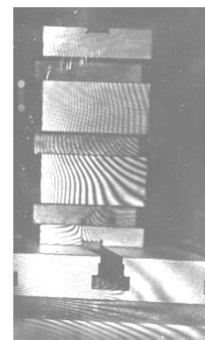


Рис. 14 – Голографическая интерферограмма компоновки с фиксацией опоры обычной призматической шпонкой (вид сбоку)

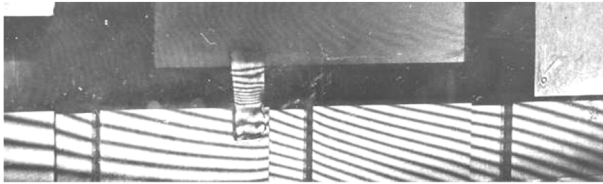


Рис. 15 – Голографическая интерферограмма базовой плиты при перепаде моментов затяжки $\Delta M_3 = 100 \div 10$ (Н·м) с фиксацией опоры цилиндрической шпонкой

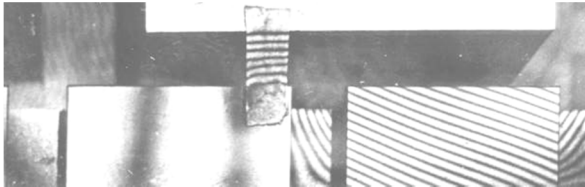


Рис. 16 – Голографическая интерферограмма базовой плиты при перепаде моментов затяжки $\Delta M_3 = 100 \div 10$ (Н·м) с фиксацией опоры обычной призматической шпонкой

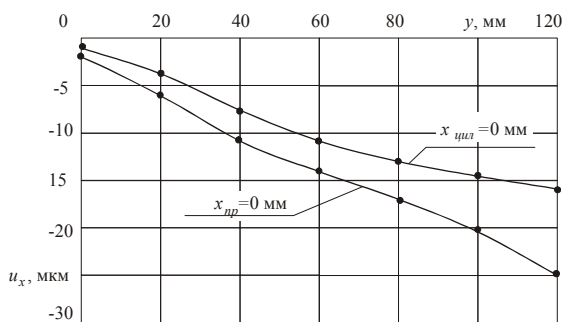


Рис. 17 – Графические зависимости перемещений точек по поверхности компонок (рис. 11, 12) вдоль оси x

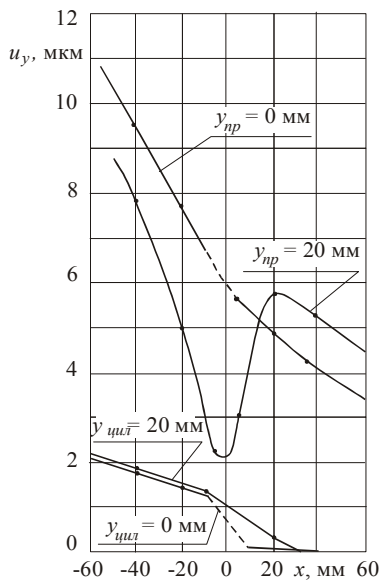


Рис. 18 – Графические зависимости перемещений точек по поверхности компонок (рис. 11, 12) вдоль оси y

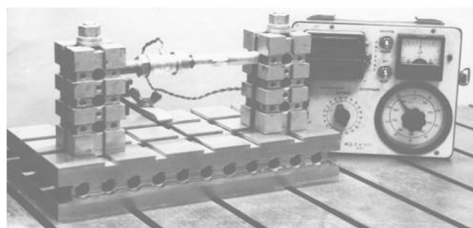


Рис. 19 – Компоновка, состоящая из базовой плиты и двух опорных элементов с фиксацией опор цилиндрическими шпонками

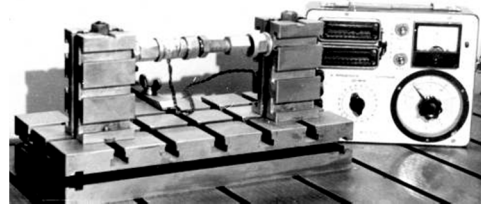


Рис. 20 – Компоновка, состоящая из базовой плиты и двух опорных элементов с фиксацией опор призматическими шпонками

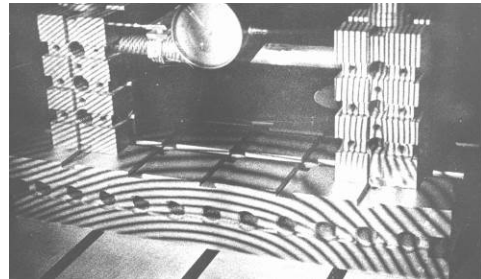


Рис. 21 – Голографическая интерферограмма компоновки с фиксацией опор цилиндрическими шпонками при перепаде усилия 1,2 кН

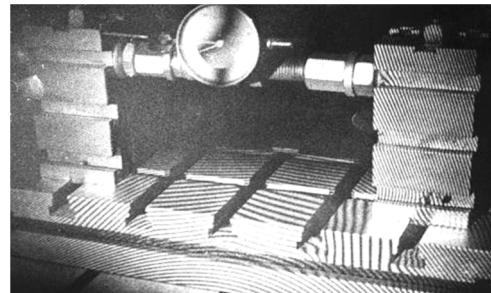


Рис. 22 – Голографическая интерферограмма компоновки с фиксацией опор обычными призматическими шпонками при перепаде усилия 1,2 кН

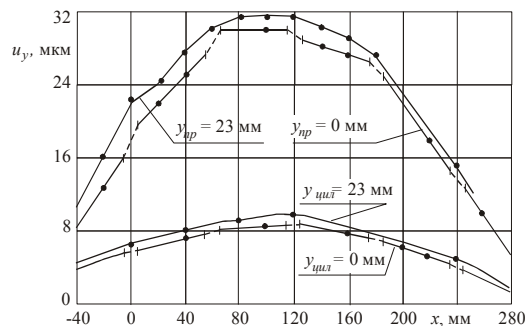


Рис. 23 – Графические зависимости перемещений точек базовых плит компонок рис. 11, 12 вдоль оси x

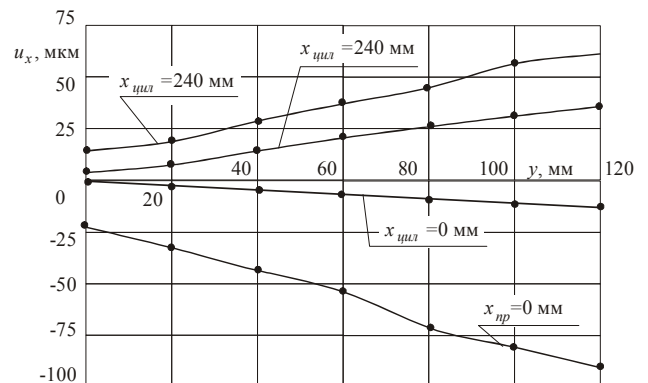


Рис. 24 – Графические зависимости перемещений точек по поверхности компонок рис. 11, 12 вдоль оси x

В результате выполнения спекл-голографических исследований компоновок УСП было показано, что:

– диапазон величин измеряемых перемещений любых точек, лежащих на поверхности конструкции, составляет $0,5 \div 100$ (мкм);

– величины перемещений точек, лежащих на поверхности исследуемых компоновок, имеют практически линейную зависимость от величины момента затяжки в интервале $0 \div 15$ (кГ·м) для компоновок, показанных на рис. 10, 11, и от величины распирающего усилия в интервале $0 \div 2,0$ (кН) для компоновок, показанных на рис. 20, 21. Это было проверено для выбранных точек с помощью микрометрических индикаторов часового типа, и подтверждено голографическими исследованиями;

– максимальные перемещения верхней части опоры при перепаде момента затяжки от $0 \div 100$ (Н·м) составляют 24 мкм для опоры с фиксацией призматическими шпонками и 16 мкм для опоры с фиксацией цилиндрическими шпонками;

– максимальные перемещения верхней части опоры при перепаде распирающего усилия $\Delta P = 7,50 \div 6,3$ (кН) = 1,20 кН составляют 90 мкм для опоры с фиксацией призматическими шпонками и 30 мкм для опоры с фиксацией цилиндрическими шпонками;

– максимальные прогибы базовых плит при перепаде распирающего усилия $\Delta P = 7,50 \div 6,3$ (кН) = 1,20 кН составляют 32 мкм для опоры с фиксацией призматическими шпонками и 10 мкм для опоры с фиксацией цилиндрическими шпонками.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что при фиксации опор цилиндрическими шпонками жесткость компоновок в 2–3 раза больше, чем при фиксации компоновок обычными призматическими шпонками. Оба вида рассмотренных компоновок работоспособны в широком диапазоне прикладываемых нагрузок, обеспечивая при этом необходимую жесткость собираемых конструкций. Проведенные исследования позволяют вычислять жесткость сборок как функцию того или иного конструктивного решения и вида организации сопряжения призма-плита.

Отдельным вопросом при этом является характер условий сопряжения по границам призма-плита и плита-основание (см. рис. 12–15). Несовпадение картин полос в этих сопряжениях свидетельствует об их относительном смещении, а наклейка резиновых "мостиков" позволяет количественно оценить данные смещения.

На рис. 25 показаны фрагменты интерферограмм, полученных при исследовании переналаживаемых станочных приспособлений тисочного типа. Видно, что в зонах сопряжения направляющих с подвижными губками наблюдается разрыв картин перемещений, что свидетельствует об отрыве губки от корпуса. В то же время в сопряжении подошвы корпуса со столом станка (в данном случае – базовой плитой) перемещения практически отсутствуют.

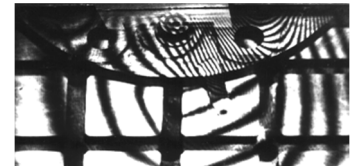
То же уточнение можно провести для сопряжений элементов пресс-форм (рис. 26). Таким образом, для определения граничных условий сопряжения в элементах технологической оснастки можно использовать или сравнение полей распределений искомым функций, полученных численным и экспериментальным путем, или прямое определение перемещений в зонах закрепления и сопряжения по голографическим интерферограммам.



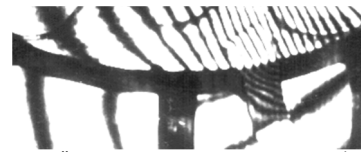
сопряжение корпус – подвижная губка



сопряжение неподвижная губка – деталь



сопряжение подошва корпуса – базовая плита



"мостик" в сопряжении основание – подошва

Рис. 25 – Фрагменты спекл-интерферограмм переналаживаемых тисков

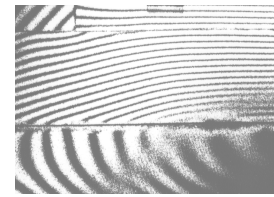
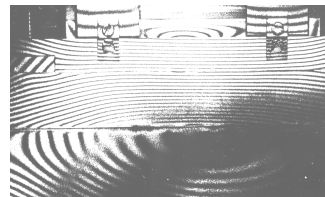
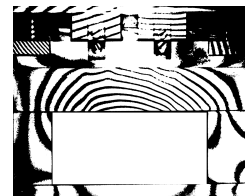
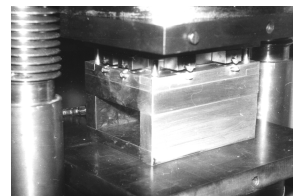


Рис. 26 – Модель пресс-формы на столе пресса и фрагменты интерферограмм в зонах сопряжения элементов пресс-формы

Выводы. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Преимущество предложенной технологии на основе использования обобщенного параметрического подхода, создания специализированных подсистем моделирования и анализа элементов технологической оснастки для изготовления деталей объектов бронетанковой техники и применения сокращенного цикла исследований – в повышенной оперативности, сбалансированности по критериям точности модели и временных затрат на решение возникающих задач анализа и синтеза, а также в возможности работы в автоматизированном режиме без участия исследователя. Таким образом, создается мощный и высокоэффективный инструмент для конструктора, технолога, исследователя.

2. Как показала практика использования, применение "экспресс-моделей" и "экспресс-систем" позволяет рельефно показать влияние значимых факторов на прочностные и жесткостные параметры элементов технологической оснастки. При этом определяются как качественные стороны данных зависимостей, так и количественные характеристики, определяющие точность изготовления деталей объектов бронетанковой техники.

3. Предложенная технология "экспресс-моделей" и "экспресс-систем" органически встраивается как в универсальные CAD/CAM/CAE-системы, так и в специализированные системы средней мощности.

4. Разработанные "экспресс-модели" и "экспресс-системы" могут работать в автономном режиме, выступая в качестве мини-экспертных на ранних этапах проектирования элементов технологической оснастки для изготовления деталей объектов бронетанковой техники.

5. Предложенные технологии ускоренных исследований элементов технологической оснастки позволяют определять качественные стороны моделей, процессов, явлений, а также количественные характеристики внешних воздействий и граничных условий. Это дает возможность повысить достоверность расчетных моделей и точность результатов исследований.

6. Особую ценность предложенные в работе подходы демонстрируют при исследовании классов конструкций. В отличие от традиционных подходов, в которых в качестве результата выступает число, осциллограмма процесса или пространственное поле искомых величин, в разработанном методе основным результатом является достоверная (с точки зрения качественных особенностей и количественных значений параметров) расчетная модель.

7. Разработанные методы и построенные подсистемы позволяют организовывать базы данных по отдельным классам и типам конструкций технологической оснастки для изготовления объектов бронетанковой техники, что в соединении с базами данных по оборудованию спецпроизводств и по специальным материалам для изготовления деталей транспортных средств специального назначения дает возможность создать отраслевую специализированную базу данных по технологической подготовке производства. Кроме того, возможно создание соответствующих элементов баз знаний, позволяющих решать задачи определения вариантов проектных решений ЭТО, которые обеспечивают необходимую точность обработки деталей объектов бронетанковой техники.

Разработанные подходы, модели, методы и средства исследований применимы для широкого круга машиностроительных конструкций.

Список литературы

1. Методология исследования сложных систем военного назначения / [С. В. Латицкий и др.]; под ред. С. В. Латицкого. – 2013. – 477 с.
2. Чепков І. Б. Загальні тенденції розвитку озброєння та військової техніки / Чепков І. Б., Нор П. І. // Озброєння та військова техніка. – 2014. – № 1. – С. 4–13.
3. Чепков І. Б. Основні напрями розвитку озброєння і військової техніки. / Чепков І. Б. // Перспективи науково-технологічного забезпечення ОПК України: Інформ.-комунік. захід (Київ, 22–23 вересня 2015). – К.: ТОВ "Міжн. вист. центр", 2015. – С. 8–13.
4. Литвиненко А. В. Общий подход к обоснованию параметров проектируемых машин на основе гибридных расчетно-экспериментальных моделей / А. Д. Чепурной, Г. П. Глинци, А. В. Литвиненко [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ "ХПИ", 2009. – № 2. – С. 103–108.
5. Литвиненко А. В. Общий подход к проектно-технологическому обеспечению защищенности бронекорпусов транспортных средств специального назначения / А. В. Литвиненко, Н. А. Ткачук, Б. Я. Литвин [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ "ХПИ", 2012. – № 2. – С. 221–229.
6. 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.
7. Ткачук Н. А. Конечные-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.
8. Ткачук М. А. Теоретичні основи та практика проектно-технологічного забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин / М. А. Ткачук // Доп. на Інформаційно-комунікативному заході "Наука: безпека країни та розвиток війсь-

ково-промислового комплексу" XIII Міжнародної спеціалізованої виставки "Зброя та безпека-2016" 12–13 жовтня 2016 р., м. Київ. – С. 3 прог.

9. Васильєв А. Ю. Обґрунтування структури та параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин за критеріями захищеності / А. Ю. Васильєв // Доп. на Інформаційно-комунікативному заході "Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу" XIII Міжнародної спеціалізованої виставки "Зброя та безпека-2016" 12–13 жовтня 2016 р., м. Київ. – С. 3 прог.
10. Веретельник О. В. Динамічні процеси в елементах військових колісних та гусеничних машин при бойовому застосуванні / О. В. Веретельник // Доп. на Інформаційно-комунікативному заході "Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу" XIII Міжнародної спеціалізованої виставки "Зброя та безпека-2016" 12–13 жовтня 2016 р., м. Київ. – С. 4 прог.
11. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход. Пер. с польск. – М.: Мир, 1981. – 456 с.
12. Литвиненко О. В. Проектно-технологічні засоби забезпечення легкоброньованих машин шляхом обґрунтування параметрів конструкції та технологічних процесів виготовлення бронекорпусів / Литвиненко О. В., Федосов В. Є., Степанов М. М. [и др.] // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ. Зб. тез. – Львів : Друкарня АСВ ім. гетьмана П. Сагайдачного, 2013. – С. 59–60.
13. Кохановский В. И. Моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния пространственных элементов технологических систем / Кохановский В. И., Милованов Ю. Б., Ткачук Н. А. // В сб.: Труды междунар. научно-техн. конф. MicroCAD'97. В 5 ч. Ч.3. – Харьков: ХГПУ, 1997. – С. 300.

Bibliography (transliterated)

1. Lapickij S. V., ed. *Metodologija issledovanija slozhnyh sistem voenno-go naznachenija* [Methodology for the study of complex military systems]. 2013, 477 p.
2. Chepkov I. B., Nor P. I. *Zahal'ni tendentsiyi rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki* [General trends in the development of weapons and military equipment]. *Ozbroynennya ta viys'kova tekhnika*. 2014, no. 1, pp. 4–13.
3. Chepkov I. B. *Osnovni napryamy rozvytku ozbroynennya i viys'kovoyi tekhniki*. [Main directions of development of armament and military equipment]. *Perspektyvy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya OPK Ukrainy, Inform., komunik. Zakhid, Kyiv, 22–23 veresnya 2015, Kyiv, TOV "Mizhn. vyst. tsentr"*, 2015, pp. 8–13.
4. Litvinenko A. V., Chepurnoj A. D., Glinin G. P., *Obshhij podhod k obosnovaniju parametrov proektiruemih mashin na osnovе gibridnyh raschetno-jekspyrymental'nyh modelej* [A general approach to substantiating the parameters of projected machines based on hybrid computational and experimental models]. *Mehanika ta mashinobuduvannja*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2009, no. 2, pp. 103–108.
5. Litvinenko A. V., Tkachuk N. A., Litvin B. Ja. [i dr.] *Obshhij podhod k proektno-tehnologicheskomu obespecheniju zashhishhennosti bron-ekorpusov transportnyh sredstv special'nogo naznachenija* [General approach to design and technological security of special purpose vehicles armored carcasses]. *Mehanika ta mashinobuduvannja*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2012, no. 2, pp. 221–229.
6. Tkachuk N. A., Brul' S. T., Malakej A. N., Gricenko G. D., Orlov E. A., *Struktura spetsializirovannyh integrirovannyh sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza jelementov trans-portnyh sredstv special'nogo naznachenija* [Structure of specialized integrated systems of automated analysis and synthesis of special purpose vehicles elements]. *Mehanika ta mashinobuduvannja*, 2005, no. 1, pp. 184–194.
7. Tkachuk N. A., Gricenko G. D., Chepurnoj A. D., Orlov E. A., Tkachuk N. N. *Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisania* [Finite-element models of complex mechanical systems elements: automated generation technology and parameterized description]. *Mehanika ta mashinobuduvannja*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2006, no. 1, pp. 57–79.
8. Tkachuk M. A. *Teoretychni osnovy ta praktyka proektno-tehnolohichnoho zabezpechennya taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk bo-yovykh bron'ovanykh mashyn* [Theoretical basis and practice of design and technological support of tactical and technical characteristics of armored combat vehicles]. *Dop. na Informatsiyno-komunikatyvnomu zakhodi "Nauka: bezpeka krayiny ta rozvytok viys'kovopromyslovoho kompleksu" XIII Mizhnarodnoyi spetsializovanoi vystavky "Zbroja ta bezpeka-2016"*, 12–13 zhovtynya 2016 r. [Proc. of the informational and communicational event "Science: security of the country and development of the military-industrial complex" of the XIII International specialized exhibition "Weapons and security-2016", october 12–13, 2016]. Kyiv, p. 3.
9. Vasylyev A. Yu. *Obgruntuвання структури та параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин за критеріями захисності* [Armored corps of lightly armored cars structure and parameters justification according to the criteria of protection]. *Dop. na Informatsiyno-komunikatyvnomu zakhodi "Nauka: bezpeka krayiny ta*

- rozvytok viys'kovo-promysloвого комплексу" XIII Mizhnarodnoyi spetsializovanoi vystavky "Zbroya ta bezpeka-2016", 12-13 zhovtnya 2016 r. [Proc. of the informational and communicational event "Science: security of the country and development of the military-industrial complex" of the XIII International specialized exhibition "Weapons and security-2016", october 12-13, 2016]. Kyiv, p. 3 proh.
10. Veretel'nyk O. V. *Dynamichni protsesy v elementakh viys'kovykh kolisnykh ta husenychnykh mashyn pry boyovomu zastosuvanni* [Dynamic processes in the elements of military wheeled and crawler machines in combat use]. Dop. na Informatsiyno-komunikatyvnomu zakhodi "Nauka: bezpeka krayiny ta rozvytok viys'kovo-promysloвого комплексу" XIII Mizhnarodnoyi spetsializovanoi vystavky "Zbroya ta bezpeka-2016", 12-13 zhovtnya 2016 r. [Proc. of the informational and communicational event "Science: security of the country and development of the military-industrial complex" of the XIII International specialized exhibition "Weapons and security-2016", october 12-13, 2016]. Kyiv, p. 4 proh.
11. Ditrh Ja. *Proektirovanie i konstruirovaniye: Sistemyy podhod*. [Design and construction: A system approach.]. Moscow, Mir, 1981, 456 p.
12. Lytvynenko O. V., Fedosov V. Ye., Stepanov M. M. [i dr.]. *Proektno-tehnologichni zasoby zabezpechennya lehkobron'ovamykh mashyn shlyakhom obgruntuvannya pa-rametriv konstruktivnoy ta tehnologichnykh protsesiv vyhotovlennya bronekor-pusiv* [Design and technological means of providing easy-armored cars by substantiating parameters of design and manufacturing processes of armored carcasses.]. *Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki Sukhoputnykh viys'k*. Zb. tez. [Proc. Of the Conf Perspectives for the development of armaments and military equipment of the Land Forces]. L'viv, Drukarnya ASV im. het'mana P. Sahaydachnoho, 2013, pp. 59-60.
13. Kohanovskiy V. I., Milovanov Ju. B., Tkachuk N. A. *Modelirovanie i analiz naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya prostranstvennykh jelementov tehnologicheskikh sistem* [Modeling and analysis of the strained-deformed state of spatial elements of technological systems]. *V sb. Trudy mezhdun. nauchno-tehn. konf. MicroCAD'97*. [Proc. Of the Int. Conf. MicroCAD'97 vol 5, ch.3.]. Kharkiv, HGPU, 1997, 300 p.

Поступила (received) 30.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Синтез проектно-технологічних рішень за критеріями міцностних та жорсткісних характеристик машинобудівних конструкцій / М. А. Ткачук, О. В. Хлань, А. В. Набоков, А. В. Грабовський, Д. В. Бібик, Г. В. Ткачук, М. С. Саверська // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – X. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 143–153. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0791.

Синтез проектно-технологических решений по критериям прочностных и жесткостных характеристик машиностроительных конструкций / Н. А. Ткачук, А. В. Хлань, А. В. Набоков, А. В. Грабовский, Д. В. Бибик, А. В. Ткачук, М. С. Саверская // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – X. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 143–153. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0791.

Synthesis of design and technological solutions for the strength and rigidity characteristics of engineering structures / М. А. Tkachuk, А. V. Khlан, А. V. Nabokov, А. V. Grabovsky, D. V. Bibik, M. S. Saverska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 143–153. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0791.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Ткачук Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", заведующий кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Tkachuk Mykola – doctor of technical sciences, professor, National Technical University "Kharkiv polytechnic institute", Chief of the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines; tel.: (057) 707-69-01; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Хлань Олександр Володимирович – генеральний директор ДП "Завод ім. В.О. Малишева", Харків.

Хлань Александр Владимирович – генеральный директор ГП "Завод им. В.А. Малышева", Харьков.

Khlан Oleksandr – General Director at SE "Malyshev Plant", Kharkov.

Набоков Анатолій Володимирович – НТУ "ХПІ", аспірант кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-69-01.

Набоков Анатолий Владимирович – НТУ "ХПІ", аспірант кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-69-01.

Nabokov Anatoliy – NTU "KhPI", post-graduate student at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines; tel.: (057) 707-69-01

Грабовський Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ "ХПІ", старший науковий співробітник кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-61-66; e-mail: andrej8383@gmail.com

Грабовский Андрей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТУ "ХПІ", старший научный сотрудник кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (057) 707-61-66; e-mail: andrej8383@gmail.com

Grabovskiy Andrey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, NTU "KhPI", Senior Researcher at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines; tel.: (057) 707-61-66; e-mail: andrej8383@gmail.com

Бібик Дмитро Вікторович – начальник відділу ДК "УкрОборонПром".

Бибик Дмитрий Викторович – начальник отдела ГК "УкрОборонПром".

Bibik Dmiro – head of department of state Concern "Ukroboronprom".

Ткачук Ганна Володимирівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 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, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", старший научный сотрудник кафедры "Информационные технологии и системы колесных и гусеничных машин им. А. А. Морозова", тел.: (057) 707-63-35.

Ткачук Ганна – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Researcher at Information Technology and Systems of Wheeled and Tracked Machines behalf of A. A. Morozov Department; tel.: (057) 707-63-35

Саверська Марія Сергіївна – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", викладач-стажист кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-69-01.

Саверская Мария Сергеевна – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", преподаватель-стажер кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; тел.: (057) 707-69-01.

Saverska Marija – National technical university "Kharkiv polytechnic institute", trainee teacher at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines; tel.: (057) 707-69-01.