

когда овальность при изгибе по данному радиусу выходит за пределы допуска, гибку производят с наполнителем, который заполняет внутреннюю полость заготовки и сообщает дополнительную жесткость сечению. В качестве наполнителя чаще всего применяется сухой мелкий песок, реже – жидкость, канифоль или легкоплавкие металлы и сплавы.

В специальных приспособлениях и на станках гибку часто производят со стальной оправкой (дорном) или гибкой оправкой, вставленной во внутрь трубы. Если овальность лишь незначительно превышает допустимую, то гибка может производиться без наполнителя, а затем овальность устраняется калибровкой стальными шариками; диаметр последнего, калибрующего шарика должен быть равен внутреннему диаметру изделия. Шарик могут проталкиваться или протаскиваться через внутреннюю полость трубы в штампе или в специальном приспособлении. Наполнитель или калибровка шариками уменьшают или предотвращают полностью также гофры или волны, возникающие на вогнутой стороне трубы от потери устойчивости стенки.

**Заключение.** Следует отметить, что сравнительно большое изменение толщин стенок позволяет назначать значительное формоизменение заготовки. Так, для трубопроводов низкого и среднего давления допускается утонение от 15% до 25%, что дает возможность изгибать трубу по радиусу, равному двум диаметрам. Однако потеря устойчивости и искажение сечения заготовок, особенно тонкостенных, делает такое формоизменение трудно осуществимым в производственных условиях; обычно радиус изгиба меньше 2,5-3 диаметров допускается редко. Образование овальности происходит в силу специфики механизма деформирования трубы.

*Поступила в редколлегию 08.04.08*

**УДК 539.3**

**Г.Д. ГРИЦЕНКО**, проф. каф. ТММиСАПР, канд. техн. наук,  
**А.В. ТКАЧУК**, канд. тех. наук, ст. науч. сотр. каф. ЭИКТ,  
**Н.А. ТКАЧУК**, докт. техн. наук, зав. каф. ТММиСАПР,  
**Е.В. ПЕЛЕСЬКО**, мл. науч. сотр. каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ”,

**С.Т.БРУЛЬ**, Начальник Центрального бронетанкового управления Вооружения Главного управления логистики Командования сил поддержки Вооруженных Сил Украины, г. Киев,  
**А.В. ЛИТВИНЕНКО**, вед. инж. проекта, ОАО „Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь

### **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ**

Запропоновано метод визначення раціональних параметрів елементів складних механічних систем на прикладі корпусів легкоброньованих машин. Наведено об'єкти застосування інтегральних схем досліджень. Описані просторові моделі корпусу БТР-94Б в середовищі Pro/ENGINEER та ANSYS.

It is proposed method for the determination of rational parameters of the complicated mechanical systems elements. The objects for application of the integral scheme are presented. 3D BTR-94B hull models (Pro/ENGINEER and ANSYS) are described.

**Введение.** Современные компьютерные программно аппаратные комплексы позволяют резко интенсифицировать процессы проектирования, исследования и технологической подготовки производства новых изделий с высокими техническими характеристиками. При этом на этапе моделирования физико-механических характеристик, протекающих в процессе эксплуатации или применения сложных машиностроительных конструкций очень высокие требования предъявляются к точности и адекватности создаваемых численных моделей, к возможности программного обеспечения и к вычислительным ресурсам. В связи с этим для решения таких сложных задач привлекается, например, компьютерные кластеры с установленными мощными системами CAD/CAM/CAE типа Pro/ENGINEER, CATIA, UG, ANSYS, NASTRAN и др. При этом этап разработки моделей, в частности для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом различного вида нелинейностей, нестационарных или связанных термо-упругих задач, является узким местом во всей цепочке исследований. Он требует много времени, затрат труда высококвалифицированных исследователей, а также страдает отсутствием технологии сквозной параметричности, широкой ассоциативности моделей, бесконфликтности форматов представления данных при передаче из одной системы автоматизированного проектирования, изготовления и исследования – в другую. Это противоречие между потенциально широкими и глубокими возможностями универсальных CAD/CAM/CAE-систем и оперативными потребностями практики формирует актуальную и важную задачу создания теоретических основ методологии, свободной от отмеченных выше недостатков. Решению этой проблемы на примере исследования напряженно-

деформированного состояния и синтеза корпусов легкобронированных машин (ЛБМ) по критериям прочности, жесткости и минимальной массы посвящена данная статья.

**1. Общие подходы к постановке задачи и схемам исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем на примере корпусов легкобронированных транспортных средств.** В вооруженных силах большинства армий мира в настоящее время преобладает тенденция все более широкого применения легкобронированных транспортных средств. При этом перед проектировщиками данной техники возникают задачи выбора рациональных конструктивных схем и параметров, обеспечивающих требуемый уровень большого количества технических характеристик. Одними из основных являются прочностные, жесткостные и динамические параметры корпусов, являющихся основными силовыми элементами, замыкающими на себе действующие статических, динамических и импульсных нагрузок (как внешних, так и внутренних, в зависимости от источника воздействия). Это вынуждает проводить анализ напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин как элементов сложных механических систем [1-4].

Кроме того, при определении напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ с целью рационального выбора их конструктивных параметров для обеспечения высоких технических характеристик необходимо учитывать: сложность геометрической формы корпуса, который обычно представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из множества пластин, стержней, массивных элементов; сложность ЛБМ как механической системы взаимодействующих систем, узлов и агрегатов; многообразие режимов эксплуатации и условий применения; возможность широкой модернизации исследуемого объекта (с установкой новых типов силового агрегата, трансмиссии, ходовой части).

Все перечисленные факторы в совокупности приводят к формулировке исходной задачи как пространственной задачи для механической системы сложной структуры при воздействии на нее в общем случае статических, динамических и импульсных сил, а также кинематического нагружения. С учетом сложности и громоздкости прямого решения возникающей задачи предлагается схема разделения задачи определения напряженно-деформированного состояния ЛБМ как единой механической системы на 2 подзадачи. Сама легкобронированная машина при этом представима в виде

двух подсистем. На рис.1 показана схема разделения ЛБМ как единой механической системы на подсистемы. Первая подсистема представляет собой собственно корпус ЛБМ. Вторая подсистема содержит все остальные основные элементы (условно обозначаем ЭЛБМ).



Рис. 1. Схема разделения ЛБМ как единой механической системы на подсистемы

Таблица 1

Виды нагрузок на корпус ЛБМ

Типы нагрузок	Компоненты		
	Подвеска	Элементы внутри корпуса и сам корпус	Башня
Статические	Реакция в состоянии покоя	Вес	Вес
Динамические	Неровности рельефа местности	Инерционные силы	Инерционные силы
Импульсные	Пробой подвески	-	Усилия стрельбы
Подвижные	Динамическая реакция	Ударная волна	Ударная волна

Характерной особенностью структуры данного разбиения является то, что элементы подсистемы ЭЛБМ взаимодействуют друг с другом в основном опосредованно через КЛБМ. Сам корпус замыкает на себе все силовые потоки в системе, а также определяет в основном текущее положение ЛБМ в пространстве и кинематическую связь (взаиморасположение) остальных его элементов. Кроме того, такое разделение ЛБМ на подсистемы характеризуется следующими свойствами (табл. 1):

- корпус ЛБМ, перемещаясь и деформируясь в пространстве, сохраняет в течение всего периода эксплуатации высокую жесткость;
- башня ЛБМ является источником силового воздействия, имеющего 3 основных составляющих: статическое воздействие силы веса башни; динамическое воздействие, вызываемое силами инерции при неравномерном движении; импульсное воздействие;

- силовой агрегат, трансмиссия, а также все грузы, размещенные внутри ЛБМ, оказывают 2 вида воздействия: статическое (сила веса) и динамическое (силы инерции);

- система поддрессирования с колесами оказывает 2 типа воздействий на корпус: статическое (силы реакций на весовую нагрузку корпуса и остальных узлов, систем и агрегатов ЛБМ) и динамическое (от кинематического воздействия неровностей рельефа, преобразованное в цепочке элементов подвески).

Таким образом, исходная задача разбивается на 2 подзадачи, причем для каждой механической подсистемы можно записать разрешающие соотношения, которые дополняются усилиями взаимодействия с другими подсистемами и условиями сопряжений этих подсистем. При этом порядок решения задач следующий:

- на первом этапе производится моделирование динамических процессов в ЛБМ как единой механической системе, в которой корпус ЛБМ выступает как жесткое тело;

- на втором этапе определенные на первом этапе силовые воздействия прикладываются к корпусу БТР, рассматриваемому как деформируемое твердое тело (рис.2).

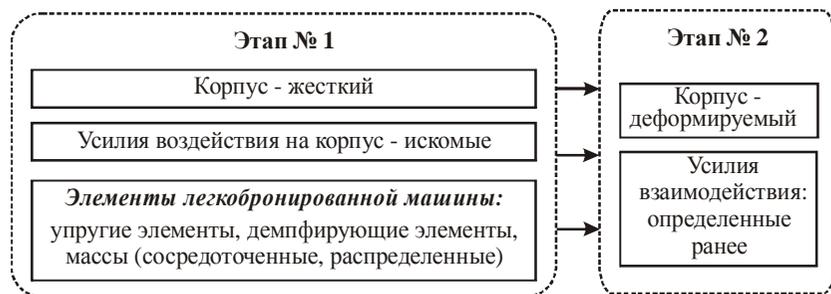


Рис. 2. Этапы решения задачи об исследовании динамических процессов в ходовой системе и напряженно-деформированного состояния корпуса ЛБМ

Предлагаемая схема обладает следующими преимуществами:

- естественное разделение различных по характеру конструкций, узлов, элементов и соответственно разделение общей задачи на две: краевую динамическую задачу для корпуса как системы с распределенными параметрами и начальную задачу для ЛБМ в целом как системы с конечным числом степеней свободы;

- переход от неоправданно громоздкой системы к рассмотрению подсистем с приемлемым уровнем сложности;

- физическая и структурная целесообразность;

- приемлемые требования к вычислительным ресурсам;

- сбалансированность уровней сложности получаемых подзадач (очень

сложная задача разбивается на две более простые, но примерно равные по сложности используемых математических моделей).

Это позволяет сделать заключение о рациональности предложенной схемы решения с точки зрения сбалансированного сочетания точности, полноты, строгости и затрат ресурсов.

**2. Интегрированная схема построения конечно-элементных моделей корпусов легкобронированных машин на основе параметрических пространственных моделей.** Корпусные элементы ЛБМ имеют сложную геометрическую форму и сложные законы нагружения, в связи с чем для определения их напряженно-деформированного состояния необходимо привлекать численные методы. В частности, наиболее развитым в настоящее время для решения задач такого класса является метод конечных элементов (МКЭ), который и предложен для анализа напряженно-деформированного состояния корпусных элементов легкобронированных машин.

Процесс исследований прочностных и жесткостных свойств корпуса ЛБМ с целью обоснованного выбора его конструктивных параметров достаточно ограничен во времени, поскольку время от начала проектных работ до изготовления опытного образца исчисляется месяцами. В силу этих обстоятельств простое механическое добавление процесса расчетных исследований напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ для выбора их рациональных конструктивных параметров в общую, сложившуюся в практике разработки новых изделий, последовательную линейную схему решения задачи испытаний и доводки конструкции, а также любая иная линейная последовательность, не могут быть приняты в качестве основной схемы решения возникающей задачи.

Эти и другие факторы (в частности, все более широкое внедрение современных технологий компьютерного проектирования с применением различных CAD/CAM/CAE-систем) приводят к необходимости внедрения параллельно-последовательной схемы проведения исследований. Это предполагает как параллельное проведение моделирования и исследований с использованием компьютерных моделей, а также разработки технологических процессов (причем на каждом этапе происходит корректировка всех типов информации - конструкторской, технологической и т.д.), так и параллельное проведение исследований в ходе всего цикла проектных работ.

Для обеспечения параллельного проведения исследований на всех

этапах работ (параллельно с разработкой моделей, чертежей, оснастки и т.д.) необходимо или использование единой информационной базы для всех этапов работ, или разработку специальных процедур согласования структур данных на различных этапах.

К сожалению, в практике отечественных предприятий в настоящее время не может быть выстроена единая цепь автоматизированных взаимосвязанных этапов „проектирование – конструирование – исследование – технологическая подготовка – производство – сбыт” в связи с высокой стоимостью технической и организационной перестройки. В лучшем случае в наличии отдельные фрагменты данной цепи или отдельные ее звенья. В этой связи приходится прикладывать дополнительные усилия для создания связей между отдельными этапами (при внедрении современной технологии эти связи поддерживаются автоматически). Это может быть осуществлено как в ручном режиме, так и путем создания специализированных систем автоматизированного проектирования, исследования и изготовления. Специализированные системы ориентированы на те или иные классы объектов. Для обмена информацией между этими системами и универсальными системами могут быть разработаны специальные форматы и программное обеспечение.

В то же время некоторые зарубежные системы (например, Pro/ENGINEER), обеспечивают единый формат хранения и обработки данных. Основой их функционирования является параметрический подход к пространственным, расчетным моделям и конструкторским документам.

Естественным образом предлагается использовать параметрический подход, в частности, к построению и исследованию моделей даже без обеспечения сквозной цепочки ассоциативных связей в течение выполнения проекта создания той или иной легкобронированной машины. В параметрической модели определяющими параметрами могут быть как конструктивные размеры, так и силовые воздействия, технологические параметры, физико-механические свойства материалов и т.д., а также варианты конструктивных решений. Важно то, что при параметризации модели корпуса ЛБМ соблюдается целостность конструкции при варьировании

отдельных ее параметров или наборов таких параметров. Параметризация также является основным шагом на пути применения того или иного метода оптимизации конструкции.

В связи с этим предложенная схема декомпозиции задачи на каждом этапе приобретает свойства сквозной параметризации (рис.3).

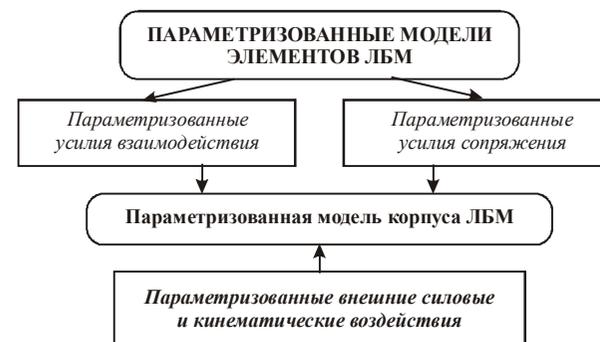


Рис. 3. Параметризованная модель корпуса в схеме декомпозиции конструкции и задачи анализа напряженно-деформированного состояния элементов ЛБМ

Существующие в настоящее время направления исследования механических конструкций можно разделить по типу используемого программного обеспечения, преимущества и недостатки которых приведены в табл. 2. Для устранения недостатков указанных типов программного обеспечения и объединения их преимуществ при исследовании напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ предлагается использовать интегрированные схемы исследований. Данные подходы объединяют универсальные САД-системы (например, PRO/ENGINEER), универсальные САЕ-системы (ANSYS), а также специальное ПО (в данном случае – „ОСТОВ-НАГРУЗКА”). Результатом работы всего указанного комплекса являются параметризованные конечно-элементные модели, которые позволяют оперативно производить построение баз данных и их модификацию для возникающих задач (статика, динамика, импульсные нагружения, подвижная нагрузка типа ударной волны и т.д.).

Таблица 2

Типы используемого программного обеспечения

Типы ПО	Преимущества	Недостатки
эти ванн ое прог рамм ное	оперативность	ограниченность возможностей
	минимальные требования к вычислительным ресурсам	необходимость затрат времени и средств на доработку ПО

	ограниченные требования к квалификации пользователя	вытеснение с рынка универсальными продуктами
Универсальное программное обеспечение	практически неограниченные принципиальные возможности	необходимость затрат времени на разработку моделей
	взаимодействие и интеграция с САПР различных типов	высокая стоимость
	отработанный удобный интерфейс	высокие требования к вычислительным ресурсам высокие требования к квалификации пользователя

Использование специализированных программных модулей позволяет дополнить современные мощные компьютерные системы проектирования и анализа накопленным опытом, знаниями и учетом специфики проектируемых изделий. При этом объединяются тенденции универсализации, возможностей интеллектализации моделей и

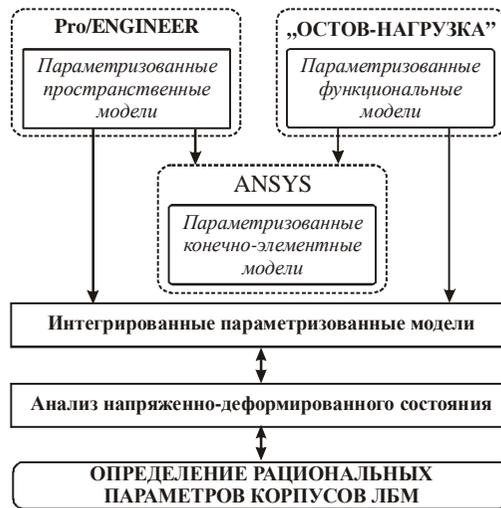


Рис.4. Комплексная схема исследования НДС корпуса ЛБМ

и специализации направленности. Интегрированные схемы исследований могут допускать использование на каждом этапе исследований также различных систем (как последовательно, так и параллельно). В этом случае получаем комбинированные схемы исследований. Таким образом, комплексная схема построения конечно-элементной модели корпусов ЛБМ и исследования их напряженно-деформированного состояния принимает многозвенный вид, представленный на рис.4.

### 3. Параметризованные конечно-элементные модели корпуса БТР-94Б.

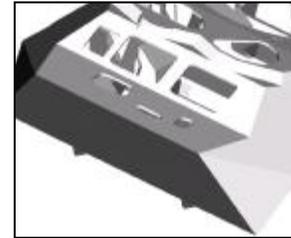


Рис. 5. Параметрическая модель корпуса БТР-94Б в среде Pro/ENGINEER

Возможности предложенных схем исследований НДС корпусов ЛБМ можно проиллюстрировать на примере построения параметризованных пространственных и конечно-элементных моделей (КЭМ) корпуса бронетранспортера БТР-94Б. На рис. 5,6 приведены пространственные твердотельные и конечно-элементные модели корпуса БТР-94Б, построенные в среде CADDSS5, Pro/ENGI-NEER, ANSYS. Исходные данные получены в CADDSS5. Затем в Pro/ENGINEER проведена модификация модели и ее параметризация. Используя интерфейс Pro/ENGINEER-ANSYS, полученная геометрическая информация использована для построения параметрических КЭМ корпуса БТР-94Б, содержащая более 18000 пластинчатых элементов. В качестве основных варьируемых параметров в данной модели используются: характеристики материала корпуса; толщины панелей корпуса; параметры импульсной нагрузки; характеристики рельефа неровностей дороги.

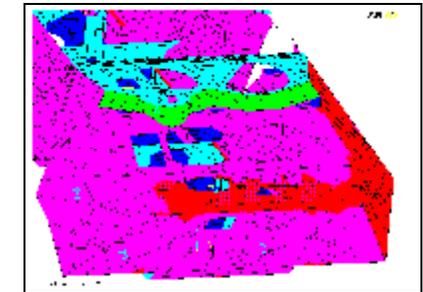
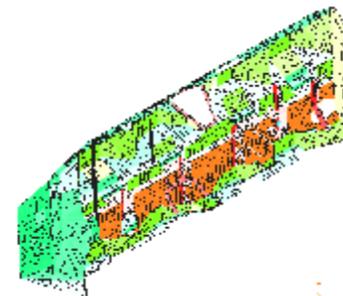


Рис. 6. Конечно-элементная модель корпуса БТР-94Б в среде ANSYS

Предложенный подход соединяет преимущества параметрического моделирования, универсальности и учета специфики исследуемых конструкций, специализированного программного обеспечения, а также классического метода конечных элементов.

**4. Область применения предложенного подхода.** При разработке интегрированных методов исследования элементов сложных механических систем предполагалось в общем случае рассмотрение систем общего вида. Поскольку легкобронированные транспортные средства являются одними из

наиболее типичных примеров таких сложных систем, то этапы построения численных моделей этих систем, а также их подсистем, продемонстрированы на процессе создания конечно-элементных моделей корпуса бронетранспортера БТР-94Б, многоцелевого тягача МТ-ЛБ, боевой машины пехоты БМП-3 и др. При этом впервые предложены: общая постановка задачи исследования НДС корпуса ЛБМ как составного элемента сложной механической системы; схема разделения исследуемой машины на подконструкции и соответствующее разделение исходной задачи на подзадачи; интегрированная схема построения конечно-элементной модели корпусов исследуемых машин на основе принципов параметричности, интегрируемости (т.е. совмещения проектных и расчетных этапов, а также использование различных САД и САЕ) и применения наряду с универсальными проектно-расчетными программными пакетами и специализированных расчетных модулей; схемы моделирования статических, динамических и импульсных воздействий на корпус ЛБМ; параметризованные конечно-элементные модели корпусов машин.

Приведенные решения позволяют сделать выводы о том, что предложенный комплекс методов, алгоритмов и программного обеспечения позволяет решать задачу определения напряженно-деформированного состояния наиболее ответственных и нагруженных элементов сложных механических систем (в т.ч. корпусов ЛБМ) с учетом всего множества факторов внешнего воздействия. Разработанные и приведенные в статье модели позволяют проводить структурную и параметрическую оптимизацию корпусов легкобронированных машин. В предложенном подходе сочетаются универсализм моделей и инструментов (а также учет специфики модернизируемой конструкции) с применением знаний, накопленных конструкторами и исследователями, а предложенная схема исследований органично встраивается в процесс проектирования, причем позволяет при дальнейших исследованиях оперативно оценивать прочностные и жесткостные характеристики корпусов и соответственно корректировать конструктивные параметры и схемы конструктивных решений.

Работа выполнена в рамках проекта ИТ/480-2007 МОН Украины.

*Список литературы:* 1. Гриценко Г.Д. *Интегрированная схема создания параметрических конечно-элементных моделей корпуса БТР для исследования его собственных колебаний.* – В сб.: *Вестник НТУ „ХПИ“.* – 2001. – № 7. – С.56-59. 2. Медведева А.В. *Определение вибрационных характеристик корпуса легкой гусеничной машины.* – В сб.: *Вестник Национального технического университета „Харьковский политехнический институт“.* – 2001. – № 7. – С.145-148. 3. Ткачук Н.А., Пономарев Е.П., Медведева А.В., Миргородский Ю.Я., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д. *Определение рациональных параметров элементов механических систем.* – *Механіка та машинобудування, 2001.* – № 1,2. – С. 308-314. 4. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. *Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування.* – 2006. – №1. – С.57-79.

УДК 539.3

**В.И. ГОЛОВЧЕНКО**, нач. расчетного бюро, канд. техн. наук,  
**Л.Е. ПОЛЕТУН**, гл. конструктор, **Н.Л. ИВАНИНА**, инж.,  
**И.В. БЕРДНИК**, ст. научн. сотр., канд. техн. наук,  
Головной специализированный конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь

### **ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ УПОРА РОЛЬГАНГА ТРАНСПОРТНО-ОТДЕЛОЧНОЙ ЛИНИИ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК**

Наведено розв'язання задачі визначення оптимальних параметрів демпферного листа упору, встановленого на лінії транспортування слябів. Розв'язок одержано для балочної моделі за допомогою системи MathCad. Перевірка міцності прийнятої конструкції листа виконано за застосуванням CE-комплексу ANSYS.

Solution of optimization problem for a plate of a damper for slabs transportation line is described. The solution was obtained with the help of Mathcad-system using a beam model, but strength checking of the adopted variant of the plate was performed with the help of ANSYS FE-complex.

**Введение.** Рассматриваемый упор проектировался для транспортно-отделочной линии машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), строящейся на металлургическом комбинате “Азовсталь” в г. Мариуполе. Заготовки, производимые на этой машине, представляют собой слябы толщиной 300 мм, шириной ~2,5 м. Масса сляба составляет около 60 т. Слябы в процессе их обработки (отделка, порезка) транспортируются по рольгангу. Скорость движения сляба по рольгангу составляет 0,5 м/с. В конце транспортной линии имеется упор, который должен остановить движущийся сляб в случае, если по какой-либо причине привод рольганга не будет выключен вовремя.

Упор представляет собой пакет стальных пружинящих листов, установленных в корпусе, закрепленном в полу цеха (рис. 1). Благодаря упругим свойствам листов, упор не только останавливает сляб, но и уменьшает силу удара сляба.

Такая конструкция упора известна (аналогичный упор установлен, в частности, на МНЛЗ кислородно-конвертерного цеха ММК им. Ильича в г. Мариуполе), однако поскольку массы слябов на азовстальской и ильичевской машинах различны, необходимо было разработать новый проект упора. Причем необходимо было разработать такой проект, по которому упор (а главное – пакет демпфирующих листов) можно было бы изготовить в условиях ОАО “Азовмаш” из имеющегося материала и при помощи имеющейся технологической оснастки для закалки листов.