

УДК 539.3: 004.94

*М.А. ЧУБАНЬ, Н.А. ТКАЧУК, А.И. ШЕЙКО, Н.Л. БЕЛОВ, И.Я. ХРАМЦОВА, А.А. ЗАРУБИНА,  
А.В. ТКАЧУК, Н.В. ШЕМАНСКАЯ, А.Д. НЕСТЕРЕНКО*

## **БАЗОВЫЕ ПЛИТЫ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ И ОЦ В СПЕЦПРОИЗВОДСТВЕ: ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исходя из требований повышения технических и тактико-технических характеристик современных машин, в т. ч. – изделий бронетанкостроения, возникает актуальная и важная задача обеспечения высоких прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем. В частности, для оснащения станков с ЧПУ и типа ОЦ применяется система станочных приспособлений УПТО-Р (унифицируемая переналаживаемая оснастка). В ее составе – базовые плиты с Т-образными пазами. В данной работе проведены исследования влияния варьируемых проектных параметров этих плит на их прочностные и жесткостные характеристики. Учитывая значительный вклад данных плит в баланс перемещений в технологической системе, проблема повышения прочности и жесткости этих плит является актуальной и важной с точки зрения точности обработки деталей. В результате проведенных разработок создана система автоматизированного исследования напряженно-деформированного состояния базовых плит с Т-образными пазами. Она может быть использована при проектных разработках технологической оснастки для механообработки.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, базовая плита, технологическая система, жесткость, станочное приспособление, метод конечных элементов

Nowadays there are requirements to increase the technical and tactical characteristics of modern machines, included the products of armored tank building. An urgent and important task arises in providing of high strength and stiffness characteristics of elements of technological systems. In particular, unified readjusted frame constructed equipment is used for equip CNC and MC type machine tool system. There are base plates with T-grooves in its structure. In this paper we studied the effect of varying of design parameters of these plates on their strength and stiffness characteristics. These plates give significant contribution in balance of displacements in the technological system. The problem of increasing of strength and rigidity of these plates is a relevant and important in terms of precision of parts processing. As a result the system of computer-aided study of stress-strain state of base plate with T-grooves was created. It can be used during the design of technological equipment for machining.

**Keywords:** stress-strain state, base plate, technological system, stiffness, machine tool accessories, finite element method

Виходячи з вимог підвищення технічних і тактико-технічних характеристик сучасних машин, в т. ч. – виробів бронетанкобудування, виникає актуальна і важлива задача забезпечення високих характеристик міцності і характеристик жорсткості елементів технологічних систем. Зокрема, для оснащення верстатів з ЧПУ і типу ОЦ застосовується система верстатних пристосувань УПТО-Р (уніфіковане переналагоджуване оснащення рамної конструкції). В її складі – базові плити з Т-видними пазами. У поданій роботі проведено дослідження впливу варіюваних проектних параметрів цих плит на їх характеристики міцності та жорсткості. З огляду на значний внесок даних плит в баланс переміщень у технологічній системі, проблема підвищення міцності та жорсткості цих плит є актуальною і важливою з точки зору точності обробки деталей. В результаті проведених розробок створена система автоматизованого дослідження напружено-деформованого стану базових плит з Т-подібними пазами. Вона може бути використана при проектних розробках технологічного оснащення для механічної обробки.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, базова плита, технологічна система, жорсткість, верстатне пристосування, метод скінченних елементів

### **Введение**

Для современного состояния отечественного машиностроения в целом и бронетанкостроения в частности, а особенно – производства бронетанковой техники (БТТ), характерными особенностями являются: повышение технических и тактико-технических характеристик (ТТХ) вновь проектируемых боевых бронированных машин, усложнение геометрической формы и ужесточение требований к точности изготовления деталей объектов БТТ, многономенклатурность производства, сокращение сроков проектирования и технологической подготовки производства, увеличение удельного веса рынка модернизации. Военные доктрины ведущих государств мира предусматривают насыщение сухопутных войск современным вооружением с существенно повышенными ТТХ или значительное повышение технического уровня образцов военной техники, принятых на вооружение несколько лет или десятков лет назад.

Таким образом, потребности Вооруженных сил Украины, а также зарубежных потребителей их продукции требуют от предприятий специального машиностроения Украины повышения технико-технологического уровня производства и проектирования. При этом наиболее эффективным и наименее затратным с точки зрения повышения уровня техно-

логических возможностей производства на отечественных предприятиях является широкое использование гибкой переналаживаемой оснастки.

В то же время предприятия отечественного специального транспортного машиностроения по сравнению с аналогичными зарубежными производителями вооружений характеризуются: недостаточным оснащением CAD/CAM/CAE-системами; частично морально устаревшим станочным парком с ограниченными технологическими возможностями; ограниченными ресурсами для технического перевооружения и информационного переоснащения предприятий.

С учетом большого и все возрастающего удельного объема деталей сложной формы с высокими требованиями к точности изготовления в общем объеме деталей бронетанковой техники, невозможностью кардинального ускорения и удешевления проектно-конструкторских и технологических работ только на базе универсальных CAD/CAM/CAE-систем тенденция повышения ТТХ боевых машин определяет большую *актуальность и важность* научно-

© Чубань М.А., Ткачук Н.А., Шейко А.И., Белов Н.Л., Храмцова И. Я., Зарубина А.А., Ткачук А.В., Шеманская Н.В., Нестеренко А.Д., 2016

практической проблемы разработки теоретических основ автоматизированного анализа и синтеза элементов технологической оснастки для изготовления деталей объектов бронетанковой техники.

#### Анализ состояния вопроса

Анализ состояния вопроса проектирования, изготовления и боевой эксплуатации отечественных и зарубежных боевых бронированных машин [1–5] позволяет сделать вывод о том, что для современного бронетанкостроения характерны высокие требования к тактико-техническим характеристикам танков, легких бронированных машин, а также их систем и агрегатов. 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 (в США, в Европе и в России интенсивно разрабатывается целый ряд доктрин новой боевой машины будущего);

- глубокая модернизация состоящих на вооружении танков и легких бронированных машин с целью повышения их ТТХ с ограниченными затратами на проектные работы, испытания и технологическую подготовку производства;

- создание на базе существующих машин (например, танков), тяжелых боевых машин пехоты или иных изделий, что позволяет продлить сроки эксплуатации боевых бронированных машин в новом качестве;

- бурное развитие легкобронированных колесных и гусеничных машин (как вновь проектируемых, так и модернизируемых) с приданием им некоторых тактико-технических характеристик, 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 технологий сквозного проектирования, испытаний, технологической подготовки производства боевых бронированных машин, 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 технологической подготовки производства и, соответственно, изготовление изделия. Рассмотрим данный аспект на примере спецпроизводства и других пред-

приятый, ориентированных, в том числе, на выпуск и модернизацию бронетанковой техники типа БМ "Булат", "Оплот", бронетранспортеров, артиллерийских систем КБА-3 и танковых дизелей серии 5ТД, 6ТД. В данном случае необходимо вычлнить 2 аспекта проблемы, связанные с производством тяжелых боевых машин и легкобронированных машин.

С одной стороны, для отечественного производства специальных транспортных средств на современном этапе актуален вариант модернизации существующей ББТ, 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 тяжелых и легких бронированных машин советского производства и, соответственно, сформировавшийся рынок заказчиков. Кроме того, на первый план в силу известных военно-политических событий в восточных областях страны выходит потребность Вооруженных сил Украины в современном вооружении с высокими ТТХ. Это влечет за собой, с другой стороны, перспективность освоения производства новых изделий.

Таким образом, существует реальная потребность в развитии производства новых и модернизированных существующих боевых машин. Кроме того, актуальной является также и задача восстановления техники, получившей повреждения в ходе боевых действий.

ГП "Завод имени Малышева" как флагман отечественного бронетанкостроения располагает значительными производственными мощностями и площадями с размещенными на них многими единицами современного технологического оборудования (в т.ч. станки с ЧПУ, ОЦ), которые могут быть в короткие сроки переориентированы на те или иные производственные задачи. Таким образом, военно-технические, экономические, технологические, временные факторы свидетельствуют в пользу перспективности производства новых и модернизации существующих образцов ББТ.

С другой стороны, при этом для бронетанкового производства характерна высокая степень проработанности конструкций новых машин, освоенных в серийном производстве, вариантов модернизации ранее существующих машин, а также интенсивная проработка конструкций новых машин. В итоге в данном случае сдерживающим фактором является не отсутствие проектных наработок, а проблемы технологической подготовки производства. Это обусловлено тем, что стремительность процесса повышения тактико-технических характеристик отечественных и зарубежных образцов бронетанковой техники обеспечивается ускорением и качественным изменением самого характера процессов проектирования, исследования и технологической подготовки производства. В частности, данные процессы приобретает 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. Действительно, анализ номенклатуры деталей различных производств ГП "Завод им. А.А. Малышева", а также деталей технологической оснастки, показывает, что в общем объеме деталей (который сам по себе очень высок) большой удельный вес занимают детали, изготавливаемые с применением станков с ЧПУ и ОЦ в том числе.

Дальнейший рост требований к ГТХ изделий отечественного бронетанкостроения увеличивает приведенные соотношения в сторону роста количества сложнопрофильных деталей с ужесточенными требованиями к точности их обработки, а, значит, и к росту станочного парка с ЧПУ, ОЦ, и к росту количества деталей, на этих станках обрабатываемых. Кроме того, возрастают требования к точности изготовления деталей на всех станках. Это приводит к необходимости применения САПР при проектировании данных деталей; применения систем автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ, а также САПР технологической оснастки; применения систем автоматизированного исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологической оснастки для производства деталей объектов бронетанковой техники с целью обеспечения заданной точности изготовления.

Как уже отмечалось, анализ структуры станочного парка показывает, что для него характерен достаточно высокий удельный вес станков с ЧПУ, в том числе "ОЦ". С течением времени доля этих станков в общем объеме всех станков возрастает, что диктуется требованиями повышения как точности, так и производительности обработки деталей. Это дает основание сделать вывод о значительной доле деталей, которые изготавливаются с применением станков с ЧПУ.

Комплексная оценка общей картины состояния технологической оснастки и оборудования позволяет сделать следующие выводы.

1. В общем объеме производства, а также деталей технологической оснастки, большой удельный вес занимают детали с повышенными требованиями к точности, изготавливаемые на станках с ЧПУ и "ОЦ".

2. Увеличение доли станков с ЧПУ (и, особенно, деталиеопераций на них) в общем объеме станков (и деталиеопераций) диктуется как усложнением формы и требованиям к точности деталей специального транспортного машиностроения, так и экономической целесообразностью.

3. В объеме деталей, изготавливаемых в спецпроизводствах, в настоящее время существует большая доля деталей с высокими требованиями к точности обработки, производство которых без станков с ЧПУ невозможно.

4. Для рассматриваемых производств недостаточно развиты автоматизация подготовки конструкторской и технологической документации (причем последней – особенно), а также сквозная связь проектно-

технологических этапов. Наличие некоторого количества рабочих мест универсальных CAD/CAE не может коренным образом изменить ситуацию, поскольку отсутствуют специализированные системы, учитывающие специфику отечественного бронетанкостроения.

5. Материальная составляющая спецпроизводства (оборудование, оснастка, инструмент) на сегодняшний день и морально, и физически существенно устарела и обладает большой инерционностью (на их быстрое обновление недостаточно средств и требуется значительное время). Приобретение компьютерного оборудования и мощного программного обеспечения также сдерживается большой их стоимостью. Кроме того, отсутствует достаточно мощный слой высококвалифицированных специалистов – пользователей, которые бы могли эффективно использовать системы автоматизированного проектирования и подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.

Все вышеприведенные факторы свидетельствуют об актуальности научно-технической задачи разработки отечественной автоматизированной системы моделирования деталей сложной формы, подготовки конструкторской документации, технологической оснастки и управляющих программ для обработки наиболее сложных деталей бронетанковой техники на станках с ЧПУ. Учитывая возрастающие объемы выпуска изделий специального назначения для отечественных Вооруженных сил и по международным контрактам, данная задача имеет и высокую практическую ценность.

Таким образом, актуальная и практически важная проблема автоматизации процессов проектирования, исследования и изготовления деталей объектов бронетанковой техники и элементов технологической оснастки для их изготовления является составным элементом решения большой научно-технической проблемы обеспечения тактико-технических характеристик бронетанковой техники на основе повышения точности обработки их деталей.

### Постановка задач исследований

Существуют различные *пути повышения точности обработки*: разработка и применение новых видов технологий; внедрение нового высокоточного и высокопроизводительного оборудования; применение новых типов инструмента; применение новых типов технологической оснастки [6–9].

В этом перечне наиболее оперативные и наименее затратные – последние направления. Данное обстоятельство обусловлено следующими особенностями современного состояния отечественного бронетанкостроения: наличие большого парка устаревших станков; трудности технического перевооружения; отсутствие потребности в массовом производстве; мелкосерийный характер производства; перспективы заказов направлены на получение зарубежных контрактов, модернизацию, восстановление и изготовление машин для отечественных Вооруженных сил (потенциально большой и растущий рынок); необходимость частого обновления номенклатуры изделий на предприятиях

бронетанкостроения; высокие требования к точности изготовления сложнопрофильных деталей агрегатов бронетанковой техники; необходимость быть в состоянии потенциальной готовности к быстрому освоению выпуска изделий, причем на данный момент спектр возможных заказов достаточно широк.

Из данного анализа с учетом широкой номенклатуры оснастки и ее непосредственного воздействия на точность обработки деталей объектов бронетанковой техники следует проблема обеспечения точностных, прочностных и жесткостных характеристик элементов технологической оснастки и их соответствия требованиям на технические характеристики станков и инструмента как элементов технологической системы "Станок – приспособление – инструмент – деталь" (СПИД), которые оговорены в ряде стандартов [10–15]. Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время массовое техническое перевооружение производства объектов бронетанковой техники экономически нецелесообразно или отсрочено на некоторое время. Речь идет о наиболее рациональном использовании имеющегося потенциала и "расширке узких мест", в том числе и в первую очередь за счет технологической оснастки, включая переналаживаемую оснастку. Последнее обусловлено следующими факторами: относительно низкая стоимость; возможность расширения технологических возможностей и срока эксплуатации станков.

В то же время ряд проблемных вопросов не нашел своего решения.

Одним из важных аспектов сложившейся ситуации является то, что Харьковским НИИ технологии машиностроения в свое время разработаны основные элементы отраслевой системы технологической подготовки производства на предприятиях отечественного бронетанкостроения, в том числе на основе переналаживаемой технологической оснастки [16–19].

Анализ состояния вопроса обеспечения прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем, в том числе проектирования и исследования технологических систем в бронетанкостроении и машиностроении в целом, позволяет выделить следующие тенденции:

- гибкие технологические системы (ГТС) рассматриваются как одно из основных направлений обеспечения точности и производительности при обработке деталей, особенно в условиях быстрого изменения номенклатуры обрабатываемых деталей и ужесточения требований к точности их изготовления;

- основной элемент технологической системы, определяющий уровень ее жесткостных и точностных характеристик – технологическое оборудование (станок с ЧПУ, станок типа "обрабатывающий центр", термопластавтомат, пресс);

- среди тенденций машиностроения в целом и специального в частности – расширение автоматизации, многономенклатурность, переналаживаемость, перенастраиваемость, гибкость, создание единой информационной цепи на всех этапах жизни изделия от первых этапов проектирования до изготовления;

- наиболее предпочтительным с точки зрения затрат материальных ресурсов и времени (а также

достигаемого эффекта) способом обеспечения точности обработки, гибкости и переналаживаемости ГТС является применение переналаживаемой технологической оснастки [16–19], преимуществами которой являются оперативность оснащения производства, экономичность, высокая точность и жесткость, охват широкой номенклатуры деталей;

- одним из основных вопросов при проектировании технологической оснастки является гармонизация стоимостных факторов, точности (жесткости), производительности (т.е. технологических режимов, а отсюда – требование обеспечения прочности), минимальная материалоемкость, унификация, максимальное расширение технологических возможностей;

- для обработки деталей из труднообрабатываемых конструкционных материалов требуется соответствующий уровень прочности, твердости и жесткости элементов оборудования, оснастки и инструмента.

Отдельная область исследований – так называемые "технологические задачи", в которых исследуются физико-механические процессы при изготовлении деталей, в т.ч. – резанием [20]. В то же время исследования, посвященные оснастке как составному элементу технологической системы, занимают неоправданно малый объем в общем объеме исследований элементов технологических систем (ТС). Двойная роль технологической оснастки, которая обеспечивает, с одной стороны, базирование деталей, а с другой – закрепление (силовое замыкание и закрепление от смещений и деформаций при обработке), требует технологическую систему рассматривать комплексно, с учетом оснастки, которая оказывает самое непосредственное влияние на точность операции при изготовлении деталей. Существующее в настоящее время большое количество работ по некоторым вопросам проектирования элементов оснастки содержит разрозненные несистемные исследования, не объединенные единой методологической базой [16–19, 21–23].

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Общая задача обеспечения точности изготовления деталей объектов бронетанковой техники, во многом определяемой жесткостными характеристиками технологической оснастки, является составляющей актуальной для отечественного машиностроения в целом, и бронетанкостроения и, в частности, масштабной научно-технической и народнохозяйственной проблемы создания новых и модернизации существующих боевых бронированных машин.

2. Проектирование технологической оснастки, в том числе на предприятиях военно-промышленного комплекса Украины, характеризуется недостаточным вниманием к обеспечению прочностных и жесткостных характеристик, в результате чего или повышается металлоемкость, или сужаются технологические возможности.

3. Для обеспечения требуемых жесткостных характеристик технологической оснастки неприменимы известные подходы для типовых элементов (балки, пластины, оболочки или массивы простой формы).

Таким образом, возникает необходимость при-

влечения аналитических, численных и экспериментальных методов исследования при решении задачи оптимального синтеза элементов технологической оснастки для оснащения производства деталей объектов бронетанковой техники. При этом необходимо обеспечить единый подход к организации процесса исследований элементов технологической оснастки как составного процесса их проектирования с целью обеспечения высокой точности обработки деталей объектов бронетанковой техники.

Целью работы является обеспечение возможности повышения тактико-технических характеристик военных колесных и гусеничных машин при изготовлении и модернизации путем разработки теоретических основ автоматизированного анализа и синтеза элементов технологической оснастки (ЭТО), расчетно-экспериментальных методов синтеза достоверных расчетных моделей и создания специализированных интегрированных систем автоматизированного проектирования элементов технологической оснастки для изготовления деталей бронетанковой техники.

В частности, представляет особый интерес оснащение современных станочных приспособлений сменными базовыми плитами высокой точности, твердости и жесткости. Эти базовые плиты являются наиболее податливыми элементами исследуемой технологической системы. Соответственно, для обеспечения необходимой точности обработки в первую очередь необходимо ужесточать именно базовые плиты. В связи с этим исходная цель работы трансформируется к разработке математической и численной модели напряженно-деформированного состояния базовых плит с Т-образными пазами, исследованию НДС этих плит при действии технологических усилий, а также обоснованию их проектных параметров по критериям прочности и жесткости [16–24].

#### Методика численных исследований

При базировании и закреплении деталей машиностроительных конструкций, в т. ч. – объектов бронетанковой техники при их механообработке на металлорезающих станках широкое распространение получили системы приспособлений, использующие в качестве основных элементов базовые плиты с Т-образными пазами (БП-ТП). На рис. 1, 2 приведены примеры приспособлений рамной конструкции ХНИИТМ, оснащаемые БП-ТП [16–24]. Данные плиты (см. рис. 1, 2) находятся в самых разнообразных условиях нагружения. Это обуславливается широким разнообразием используемых наладок, станков, инструмента, режимов резания, материалов, формы и размеров обрабатываемых деталей. В связи с этим возникают следующие задачи: разработка системы автоматизированного анализа и синтеза базовых плит с Т-образными пазами по критериям жесткости; расчетное обоснование густоты конечно-элементной разбивки для достижения приемлемой точности определения напряженно-деформированного состояния (НДС) БП-ТП при многовариантных численных исследованиях; оценка чувствительности жесткостных характеристик базовых

плит к изменению конструктивных параметров.

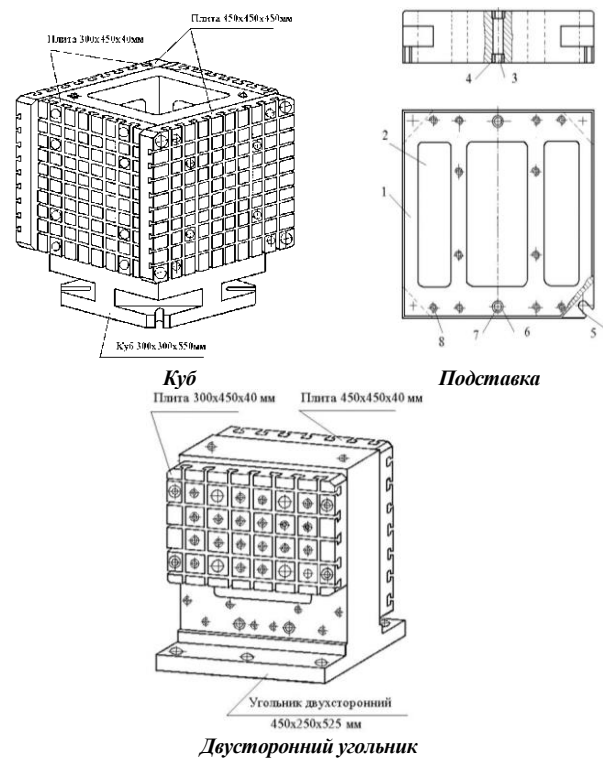


Рис. 1 – Приспособления рамной конструкции, оснащаемые базовыми плитами с Т-образными пазами

На рис. 3 представлена структура подсистемы автоматизированного анализа и синтеза базовых плит с Т-образными пазами "СААС-БП", реализующая предложенную в работе технологию исследований применительно к данному классу объектов.

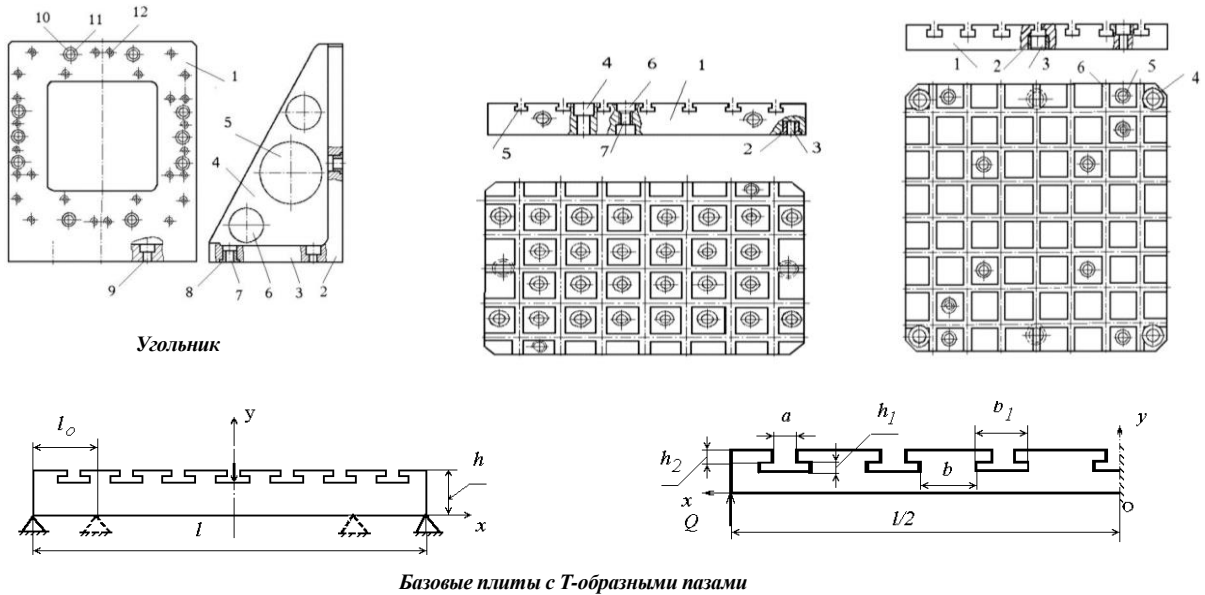
С использованием данной системы было проведено исследование БП-ТП с применением 2D элементов. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния полосы с Т-образными пазами (см. рис. 1, 2). Граничное условие – жесткое закрепление в сечении  $x = 0$ . Нагрузка приложена в сечении  $x = l/2 - l_0$ .

Прочностные и жесткостные характеристики полосы определяются системой параметров  $l, l_0, h, h_1, h_2, b, b_1$ . Постановка некоторой оптимизационной задачи для определения значений параметров в традиционном ее виде нецелесообразна, поскольку система ограничений на различные параметры такова, что область варьирования в пространстве данных параметров имеет сложную форму (неодносвязная, вырожденная по некоторым направлениям в определенных зонах и т.д.).

В связи с этим более рационален другой подход, который в общем виде состоит в определении зависимостей

$$v = v(\mathbf{p}), \quad \sigma = \sigma(\mathbf{p}). \quad (1)$$

Здесь  $v, \sigma$  – некоторые жесткостные и прочностные характеристики исследуемой полосы, а  $\mathbf{p}$  – вектор варьируемых параметров  $l, l_0, h, h_1, h_2, b, b_1$ .



Угольник

Базовые плиты с T-образными пазами

Рис. 2 – Приспособления рамной конструкции, оснащаемые базовыми плитами с T-образными пазами

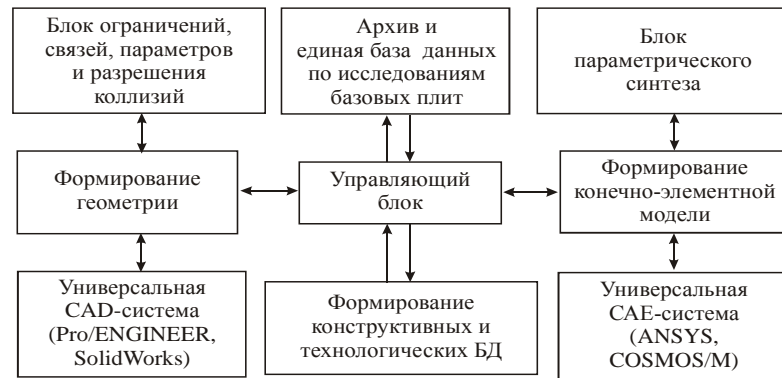


Рис. 3 – Структура специализированной подсистемы автома тизированного анализа и синтеза "СААС-БИТ"

Наличие таких зависимостей позволяет кон-структуру оснастки при задании соответствующих ограничений  $v \leq \bar{v}$ ,  $\sigma \leq \bar{\sigma}$  оперативно решать пробле-му выбора параметров  $p_i$  с учетом конкретных усло-вий, конструктивных или технологических требова-ний или, наоборот, технологу при задании некоторых параметров  $p_i$  назначать соответствующие режимы обработки деталей с учетом ограничений.

В частном виде сформулированная задача состо-ит в определении зависимостей

$$v_j = v_j(p_j), \sigma_j = \sigma_j(p_j), \quad (2)$$

где  $j$  – номер некоторого заранее выбранного параметра при фиксированных значениях остальных параметров  $p_k^{(0)}$ .

В некоторых случаях представляет интерес так-же определение чувствительности параметров  $v, \sigma$  к изменению параметров  $p_i$ :

$$\lambda_i^{(v)} = \frac{\partial v}{\partial p_i}, \lambda_i^{(\sigma)} = \frac{\partial \sigma}{\partial p_i}. \quad (3)$$

Параметры  $\lambda_i^{(v)}, \lambda_i^{(\sigma)}$  дают представление о ско-

рости изменения  $v, \sigma$  в некоторой точке параметриче-ского пространства в соответствующем направлении. Иногда для конструктора важны также некоторые интегральные характеристики:

$$\alpha_i^{(v)} = (v_{\max} - v_{\min}) / \Delta p_i, \alpha_i^{(\sigma)} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / \Delta p_i, \quad (4)$$

где  $\Delta p_i$  – или величина интервала варьирования пара-метра, или величина интервала между максимальным и минимальным значениями  $v, \sigma$  (по выбору исследова-теля или с учетом специфики конкретной задачи). Кроме величин скоростей, представляют интерес также абсо-лютные величины перепадов параметров  $v, \sigma$  на соот-ветствующих заданных интервалах варьирования  $p_i$

$$\gamma_i^{(v)} = v_{\max} - v_{\min}, \gamma_i^{(\sigma)} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}. \quad (5)$$

Сопоставление значений  $\alpha, \gamma, \lambda$  дает проекти-ровщикам исходную информацию о характере изме-нения  $v, \sigma$  в пространстве параметров, а также о при-оритетности (или целесообразности) варьирования параметров  $p_i$ . В частности, при исследовании влия-ния высоты паза  $h_1$  на прочностные и жесткостные

характеристики полосы в качестве контролируемых параметров были выбраны максимальные значения перемещений точек полосы  $u_m, v_m$  вдоль осей  $x, y$  соответственно и напряжений  $\sigma_x^{(m)}$ . Базовый вариант параметров  $\vec{p}^{(0)}$ :  $l = 450$  мм,  $l_0 = 0$  мм,  $h = 40$  мм,  $h_1 = 8$  мм,  $h_2 = 10$  мм,  $b = 36$  мм,  $b_1 = 24$  мм. Толщина полосы – 1 мм. Нагрузка  $Q = 55$  Н.

### Результаты численных исследований

Результаты расчетов приведены в табл. 1, 2.

Искомые приближенные зависимости могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} u_m &= 161 + 15,5(h_1 - 8) + 1,47(h_1 - 8)^2, \\ v_m &= 828 + 80,3(h_1 - 8) + 7,87(h_1 - 8)^2, \\ \sigma_x^{(m)} &= 231 + 17,4(h_1 - 8) + 1,57(h_1 - 8)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Параметры чувствительности –

$$\frac{\partial u_m}{\partial h_1} = 15,5 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{\partial v_m}{\partial h_1} = 80,3 \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \sigma_x^{(m)}}{\partial h_1} = 17,4 \cdot 10^3 \text{ МПа/м}. \quad (8)$$

Таблица 1 – Характеристики НДС полосы с Т-образными пазами

№	$h_1$ , мм	$u_m$ , мкм	$v_m$ , мкм	$\sigma_x^{(m)}$ , МПа
1	4	148,6	770,3	184
2	6	155,5	817,8	190,1
3	8	165	882	223,4
4	10	178,6	972,5	261,1
5	14	229,4	1297,7	385
6	18	363,3	2124,1	626,2

Представляет интерес качественный анализ полученных результатов:

- характер деформирования полосы с пазами в целом соответствует характеру деформирования полосы без пазов;
- напряжения в области "гребешков" убывают, в области пазов – растут, изменяясь волнообразно вдоль оси  $x$ ; при этом в целом распределение напряжений по общему характеру примерно соответствует характеру распределения в сплошной полосе;
- величина прогибов полосы с пазами – промежуточная между плитой без пазов и плитой без гребешков; с этой точки зрения можно вычислить некоторую "эквивалентную" толщину полосы, у которой жесткостные параметры соответствуют аналогичным параметрам полосы с пазами (в данном случае примерно 28 мм);
- для напряженного состояния характерно резкое увеличение напряжений в зонах концентраторов, образуемых сопряжениями паз – "гребешок".

Таким образом, для оперативного анализа деформированного состояния плит с Т-образными пазами можно использовать модели сплошных плит с "эквивалентной" толщиной, приближенно учитывая

влияние варьирования параметров по соотношениям вида (1), (2), а для напряженного состояния в число определяющих параметров модели необходимо ввести радиус закругления в сопряжениях паз – "гребешок" и определить аналогичные зависимости для нового набора параметров.

Аналогичные полученные результаты и при варьировании других параметров плиты. В результате формируется сравнительно большого объема задача об определении зависимости параметров НДС полосы от всех параметров  $p_i$ . Она решалась с использованием разработанных систем (см. рис. 3).

На рис. 4–9 представлены этапы и результаты исследования жесткостных характеристик базовой плиты при варьировании геометрических размеров и размеров конечных элементов, образующих конечно-элементную сетку.

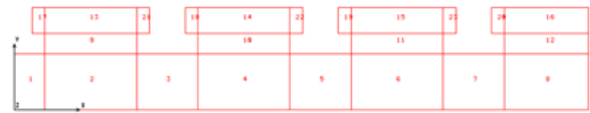


Рис. 4 – Построение геометрии

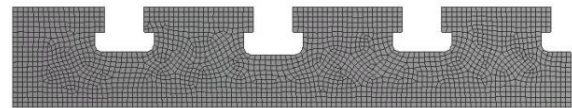


Рис. 5 – Создание конечно-элементной сетки



Рис. 6 – Распределение прогиба



Рис. 7 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу

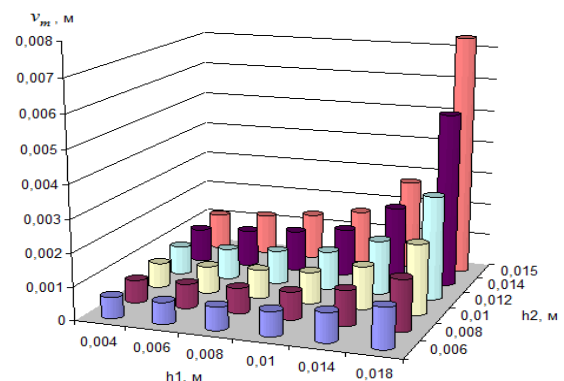


Рис. 8 – Зависимость максимальных прогибов (м) полосы от варьируемых параметров  $h_1, h_2$  (мм)

Таблица 2 – Перемещения и напряжения в полосе с Т-образными пазами

№	Параметр	Картина распределения (вариант 3, см. табл. 1)	Зависимость параметра от высоты плиты $h_1$ , мм
1	$u_m$ , МКМ		
2	$v_m$ , МКМ		
3	$\sigma_x^{(m)}$ , МПа		

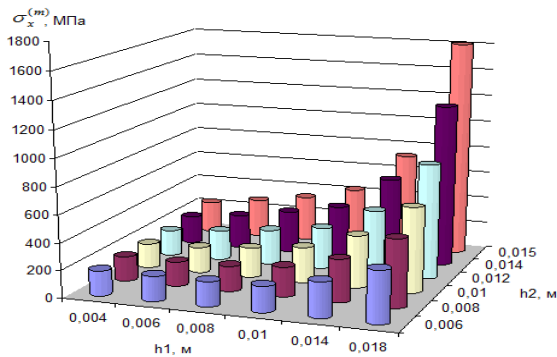


Рис. 9 – Зависимость максимальных эквивалентных напряжений (МПа) полосы от варьируемых параметров  $h_1, h_2$  (мм)

На рис. 10–12 представлены некоторые результаты исследований, проведенные на моделях с более мелкой сеткой (количество элементов и узлов увеличено примерно в  $10^{\pm 12}$  раз).

Видно, что существенной корректировки результатов по сравнению с более грубой сеткой не произошло, за исключением зон концентраторов.

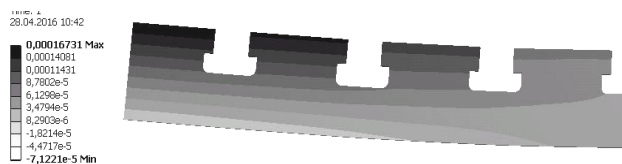


Рис. 10 – Перемещения вдоль оси  $Ox$ , м



Рис. 11 – Перемещения вдоль оси  $Oy$ , м

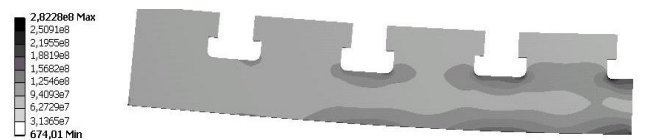


Рис. 12 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, Па

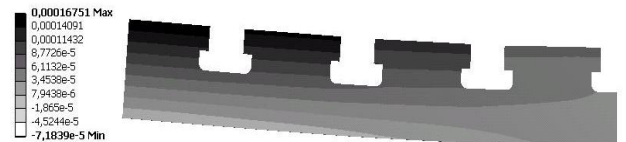


Рис. 13 – Перемещения вдоль оси  $Ox$ , м

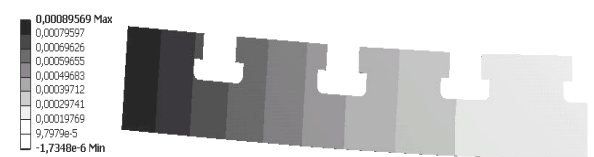


Рис. 14 – Перемещения вдоль оси  $Oy$ , м

Кроме того, проведен ряд расчетов в 3D постановке (см. рис. 13–15). Здесь тоже не получено принципиально отличного характера распределения компонент НДС базовых плит.



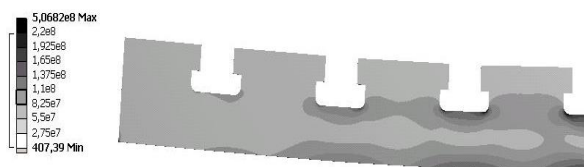


Рис. 15 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, Па

### Заключение

Полученные при многовариантных исследованиях результаты исследований жесткости и прочности базовых плит позволяют построить в параметрическом пространстве эти характеристики как функцию многих переменных. При необходимости множество параметров можно расширить, и тогда получаемый набор данных содержит полную информацию о жесткости, а, соответственно, и прочности, точности обработки и работоспособности целого класса базовых плит.

Разработанная на основе предложенных в работе подходов специализированная система «СААС-БП» позволяет решить весь комплекс задач при проектировании базовых плит, а также при обосновании использования тех или иных типоразмеров плит при оснащении металлорежущих станков исходя из габаритов, формы, свойств материала обрабатываемых деталей на предприятиях машиностроения, и в т.ч. – отечественного бронетанкостроения.

### Список литературы

1. Пономарев Е.П. Перспективы развития легких ВГМ / Е.П. Пономарев // Механика та машинобудування.– 2003.– № 1.– Том 1. – С.278-281.
2. Рязанцев Н.К. Концепция украинского танкового двигателя / Н.К. Рязанцев // Механика та машинобудування.– 2003.– № 1.– Том 1. – С. 281-286.
3. Медин А. Особенности развития сухопутных войск США / А. Медин // Зарубежное военное обозрение. – 2000. – № 1. – С.11-14.
4. Печуров С. От видовой концепции к новой технике сухопутных войск США / С. Печуров // Зарубежное военное обозрение. – 2000. – № 11. – С.14-17.
5. Петров А.О. О востороннем состоянии перспектив развития вооруженных сил США / А.О. Петров // Зарубежное военное обозрение. – 2002. – № 2. – С.35-40.
6. Norberto Lopez de Lacalle Machine Tools for High Performance Machining / Norberto Lopez de Lacalle, Aitzol Lamikiz Mentxaka – Springer Science & Business Media, 2008. – 442 p.
7. Krar S. Machine Tool Technology Basics / S. Krar, A. Gill // Industrial Press Inc., 2003. – 416 p.
8. Youssef H. Machining Technology: Machine Tools and Operations / H. Youssef, H. El-Hofy // CRC Press, 2008. – 672 p.
9. Kesavan R. Machine Tools / R. Kesavan // Laxmi Publications, Ltd., 2010. – 454 p.
10. ГОСТ 8–82. Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность. – Взамен ГОСТ 8–77; Введ. 23.09.82. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.
11. ГОСТ 25443–82. Станки металлорежущие. Образцы-изделия для проверки точности обработки. Общие технические требования. – Введ. 09.09.82. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 8 с.
12. Вороненко В.П. Проектирование автоматизированных участков и цехов. / В.П. Вороненко, В.А. Егоров, М.Г. Косов [и др.]. – М.: Высшая школа, 2000. – 272 с.
13. Осипов В.В. Нормирование точности в машиностроении / В.В. Осипов, Н.Н. Марков – М.: Высшая школа, 2001. – 335 с.
14. Андреев Г.Н. Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства: Учеб. Пособие / Г.Н. Андреев, В.Ю. Новиков, А.Г. Схригладе // Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высшая школа, 1999. – 415 с.

15. Борончукова И.М. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения / И.М. Борончукова, А.А. Гусев. [и др.]. – М.: Высшая школа, 1999. – 416 с.

16. Кочетков А.М. Концепция создания отраслевой системы ускоренной технологической подготовки производства на базе универсально-сборной переналаживаемой технологической оснастки / А.М. Кочетков, Н.Д. Жолткевич, И.Я. Мовшович, В.И. Глушенко // Вопросы оборонной техники. – 1990. – Сер. 2, вып.10 (229).– С.3-7.

17. Глушенко В.И. Механизированная станочная оснастка – эффективное средство повышения производительности станков / А.С. Кобзев, В.И. Глушенко // Вопросы оборонной техники. – 1990. – Сер. 2, вып.10 (229).– С.8-13.

18. Жолткевич Г.Н. Автоматизация проектирования технологической оснастки: Теория и практика / Г.Н. Жолткевич – К.: Техніка, 1992. – 216 с.

19. Ряховский А.В. Исследование точностных параметров изготовления элементов унифицированной технологической оснастки / А.В. Ряховский, А.И. Бых, А.Я. Мовшович // Механика та машинобудування.– 2003.– № 1.– Том 2.– С.308-312.

20. Решетов Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.

21. Пшеничный М.В. Совершенствование переналаживаемой технологической оснастки для обработки корпусных деталей. Диссертация канд. техн. наук, Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва, 2007 – 153 с.

22. Кобзев А.С. Разработка и внедрение переналаживаемой технологической оснастки для многооперационных станков и ГПС. – Дис. канд.техн.наук. – М. 1990. – 251 с.

23. Капустин Н.М. Исследование прочностных и жесткостных характеристик элементов переналаживаемых приспособлений для станков с ЧПУ / Н.М. Капустин, Е.И. Заярненко, А.А. Капустин, Н.А. Ткачук // В сб.: Вопросы оборонной техники. Серия 2. – 1987. – № 7. – С. 42–47.

24. ГОСТ 31.111.41-83. Система стандартов технологической оснастки. Детали и сборочные единицы универсально-сборных приспособлений к металлорежущим станкам. Основные параметры. Конструктивные элементы. Нормы точности. – М.: Издательство стандартов, 1983.

### Bibliography (transliterated)

1. Ponomarev E.P. Perspektiviyi rozvitiya legkih VGM / E.P. Ponomarev // Mehanika ta mashinobuduvannya.– 2003.– No 1.– Tom 1. – P. 278-281.
2. Ryazantsev N.K. Kontseptsiya ukrainskogo tankovogo dvigatelestroeniya / N.K. Ryazantsev // Mehanika ta mashinobuduvannya.– 2003.– No 1.– Tom 1. – P.281-286.
3. Medin A. Osobennosti rozvitiya suhoputnykh voysk SShA / A. Medin // Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – 2000. – No 1.– P.11-14.
4. Pechurov S. Ot vidovoy kontseptsii k novoy tehnikе suhoputnykh voysk SShA / S. Pechurov // Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – 2000. – No 11. – P.14-17.
5. Petrov A.O. O vsestoronnem sostoyanii perspektiv rozvitiya vooruzhennykh sil SShA / A.O. Petrov // Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – 2002. – No 2. – P.35-40.
6. Norberto Lopez de Lacalle Machine Tools for High Performance Machining / Norberto Lopez de Lacalle, Aitzol Lamikiz Mentxaka – Springer Science & Business Media, 2008. – 442 p.
7. Krar S. Machine Tool Technology Basics / S. Krar, A. Gill – Industrial Press Inc., 2003. – 416 p.
8. Youssef H. Machining Technology: Machine Tools and Operations / H. Youssef, H. El-Hofy – CRC Press, 2008. – 672 p.
9. Kesavan R. Machine Tools / R. Kesavan – Laxmi Publications, Ltd., 2010. – 454 p.
10. GOST 8–82. Staniki metallorēzhushchie. Obschie trebovaniya k ispytaniyam na tochnost. – Vzamen GOST 8–77; Vved. 23.09.82. – Moscow: Izd–vo standartov, 1982.– 10 p.
11. GOST 25443–82. Staniki metallorēzhushchie. Obratzysy–izdelyiya dlya proverki tochnosti obrabotki. Obschie tehnicheckie trebovaniya. – Vved. 09.09.82. – Moscow: Izd–vo standartov, 1982.– 8 p.
12. Voronenko V.P. Proektirovanie avtomatizirovannykh uchastkov i tsehov. / V.P. Voronenko, V.A. Egorov, M.G. Kosov [i dr.]. – Moscow: Vysshaya shkola, 2000. – 272 p.
13. Osipov V.V. Normirovanie tochnosti v mashinostroenii / V.V. Osipov, N.N. Markov. – Moscow: Vysshaya shkola, 2001. – 335 p.
14. Andreev G.N. Proektirovanie tehnologicheskoy osnastki

mashinostroitel'nogo proizvodstva: Ucheb. Posobie / G.N. Andreev, V.Yu. Noviko, A.G. Shirladze / Pod red. Yu.M. Solomentseva. – Moscow: Vysshaya shkola, 1999. – 416 p.

15. **Boronchukova I.M.** Proektirovanie tehnologii avtomatizirovannogo mashinostroeniya / I.M. Boronchukova, A.A. Gusev. [i dr.]. – Moscow: Vysshaya shkola, 1999. – 416 p.

16. **Kochetkov A.M.** Kontsepsiya sozdaniya otraslevoiy sistemyi uskorennoy tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva na baze universalno-sbornoy perenalazhivaemoy tehnologicheskoy osnastki / A.M. Kochetkov, N.D. Zholtkevich, I.Ya. Movshovich, V.I. Gluschenko // Voprosyi oboronnoy tehniki. – 1990. – Ser. 2, vyp.10 (229). – P.3-7.

17. **Gluschenko V.I.** Mehanizirovannaya stanochnaya osnastka – effektivnoe sredstvo povysheniya proizvoditelnosti stankov / V.I. Gluschenko, A.S. Kobzev. // Voprosyi oboronnoy tehniki. – 1990. – Ser. 2, No 10 (229). – P.8-13.

18. **Zholtkevich G.N.** Avtomatizatsiya proektirovaniya tehnologicheskoy osnastki: Teoriya i praktika / G.N. Zholtkevich. – Kiev: Tehnika, 1992. – 216 p.

19. **Ryahovskiy A.V.** Issledovanie tochnostnykh parametrov izgotovleniya elementov unifitsirovannoy tehnologicheskoy osnastki / A.V. Ryahovskiy, A.I. Byih, A.Ya. Movshovich // Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2003. – No 1. – Tom 2. – P.308-312.

20. **Reshetov D.N.** Tochnost metallorazhushchih stankov / D.N. Reshetov, V.T. Portman. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 336 p.

21. **Pshenichniy M.V.** Sovershenstvovanie perenalazhivaemoy tehnologicheskoy osnastki dlya obrabotki korpusnykh detaley. Dissertatsiya kand. tehnik. nauk, Moskovskiy gosudarstvenniy universitet priborostroeniya i informatiki, Moscow, 2007 – 153 p.

22. **Kobzev A.S.** Razrabotka i vnedrenie perenalazhivaemoy tehnologicheskoy osnastki dlya mnogooperatsionnykh stankov i GPS. – Dis. kand.tehn.nauk. – Moscow. 1990. – 251 p.

23. **Kapustin N.M.** Issledovanie prochnostnykh i zhestkostnykh harakteristik elementov perenalazhivaemykh prispособleniy dlya stankov s ChPU / N.M. Kapustin, E.I. Zayarnenko, A.A. Kapustin, N.A. Tkachuk // V sb.: Voprosy oboronnoy tehniki. Seriya 2. – 1987. – No 7. – P.42–47.

24. **GOST 31.111.41-83.** Sistema standartov tehnologicheskoy osnastki. Detali i sborchnyie edynitsyi universalno-sbornykh prispособleniy k metallorazhushchim stankam. Osnovnyie parametryi. Konstruktivnyie elementy. Normyi tochnosti. M.: Izdatelstvo standartov. 1983.

*Поступила (received) 10.10.2016*

### *Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

Базовые плиты для оснащения приспособлений для станков с ЧПУ и ОЦ в спецпроизводстве: обоснование параметров на основе расчетных исследований / М. А. Чубань, Н. А. Ткачук, А. И. Шейко, Н. Л. Белов, И. Я. Храмова, А. А. Зарубина, А. В. Ткачук, Н. В. Шеманская, А. Д. Нестеренко // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – № 39 (1211). – С. 114-124. – Библиогр. 24 назв. – ISSN 2079-0775.

Base plates for equipping of devices for CNC and MC machine tools in specialized production: justification of parameters based on computational researches / M. Chuban, M. Tkachuk, O. Sheyko, N. Belov, I. Khramtsova, A. Zarubina, G. Tkachuk, N. Shemanska, O. Nesterenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No 39 (1211). – P. 114–124. –ISSN 2079-0775.

Базові плити для оснащення пристосувань для верстатів з ЧПУ та ОЦ в спецвиробництві: обґрунтування параметрів на основі розрахункових досліджень / М. О. Чубань, М. А. Ткачук, О. І. Шейко, М. Л. Белов, І. Я. Храмова, А. О. Зарубіна, Г. В. Ткачук, Н. В. Шеманская, О. Д. Нестеренко // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ "ХПИ", 2016. – № 39 (1211). – С. 114-124. – Бібліогр. 24 назв. – ISSN 2079-0775.

### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Чубань Марина Олександрівна** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант каф. "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: [marina.bondarenko@tmm-sapr.org](mailto:marina.bondarenko@tmm-sapr.org).

**Chuban Maryna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student at the Department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines"; phone: (057) 707-69-01; e-mail: [marina.bondarenko@tmm-sapr.org](mailto:marina.bondarenko@tmm-sapr.org).

**Ткачук Микола Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-02; e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org).

**Tkachuk Mykola** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chief of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-02; e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org).

**Шейко Олександр Іванович** – головний інженер. ДП "Завод ім. В.О. Малишева", тел. (057) 707-69-02, [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org).

**Sheyko Oleksandr** – chief engineer at the SE "Zavod im. V. O. Malisheva", tel.: (057) 707-69-02, [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org).

**Белов Микола Львович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01.

**Belov Mykola** – Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Researcher at Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01.

**Храмова Ірина Яківна** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01.

**Khramtsova Irina** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", research associate at Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01.

**Зарубіна Алла Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01.

**Zarubina Alla** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",

Professor at Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01.

**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 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 AA Morozov Department; tel.: (057) 707-63-35

**Шеманська Наталія Вікторівна** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", студент кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01.

**Shemanska Nataliya** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01.

**Нестеренко Олексій Дмитрович** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", студент кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01.

**Nesterenko Oleksiy** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01.

