
УДК 539.3

Полищук Т.В., Ткачук Н.Н.

**КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
МАКЕТА МЕХАНИЗМА НАКЛОНА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ**

Введение. При структурном и параметрическом синтезе механизмов наклона технологических машин со следящей нагрузкой и подвижным опиранием [1-14] возникает ряд связанных задач анализа кинематики, статики, напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов механизмов с учетом контактного взаимодействия. В работах [1-14] подробно описана методика, модели и результаты численного исследования такого класса механизмов на примере механизма наклона дуговой электроплавильной печи. Однако для оценки адекватности, точности построенных моделей и полученных результатов требуется проведение экспериментальных исследований и сопоставление с ними результатов численных расчетов.

Все приведенные и описанные в упомянутых работах численные исследования относились в основном не к полноразмерной модели механизма наклона плавильной печи (МНПП), а к его макету. Это обусловлено тем, что на этапе проектирования в руках исследователя, как правило, могут быть только конструкции-аналоги, а при их отсутствии – физические макеты. В данном случае был изготовлен макет механизма наклона плавильной печи, с помощью которого был проведен цикл экспериментальных исследо-

ваний. Он касается этапов моделирования кинематики, статики, исследования напряженно-деформированного состояния и контактных давлений. Целью и содержанием данной статьи является описание методики, установок и результатов экспериментальных исследований макета проектируемого механизма.

1. Методика экспериментальных исследований. На первом этапе проводились экспериментальные исследования кинематики механизма. На рис. 1 представлена схема непосредственных измерений положений точек макета в процессе движения МНПП, а также физическая модель с точками контроля. В точках контроля устанавливались лазеры, а их след фиксировался на экране (см. рис. 1) с некоторым шагом. Кроме того, проводилась серия снимков макета МНПП при изменении длины винтового механизма, моделирующего силовой гидроцилиндр. Дополнительно с большой выдержкой фиксировалась траектория движения лазерных следов от контрольных точек на экране. Кроме того, дополнительно проводилась (с одной фиксированной установки фотокамеры) серия фотоснимков с фиксацией и текущего положения платформы, и некоторых базовых точек на ней (см. рис. 1).

Полученный набор кадров и траекторий является базой для сравнения с результатами численного моделирования кинематики механизма.

На втором этапе экспериментальных исследований измерялись усилия в элементах макета механизма. На рис. 2 представлена схема установки тензорезисторов на макет гидроцилиндра и на шток имитатора весовой нагрузки. Тензорезисторы подсоединяются к измерителю статических деформаций ИСД-3 и при приложении нагрузки фиксируют деформацию тех элементов, на которые они наклеены. Предварительная тарировка (см. рис. 2) дает возможность по показаниям ИСД-3 вычислить усилия на штоке и на гидроцилиндре.

На третьем этапе проводилось контрольное измерение напряжений в области, прилегающей к зоне контакта цилиндрической опорной поверхности (ЦОП) с основанием.

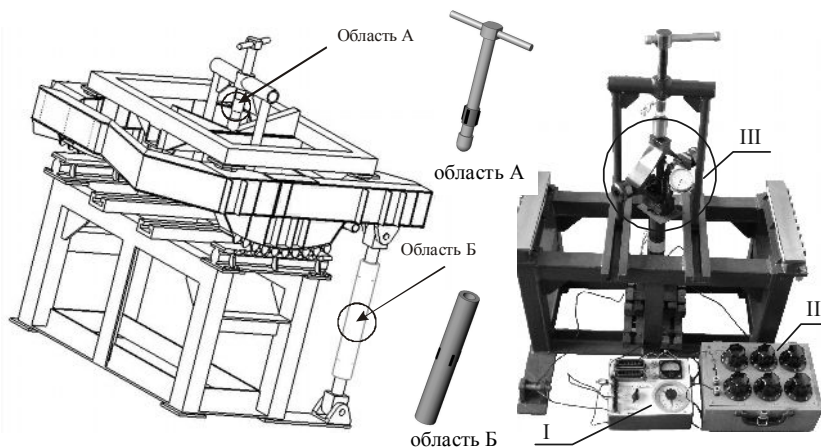


Рисунок 2 – Схема установки тензорезисторов для измерения усилий, действующих на макет МНПП, и аппаратура для измерения усилий и деформаций: I – тензометрический прибор ИСД-3; II – магазин сопротивления МСР-60М класса 0,02; III – универсальный динамометр сист. Токаря Н.Г. для номинальной нагрузки 5 т

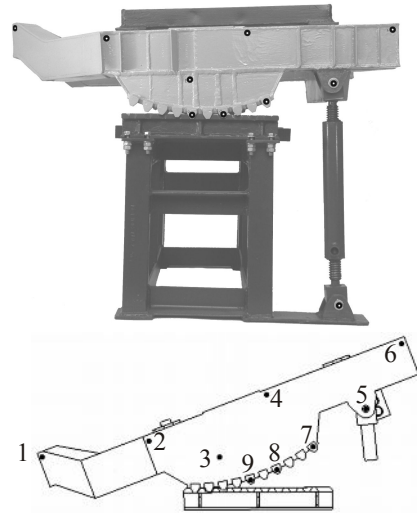


Рисунок 1 – Схема измерений перемещений базовых точек макета МНПП

Схема наклейки тензорезисторов на металлоконструкцию МНПП показана на рис. 3. Поскольку заранее при проведении численных исследований зоны с высокими уровнями напряжений уже были выявлены, то можно было ограничиться установкой небольшого количества тензодатчиков именно в наиболее нагруженных частях металлоконструкции.

На четвертом этапе экспериментальных исследований рассматривался очень важный фактор – характер распределения контактных зон и контактных давлений в сопряжении ЦОП МНПП с основанием. Одним из наиболее современных и высокоэффективных методов фиксации контактных давлений является использование контактных пленок Fujitsu. Они дают высокую точность измерений в широком диапазоне давлений (от 0,5 МПа до 100 МПа), в связи с чем были применены для фиксации давлений в сопряжении ЦОП с основанием (рис. 4).

Используемый комплекс методов является достаточно точным по своим характеристикам. Погрешность измерений в наиболее неблагоприятных режимах не превышает 1-10%. Сами используемые приборы до и после применения проверялись и в условиях лабораторных измерений показали погрешность не выше 1-5%.

2. Результаты экспериментальных исследований. На первом этапе исследований рассматривались характеристики движения механизма. Полученные положения, траектории контрольных точек представлены на рис. 5 (там же – результаты численных расчетов). Как видно, получено полное качественное совпадение численных и экспериментальных результатов, а также удовлетворительное количественное (погрешность – до 9 %). Это свидетельствует, во-первых, об адекватности созданных численных моделей МНПП для кинематического анализа и точности результатов, получаемых с помощью этих моделей. Этот факт обосновывает возможность применения разработанной модели для исследования кинематики реальной конструкции механизма наклона плавильной печи. Кроме того, поскольку данные кинематического анализа являются исходными данными для проведения остальных видов анализа, то можно констатировать, что базовые исходные данные для цепочки расчетов определяются достаточно точно, таким образом, исключается потеря времени вследствие допущения погрешности на первом их этапе.

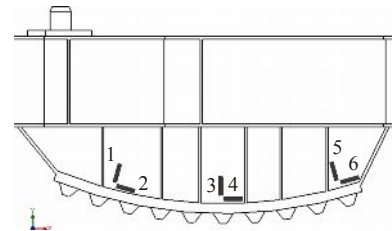


Рисунок 3 – Схема наклейки тензорезисторов на макете МНПП

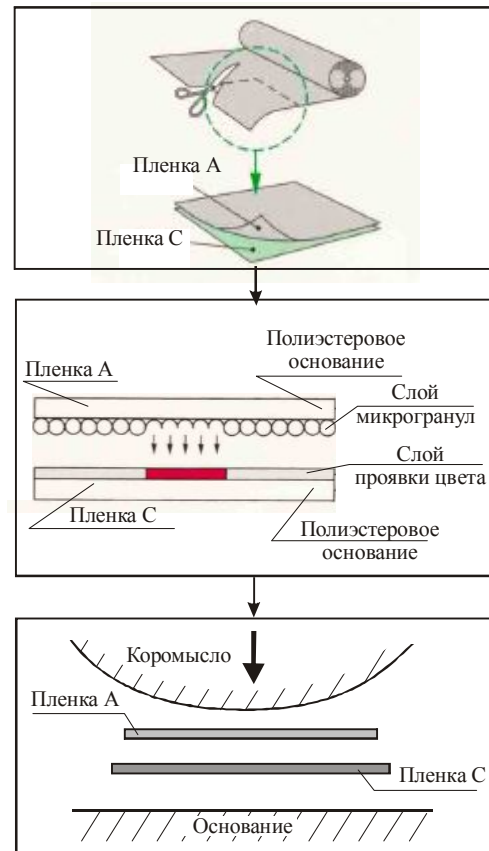


Рисунок 4 – Схема установки контактных пленок в сопряжении ЦОП с основанием

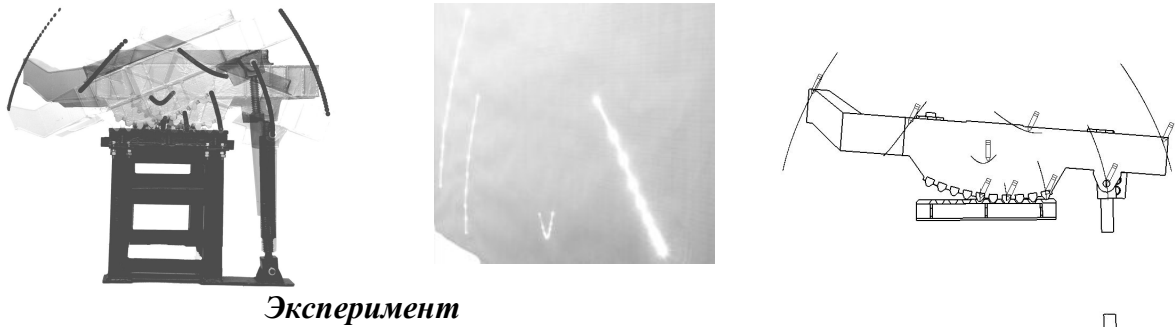


Рисунок 5 – Результаты экспериментального измерения и численного расчета положения контрольных точек макета МНПП

Расчет

На втором этапе определялись усилия в отдельных звеньях механизма. В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований. Анализ этих данных показывает, что численные и экспериментальные результаты согласуются достаточно хорошо (погрешность – в пределах 7%). Это позволяет использовать кинестатические и динамические численные модели для анализа силовых потоков в механизме наклона плавильной печи в разных положениях, а также передавать эти достоверные данные для дальнейшего исследования напряженно-деформированного состояния и контактного взаимодействия.

Таблица 1
Результаты измерений усилий на штоке и гидроцилиндре макета МНПП

№ экс.	Положение макета	т. А, Н	т. Б, Н
1	горизонт	6976.4 ± 12	1437.4 ± 12
2	- 15 град	4968.4 ± 12	0 ± 12
3	+ 20 град.	4968.4 ± 12	-47.6 ± 12

Полученные на третьем этапе экспериментальные данные о напряжениях сведены в табл. 2. Из анализа представленных данных следует, что области высоких уровней напряжений при проведении численных расчетов предсказаны точно, а величины напряжений в них согласуются с экспериментально полученными с погрешностью, не превышающей 8%. Это, в свою очередь, позволяет использовать конечно-элементные модели МНПП для проведения многовариантных исследований его НДС с гарантией высокой точности получаемых результатов.

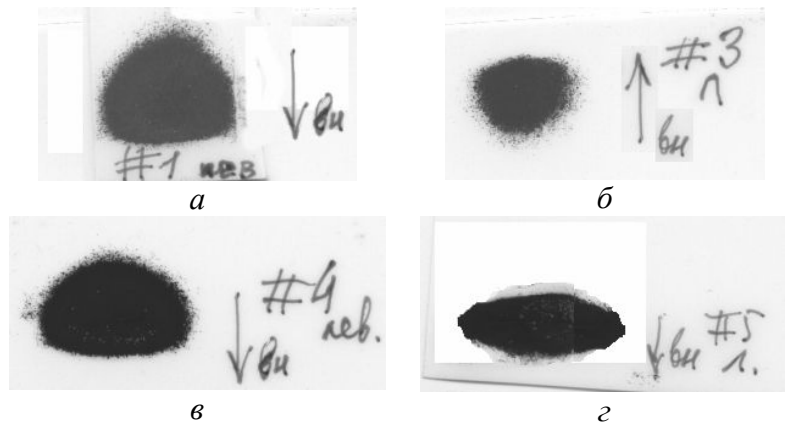
Таблица 2
Результаты тензометрических измерений

№ тензор-датчика	Положение, град.			№ тензор-датчика	Положение, град.				
	-15	0	+20		-15	0	+20		
левые	L1	2.5E-05	1.0E-05	1.9E-05	правые	R1	2.0E-05	3.6E-05	1.4E-05
	L2	1.0E-05	-2.0E-06	0.0E+00		R2	0.0E+00	-3.0E-06	5.0E-06
	L3	4.0E-06	-4.0E-05	1.4E-05		R3	3.0E-06	-1.5E-05	5.0E-06
	L4	-1.3E-05	5.0E-05	7.0E-06		R4	2.0E-06	4.0E-05	9.0E-06
	L5	5.0E-06	-5.0E-06	-1.5E-05		R5	1.5E-05	7.0E-06	-1.0E-05
	L6	2.0E-06	1.6E-05	8.5E-05		R6	-2.0E-06	2.1E-05	3.6E-05

На рис. 6 приведены примеры контактных отпечатков, полученных при различных вариантах нагружения макета МНПП (этап 4), а на рис. 7 – примеры расшиф-

ровки контактных отпечатков. Уже визуальный анализ картин на рис. 6, 7 свидетельствует о достаточно хорошем соответствии распределений, полученных экспериментально, с численно определенными ранее [1-15]. Для уточнения количественного соответствия требуется дополнительный численный анализ контактных давлений с учетом упругих свойств пленки. Неполное соответствие приведенных результатов объясняется погрешностями изготовления макета, оказывающими существенное влияние на контактные давления, и дефектами микрорельефа сопряженных поверхностей, также влияющими на величины и распределения контактных давлений.

Рисунок 6 – Контактные отпечатки, полученные в сопряжении левого коромысла макета МНПП с основанием: *а, б* – горизонтальное положение платформы, прижимающее усилие составляет 7000 Н и 1150 Н соответственно; *в* – наклон платформы вперед, усилие 4970 Н; *г* – наклон платформы назад, усилие 4970 Н



В целом же подтверждается точность численных результатов, достоверность создаваемых моделей и возможность их применения при проведении исследований

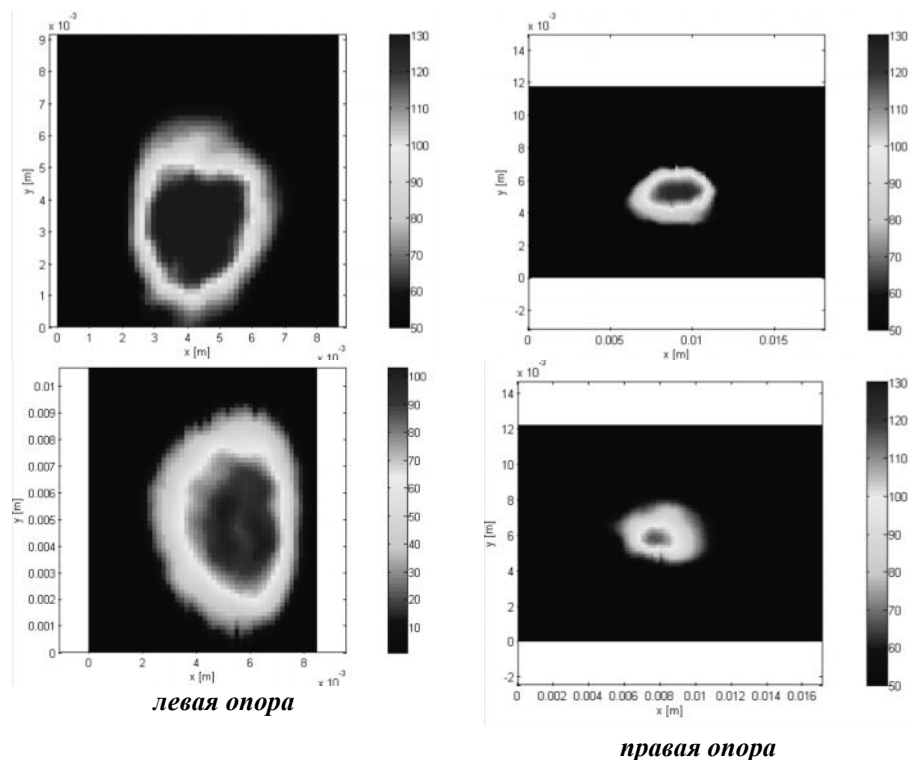


Рисунок 7 - Компьютерная расшифровка контактных отпечатков (давления в МПа) в сопряжении ЦОП макета МНПП с опорными балками

контактного взаимодействия в сопряжении ЦОП с основанием механизма наклона плавильной печи.

Проведенный широкий комплекс численных и экспериментальных исследований

макета механизма наклона плавильной печи является достаточно полным с точки зрения охвата наиболее существенных факторов и процессов, оказывающих влияние на работоспособность, нагрузочную способность, прочность, точность его работы. Обоснована адекватность предложенных в статье аналитических и численных моделей для исследования кинематики, усилий, динамики, НДС и контактного взаимодействия механизма наклона плавильной печи и оценена экспериментальным путем точность результатов. Результирующая погрешность, допускаемая при численном исследовании, не превышает 10-15 %.

Полученные результаты дают основание и возможность применять построенные модели и полученные результаты в дальнейшем при обосновании конструктивных и физических параметров при проектировании механизмов наклона технологических машин, а также являются достаточным подтверждением точности результатов численных расчетов при исследовании проектируемого, изготовленного и эксплуатируемого в ОАО «Азовмаш» механизма наклона уникальной дуговой сталеплавильной печи емкостью 60 т.

Заключение. Предложенные на основе численных исследований механизма наклона плавильной печи рекомендации были положены в основу при проектировании этого механизма. При этом во изменении базового варианта были рекомендованы и проведены следующие усовершенствования конструкции: применена трехслойная схема установки панелей усиления опорных секций; уменьшена общая масса механизма на 2,5 т, а уровень напряжений и контактных давлений снижен на 80 МПа; определены проектные толщины цилиндрической опорной поверхности и листов панелей усиления, что дает возможность обеспечить снижение массы и благоприятное перераспределение напряжений этого механизма.

В результате спроектирован механизм наклона плавильной печи со сниженной массой. Основные технические характеристики механизма наклона плавильной печи (рис. 8) приведены в табл. 3.

Основной экономический эффект от внедрения результатов исследований достигнут за счет сокращения сроков проектирования, повышения технических характеристик механизма наклона плавильной печи, уменьшения металлоемкости (на 8% по сравнению с базовым вариантом), за счет досрочного изготовления уникальной электропечи и, соответственно, выпуска дополнительной продукции.

По результатам расчетно-экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработанный специализированный программно-модельный комплекс, модели и

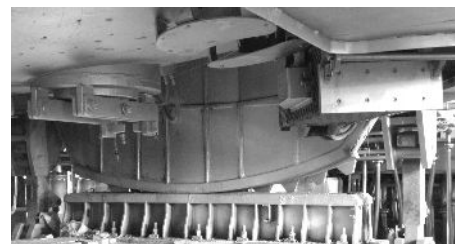


Рисунок 8 – Спроектированный механизм наклона дуговой сталеплавильной печи

Таблица 3
Технические характеристики спроектированного механизма наклона и плавильной печи

Размер плавки	60т
Время плавки	60мин.
Производительность	60т/час
Диаметр электродов	559мм
Высота подъема свода печи	500мм
Диаметр кожуха печи	5500мм
Механизм наклона печи	Гидравлич.
Угол наклона печи:	
слив металла (рабочий угол)	10°
слив шлака	15°
полностью пустая печь	20°

результаты численных исследований [1-14] обеспечивают погрешность моделирования напряженно-деформированного состояния на уровне 10-15 % для различных видов исследований.

2. Результаты численного и экспериментального исследований механизма наклона плавильной печи находятся в полном качественном соответствии как по кинематики, так и по статике, по напряженно-деформированному состоянию и контактными давлениями.

3. Разработанные рекомендации позволили спроектировать механизм наклона плавильной печи, имеющий на 10-15% более высокие характеристики по нагрузочной способности и металлоемкости по сравнению с базовым вариантом, а также изготовить его и внедрить в реальное производство со значительным экономическим эффектом.

Таким образом, в качестве основного вывода можно утверждать, что предложенные в работах [1-14] новый подход, комплекс математических моделей и разработанный специализированный программно-модельный комплекс являются эффективным, достоверным и точным инструментом обоснования рациональных проектных решений механизма наклона технологических машин со следящей нагрузкой и подвижным опиранием на основе моделирования кинематики, статики, напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия их наиболее нагруженных и ответственных элементов.

Литература: 1. К вопросу расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Мартыненко А.В. [и др.] // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. – 2007. – №23. – С. 81–92. 2. Полищук Т.В. Кинематический и силовой расчет механизма наклона плавильной печи / Т.В. Полищук, М.М. Пеклич, Н.Н. Ткачук // Механіка та машинобудування. – 2007. – №1. – С.100–106. 3. Полищук Т.В. К вопросу о кинематическом и силовом анализе механизма наклона плавильной печи / Т.В. Полищук, Н.Н. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. – 2007. – № 29. – С.122–131. 4. Барчан Е.Н. Расчетно-экспериментальное уточнение параметров численных моделей элементов „выбивная машина – технологическая нагрузка” / Е.Н. Барчан, Т.В. Полищук, А.В. Грабовский // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Транспортне машинобудування”. – 2007. – №33. – С. 32–36. 5. Ткачук Н.А. Контактное взаимодействие элементов конструкций с кинематически генерируемыми поверхностями / Н.А. Ткачук, Н.Н. Ткачук, Т.В. Полищук // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Транспортне машинобудування”. – 2007. – №33. – С. 176–183. 6. Полищук Т.В. Оптимальное проектирование механизма наклона плавильной печи: модели для анализа напряженно-деформированного состояния / Т.В. Полищук // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Динаміка та міцність машин”. – 2007. – № 38. – С. 129– 34. 7. Полищук Т.В. Модельная задача об изгибе коромысла механизма наклона плавильной печи / Т.В. Полищук // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. – 2008. – №2. – С. 125–144. 8. Чепурной А.Д. Теоретические основы проектирования механизма наклона плавильной печи / А.Д. Чепурной, Т.В. Полищук, Н.А. Ткачук // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. – 2008. – №9. – С. 139–145. 9. Полищук Т.В. Расчетно-экспериментальное исследование кинематики, нагружения и контактного взаимодействия элементов механизма наклона плавильной печи / Т.В. Полищук // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. –2008. – №14. – С. 101–116. 10. Полищук Т.В. Аналіз сил у механізмі нахилу плавильної печі / Т.В. Полищук // Машинознавство – Львів, 2008. – №1. – С. 14 –19. 11. Полищук Т.В. К обоснованию выбора параметров конечно-элементной модели макета механизма наклона плавильной печи / Т.В. Полищук // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №1. – С. 46 –49. 12. Чепурной А.Д. Развитие теории обобщенного параметрического описания сложных механических систем

на примере механизма наклона плавильной печи / А.Д.Чепурной, Т.В. Полищук, Н.А. Ткачук // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №3. – С. 44 –48. 13. Полищук Т.В. К вопросу об исследовании напряженно-деформированного состояния металлоконструкции механизма наклона плавильной печи / Т.В. Полищук // Вісник НТУ „ХП”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. – 2008. – №42. – С. 133 –140. 14. Расчеты механизмов наклона дуговых сталеплавильных печей / В.И. Головченко, В.А. Шкода, Л.Е. Полетун [и др.] // Вісник НТУ „ХП”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. – 2009. – №22. – С. 50 – 60.

Поліщук Т.В., Ткачук М.М.

КОМПЛЕКСНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
МАКЕТУ МЕХАНІЗМУ НАХИЛУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МАШИНИ

У статті описані методика і результати комплексних експериментальних досліджень макету механізму нахилу дугової сталеплавильної печі. Використано методи тензометрії, безпосередніх вимірювань, а також технологію чутливих до тиску контактних плівок. Аналіз отриманих результатів свідчить про високу точність числового моделювання кінематики, статички, а також напружено-деформованого стану механізму нахилу машин зі складним законом навантаження та опирання.

Polischuk T.V., Tkachuk N.N.

COMPLEX EXPERIMENTAL RESEARCHES OF MODEL
OF TECHNOLOGICAL MACHINES INCLINATION MECHANISM

In the paper the method and results of complex experimental researches of model of arc steel furnace inclination mechanism are described. The methods of tensometry, direct measurings and also technology of sensible to pressure contact skins are used. The analysis of got results testifies to high exactness of numerical modeling of kinematics, statics, and also stressed and deformed state of machines inclination mechanism with the difficult law of loading and leaning.
