

Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Донецкий национальный технический университет»

*На правах рукописи*



**Сотников Алексей Леонидович**

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И ПРАКТИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ТОЧНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК**

Специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» (металлургия)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Донецк – 2016

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

**Научный консультант** доктор технических наук, профессор,  
**ЕРОНЬКО Сергей Петрович**,  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк), заведующий кафедрой «Механическое оборудование заводов черной металлургии».

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор,  
**КУЗЬМИНОВ Александр Леонидович**,  
ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет» (г. Череповец), профессор кафедры «Транспортные средства и техносферная безопасность».

доктор технических наук, профессор  
**АРТЮХ Виктор Геннадиевич**,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург), профессор кафедры «Сопротивление материалов».

доктор технических наук, профессор  
**ГОРБАТЮК Сергей Михайлович**,  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва), заведующий кафедрой «Инжиниринг технологического оборудования».

**Ведущая организация:** ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (г. Алчевск)

Защита состоится 22 декабря 2016 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 01.019.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, малый актовЫй зал. Тел.: +380 (62) 304-30-55., эл. почта: vchenarada@donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, интернет – <http://donntu.org>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 01.019.03,

д.т.н., проф.



А.В. Яковченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Обязательным условием обеспечения заданной производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), а также качества получаемых заготовок является соответствие конструктивных и технологических параметров оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка МНЛЗ требованиям проектно-конструкторской документации в установленных допустимых пределах точности.

На металлургических предприятиях для предупреждения отклонений конструктивных и технологических параметров оборудования МНЛЗ от заданных значений принимается комплекс мер. В частности, осуществляется контроль, мониторинг и диагностирование как режимов работы и технического состояния оборудования, так и условий формирования непрерывнолитого слитка. Во время плановых и внеплановых остановок осуществляется замена деталей, узлов и механизмов МНЛЗ с предельным сроком службы, выполняется ремонт и восстановление оборудования, регулировка режимов его работы, выставка относительного положения оборудования машины и т.д.

Несмотря на принимаемые меры, наблюдается накопление со временем отклонений конструктивных и технологических параметров МНЛЗ, что приводит к снижению её производительности, а также к ухудшению качества получаемых заготовок. Причинами этого являются несовершенство применяемых способов и средств контроля и диагностирования, сборки, регулировки и выставки оборудования, а также соответствующих руководящих положений и норм точности. Как результат, на отечественных металлургических предприятиях наблюдается низкая эффективность использования потенциальных возможностей повышения производительности МНЛЗ за счет увеличения скорости вытягивания слитка из кристаллизатора, а также качества получаемых непрерывнолитых заготовок за счет обеспечения минимальных напряжений деформации правки непрерывнолитого слитка.

Исходя из этого, развитие теоретических основ и практическая реализация комплексной технологии обеспечения точности конструктивных и технологических параметров оборудования МНЛЗ, включая нормирование допустимых пределов точности и режимов работы, является актуальной проблемой, которая имеет важное научно-техническое и практическое значение. Решение данной проблемы позволит увеличить производительность и коэффициент использования существующих и новых МНЛЗ, повысить качество получаемых заготовок, и тем самым обеспечить значительный экономический эффект.

**Степень разработанности темы.** Вопросы рассматриваемые в рамках исследования особо остро касаются сортовых радиальных МНЛЗ, которые начали осваиваться в странах СНГ только с 80-х годов XX века, а широкое распространение получили на рубеже тысячелетий, в рамках развития концепции мини- и микро-металлургических заводов. За прошедшие 30 лет практического опыта эксплуатации таких машин остаются не до конца раскрытыми вопросы выбора допустимых пределов точности конструктивных и технологических параметров оборудования МНЛЗ, включая режимы работы.

Вопросам контроля, диагностирования, сборки, монтажа и выставки металлургического оборудования, в том числе оборудования МНЛЗ, посвящено большое количество научных и практических работ отечественных и зарубежных ученых и специалистов металлургических предприятий (среди них можно выделить В.Л. Данилова, В.М. Бровмана, А.Л. Кузьмина, В.Я. Седуша, Н.Л. Касаткина, В.Д. Плахтина и др.), что является хорошей базой для развития научных основ повышения точности конструктивных и технологических параметров МНЛЗ.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является развитие теоретических основ и практическая реализация комплексной технологии обеспечения точности конструктивных и технологических параметров оборудования МНЛЗ, включая нормирование допустимых пределов точности и режимов работы, как основания для увеличения производительности МНЛЗ, а также качества получаемых непрерывнолитых заготовок.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи исследования.

1. Выполнить причинно-количественное исследование отказов и неисправностей оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка сортовой МНЛЗ для выявления наиболее уязвимых механизмов с позиции нарушения в процессе эксплуатации их конструктивных и технологических параметров.

2. Провести исследования напряженно-деформированного состояния звеньев, а также резонансных частот (частот собственных колебаний) привода шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ для определения границ их работоспособного состояния из условия предупреждения разрушения звеньев механизма качания.

3. Установить влияние точности сборки и монтажа электромеханического привода шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ на безотказность эксцентрикового вала привода для определения соответствующих норм точности сборки и монтажа.

4. Разработать теоретические основы синтеза шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ, геометрические и кинематические параметры которого определяют точность конструктивных и технологических параметров МНЛЗ, стабильность и безопасность процессов разлива стали, а также условия формирования непрерывнолитого слитка.

5. Разработать теоретические основы расчета упругих элементов, используемых в качестве направляющих и шарниров в рессорных механизмах качания кристаллизатора МНЛЗ, провести физическое моделирование схем их нагружения для верификации математических моделей.

6. Определить уровень отклонения положения оборудования МНЛЗ в процессе эксплуатации и выполнить исследование точности выставки оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка сортовой МНЛЗ относительно технологической оси машины с помощью традиционного способа для разработки технологии высокоточной выставки оборудования, отвечающей требованиям проектно-конструкторской документации.

7. Разработать теоретические основы и реализовать технологии, способы и аппаратно-программные средства: а) контроля положения и выставки оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка сортовой МНЛЗ относительно технологической оси ручья машины; б) контроля параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ; в) диагностирования состояния электромеханического привода шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является оборудование участка формирования непрерывнолитого слитка сортовой МНЛЗ, а предметом – конструктивные и технологические параметры оборудования и их допустимые пределы точности, а также напряженно-деформированное состояние и амплитудно-частотные характеристики механизма качания кристаллизатора и его электромеханического привода.

**Научная новизна полученных результатов.**

1. Объяснена низкая производительность отечественных сортовых МНЛЗ и определены потенциальные возможности её повышения на основе представительных данных об эксплуатации машин. Установлено, что скорость вытягивания слитка из кристаллизатора, обуславливающая производительность МНЛЗ, изменяется в диапазоне 0,4...0,6 от рационально возможного значения. Низкая эффективность использования потенциальных возможностей повышения производительности отечественных МНЛЗ обусловлена фактическим техническим состоянием и соответствующим ему режимами работы оборудования машины.

2. Предложены методические основы увеличения производительности существующих и новых сортовых МНЛЗ, а также улучшения качества получаемых непрерывнолитых заготовок за счет повышения точности конструктивных и технологических параметров МНЛЗ из условия обеспечения долговечности механического оборудования машины, максимальной расчетной скорости вытягивания слитка из кристаллизатора и минимальных напряжений деформации правки непрерывнолитого слитка.

3. Получили развитие представления о влиянии инерционно-массовых характеристик механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ на схему его рабочих нагрузок и нагруженность звеньев при различных режимах работы. Применительно к шарнирно-рычажному механизму качания сортовой МНЛЗ установлено, что максимальные напряжения в звеньях механизма качания возрастают в 1,5...3 раза при увеличении частоты качания кристаллизатора с 200 до 400 кач./мин, но остаются ниже допустимых напряжений по условию прочности (коэффициент запаса прочности составляет от 3,4 до 23,3 для различных звеньев).

4. Получили развитие научные основы выбора рациональных режимов работы шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовых МНЛЗ за счет обеспечения долговечности механизма качания. Расчет режимов работы механизма качания осуществляется из условия разрушения его звеньев, в том числе по причине резонансных явлений в электромеханическом приводе механизма качания. Для шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ установлена рациональная частота качания кристаллиза-

тора – 200 кач./мин (проектное значение – 310 кач./мин) при частоте вращения вала двигателя 800 об/мин, что обеспечивает практически неограниченную долговечность звеньев механизма качания и отсутствие резонансных явлений в его приводе. В этом случае максимально возможное значение скорости вытягивания слитка из кристаллизатора составит 4,75 м/мин (проектное значение – 5 м/мин).

5. Установлено влияние отклонений положения опоры электромеханического привода механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ на амплитуду напряжений в сечении консольной части эксцентрикового вала привода. При отклонении положения опоры привода относительно продольной и поперечной плоскостей МНЛЗ выше 0,15...0,2 мм происходит рост амплитуды напряжений в сечении консольной части эксцентрикового вала привода до 62...81 МПа (что в несколько раз больше напряжений от рабочей нагрузки (4...12 МПа) и соизмеримо с пределом выносливости стали вала (62,5...63,5 МПа)) с последующим его усталостным разрушением. На базе полученной зависимости определено допустимое отклонение положения опоры привода, равное 0,05...0,1 мм, при котором амплитуда напряжений составляет 20...40 МПа, и соответственно усталостные разрушения эксцентрикового вала не возникают.

6. Создана методология обеспечения точности конструктивных и технологических параметров МНЛЗ за счет выставки и настройки положения оборудования машины с минимальными корректирующими воздействиями из условия формирования фактической технологической оси с отклонениями от требований проектно-конструкторской документации в диапазоне 0,2...0,5 мм, что гарантирует минимальные напряжения деформации правки непрерывнолитого слитка.

7. Установлено влияние усталостного разрушения консольной части эксцентрикового вала на амплитудно-частотные характеристики электромеханического привода механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ. При частоте вращения вала двигателя 400 об/мин и коэффициенте жесткости вала менее  $(4,0...4,1) \cdot 10^7$  Н/м происходит рост суммарного уровня вибрации привода с 0,25 до 1,5 мм/с (при уменьшении коэффициента жесткости до нуля в момент разрушения вала) и снижение резонансной частоты привода с 65 до 20 Гц. На базе полученных зависимостей определены границы технического состояния (целостности) эксцентрикового вала по общему уровню вибрации (виброскорости) привода механизма качания (при частоте вращения вала двигателя 400 об/мин): исправное – меньше 1,2 мм/с; неисправное – 1,2...1,8 мм/с; предельное – 1,8...2,7 мм/с. При виброскорости более 2,7 мм/с возникает отказ.

### **Теоретическая значимость работы.**

1. Разработана динамическая модель шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ, позволяющая определять влияние инерционно-массовых характеристик звеньев механизма качания на схему его рабочих нагрузок и нагруженность звеньев при различных режимах работы.

2. Усовершенствована постановка краевой задачи напряженно-деформированного состояния (за счет учета схем рабочих нагрузок для различных режимов работы) шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сор-

товой МНЛЗ, позволяющая определять напряжения в звеньях механизма качания и рассчитывать их долговечность при различных режимах работы.

3. Разработана динамическая модель электромеханического привода механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ, позволяющая определять амплитудно-частотные характеристики привода, выполнять нормирование режимов его работы и границ различения технического состояния звеньев.

4. Разработана математическая модель шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ, позволяющая определять рациональные длины звеньев механизма на этапе его проектирования.

5. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния упругих элементов (направляющих и шарниров) рессорного механизма качания кристаллизатора новых сортовых, слябовых и блюмово-сортовых МНЛЗ, которая учитывает нелинейную зависимость деформаций от действующих нагрузок, что позволяет выполнять их проектировочные и проверочные расчеты.

6. Разработана математическая модель технологической оси ручья сортовой МНЛЗ образуемой оборудованием участка формирования непрерывнолитого слитка при его расположении с отклонениями, позволяющая определять фактические форму и положение оси ручья в единой системе координат МНЛЗ.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Получила дальнейшее развитие технология выставки оборудования МНЛЗ. Выставка оборудования МНЛЗ реализуется на базе геодезических измерений координат оборудования МНЛЗ и вычислении минимальных корректирующих воздействий из условия обеспечения минимальных отклонений оборудования от технологической оси ручья, заданной проектно-конструкторской документацией.

2. Разработан способ синтеза шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ. Определение рациональных длин звеньев механизма качания реализуется на базе математической модели шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ из условия обеспечения минимального отклонения кристаллизатора от технологической оси ручья.

3. Разработана методика проектировочного и проверочного расчета статически неопределимых упругих элементов (направляющих и шарниров) рессорного механизма качания кристаллизатора новых сортовых, слябовых и блюмово-сортовых МНЛЗ. Определение напряжений и деформаций упругих элементов в зависимости от их формы и размеров, схем нагружения и режимов работы реализуется на базе математической модели продольно-поперечного изгиба стержня.

4. Разработаны способы контроля и диагностирования электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ. Оценка технического состояния привода реализуется на базе спектрального анализа виброскорости и сопоставления результатов измерения параметров общего уровня вибрации с установленными границами технического состояния звеньев привода.

Результаты диссертационной работы внедрены на ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» (г. Мариуполь) и ПАО «Металлургический комбинат «Азовсталь» (г. Мариуполь), ЗАО «Миниметаллургический завод «Истил (Украина)» (ныне ПАО «Донецкий электрометаллургический завод») (г. Донецк), ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», ПАО «Енакиевский металлургический завод», а также ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ» и ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет».

#### **Методология и методы исследования.**

Для решения поставленных задач исследования с получением обладающих новизной результатов использован следующий комплекс базовых методов теоретического и экспериментального исследования:

- методы конечных элементов и теория прочности для оценки напряженно-деформированного состояния и расчета долговечности звеньев шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ;
- теория механизмов и машин для исследования и синтеза шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ;
- методы динамики машин для исследования амплитудно-частотных характеристик электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ;
- методы сопротивления материалов и теории упругости для расчета напряженно-деформированного состояния упругих элементов (направляющих и шарниров) рессорных механизмов качания кристаллизатора МНЛЗ;
- методы пассивного наблюдения за техническим состоянием оборудования действующих МНЛЗ и накопление количественных данных об их отказах;
- методы физического моделирования нагружения рессор механизма качания кристаллизатора МНЛЗ;
- методы геодезических измерений геометрических размеров и форм для контроля плано-высотного положения оборудования МНЛЗ;
- методы тензометрии для исследования напряженно-деформированного состояния рессор механизма качания кристаллизатора;
- методы виброметрии для обследования вибрационного состояния и диагностирования, а также контроля параметров колебательного движения механизма качания кристаллизатора МНЛЗ.

**Положения, выносимые на защиту.** Следующие основные научные разработки и положения выносятся на защиту:

- 1) методология формирования фактической технологической оси ручья радиальной сортовой МНЛЗ с минимальными отклонениями положения оборудования машины от требований проектно-конструкторской документации в диапазоне 0,2...0,5 мм на основе математической модели технологической оси ручья в единой системе координат радиальной МНЛЗ;
- 2) методология расчета рациональных режимов работы шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ с электромеханическим приводом из условия разрушения звеньев на основе совершенствования постановки краевой задачи напряженно-деформированного состояния звеньев механизма качания (за счет учета схем рабочих нагрузок для различных

режимов работы) и динамической модели амплитудно-частотных характеристик привода;

3) зависимость амплитуды напряжений возникающих в сечении консольной части эксцентрикового вала электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ от отклонения положения его опоры, а также границы различения технического состояния (целостности) эксцентрикового вала по общему уровню вибрации (виброскорости) привода;

4) методология расчета напряжено-деформированного состояния упругих элементах рессорного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ в зависимости от их формы и размеров, схем нагружения и режимов работы с наперед заданной точностью на основе математической модели продольно-поперечного изгиба стержня;

5) основы проектирования шарнирно-рычажных механизмов качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ и элементы расчетно-аналитической программы определения рациональных длин звеньев механизма качания;

6) методы определения основных конструкционных и технологических параметров основного оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка МНЛЗ.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и новизна научных и технических решений, обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждаются корректным использованием апробированных методов исследования и научных теорий, адекватностью разработанных конечно-элементных, динамических и математических моделей, результатами экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, эффективностью результатов промышленных испытаний на металлургических предприятиях.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (2011...2016 г.г.) и конференциях: 7-я регион. науч.-метод. конф. «Машинознавство і деталі машин», Донецк (Украина), 29 марта 2005 г.; V Всеукраинский Форум Главных Механиков «Стратегия оптимизации ТОиР механического оборудования в ГМК: идеологии, практика повышения эффективности, инструменты», Киев (Украина), 21-24 ноября 2012 г.; 2-я науч.-практ. конф. «Сокращение расходов на эксплуатацию и ремонт технологического оборудования металлургических производств», Ялта, АР Крым, 30 сентября-4 октября 2013 г.; Межд. науч.-техн. конф. «Вибрация машин: измерение, снижение, защита», Донецк (Украина), 13-14 мая 2003 г.; Межд. науч.-техн. конф. «Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век», Донецк (Украина), 21-23 сентября 2004 г.; Межд. науч.-практ. конф. «Практика внедрения передовых технологий эксплуатации и ремонта роторного оборудования металлургических производств», Ялта, АР Крым, 26-20 сентября 2011 г.; Межд. науч.-практ. конф. «Теория и практика технического диагностирования оборудования предприятий металлургических и энергетических комплексов», Гурзуф (Украина), 11-14

сентября 2012 г.; XIII Int. scien. conf. «New technologies and achievements in metallurgy and material engineering», Czestochowa (Poland), 30.05-01.06 2012; Межд. науч.-практ. конф. «Современные тенденции ТООР. Диагностика оборудования горно-металлургического и энергетического комплексов», Мариуполь (Украина), 9-10 сентября 2013 г.; Межд. науч.-тех. конф. «Надежность металлургического оборудования», Днепропетровск (Украина), 28-31 октября 2013 г.; 2-я межд. науч.-практ. конф. «Инновационные перспективы Донбасса», Донецк (Донецкая Народная Республика), 25-26 мая 2016 г.; 5-я Межд. науч.-практ. конф. «Современное машиностроение: Наука и образование MMESE2016», Санкт-Петербург (Российская Федерация), 30 июня-01 июля 2016 г.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первом разделе «Состояние научно-технической проблемы формирования конструктивных и технологических параметров МНЛЗ»** показано, что с целью увеличения производительности и коэффициента использования МНЛЗ наряду со снижением энергетических и эксплуатационных затрат, а также повышением качества получаемых заготовок модернизируется основное оборудование машины, оптимизируются режимы его функционирования, конструктивные и технологические параметры.

Основные конструктивные и технологические параметры радиальной сортовой МНЛЗ определяются в процессе проектирования при профилировании технологического канала машины, которое заключается в выборе формы и параметров технологической оси из условия осуществления литья заготовок с расчетной максимальной скоростью и движения непрерывнолитого слитка с минимальными напряжениями деформации правки для вывода его на горизонт.

Методы, инструменты и требования по точности контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ относительно технологической оси ручья регламентированы руководящими положениями по монтажу оборудования, датируемые 80-ми годами XX века. Для современных сортов МНЛЗ альтернативой положениям выступает проектно-конструкторская документация заводоизготовителей, которой установлено допустимое отклонение положения оборудования относительно технологической оси на уровне 0,2...0,5 мм.

Исследования влияния отклонений оборудования слябовых и блюмовых МНЛЗ относительно технологической оси ручья на процессы непрерывной разливки стали проводились многими специалистами. В их числе следует выделить работы В.Л. Данилова, В.М. Бровмана, А.Л. Кузьмина и др. В связи с тем, что внимание сортам МНЛЗ практически не уделялось, актуальной задачей становится развитие научных основ, принципов, методов, техники и технологии формирования их конструктивных и технологических параметров.

Контроль и диагностирование позволяет заблаговременно предупредить отклонение и нарушение параметров, а также безотказности оборудования МНЛЗ в процессе эксплуатации. На основе современной вычислительной и измерительной техники разработан широкий комплекс методов и средств кон-

троля и диагностирования, но отсутствие теоретической и методологической основы не позволяет использовать полностью их преимущества и возможности.

Для механизмов качания кристаллизаторов современных сортовых МНЛЗ, относящихся к динамическому оборудованию машины, выделены проблемы эксплуатации и задачи развития их конструкции.

Одним из направлений совершенствования механизмов качания является использование в их конструкциях упругих элементов, применение которых объясняется способностью воспринимать значительные динамические нагрузки и возможностью выполнять роль направляющих устройств для передачи движения от привода механизма качания к кристаллизатору. Однако широкому их внедрению препятствует отсутствие методов проекторочного и проверочного расчета напряженно-деформированного состояния.

**Во втором разделе «Исследование причин и факторов нарушения конструктивных и технологических параметров МНЛЗ»** исследованы причинно-количественные связи отказов и неисправностей оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка сортовой МНЛЗ конструкции «Danieli & C. Officine Meccaniche S.p.A.» и ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» с выявленными изменениями в процессе эксплуатации их технического состояния и эксплуатационных параметров.

Исследование типовых отказов и неисправностей механического оборудования МНЛЗ показало, что причинами их возникновения являются условия эксплуатации и режимы работы, а также нарушение технологий его технического обслуживания и ремонта, главным образом сборки и монтажа (выставки). Частые выходы из строя оборудования приводят к увеличению времени простоя МНЛЗ, то есть к снижению ее коэффициента использования.

В процессе эксплуатации шарнирно-рычажного механизма качания происходят повреждения подшипников его шарниров и опор, а также усталостное разрушение эксцентрикового вала электромеханического привода, которые приводят к постепенному нарушению параметров колебательного движения кристаллизатора и к аварийным отказам, соответственно. Данные обстоятельства являются ограничивающим условием повышения частоты колебательного движения кристаллизатора, и скорости вытягивания из него слитка.

Сопоставление результатов количественного анализа отказов и неисправностей роликовой проводки зоны вторичного охлаждения и тянуще-правильного устройства с результатами последующего исследования фактического плано-высотного положения роликовой проводки позволило установить наличие корреляции между уровнем отклонений положения роликов относительно технологической оси ручья и количеством отказов, приходящихся на соответствующий ролик. Большое количество отказов и неисправностей приходится на ролики, имеющие значительные отклонения положения относительно технологической оси ручья МНЛЗ, что и может обуславливать их возникновение наряду с другими вышеперечисленными причинами.

Измерение и анализ фактического плано-высотного положения оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка радиальной сортовой

МНЛЗ выполнены для определения причин отклонения положения оборудования относительно технологической оси ручья в процессе эксплуатации.

Установлено влияние на форму и параметры технологической оси ручья как технического состояния, так и точности выставки оборудования. Отклонения положение оборудования на несколько порядков отличаются от заданного проектно-конструкторской документацией и достигают значений в среднем 10,88 мм. Максимальное отклонение оси ручья в поперечном направлении, отличающееся на порядок от смещения остального оборудования МНЛЗ, отмечено на кристаллизаторах (рисунок 1). В радиальном направлении от технологической оси ручья кристаллизаторы смещены в среднем на 13,51 мм.

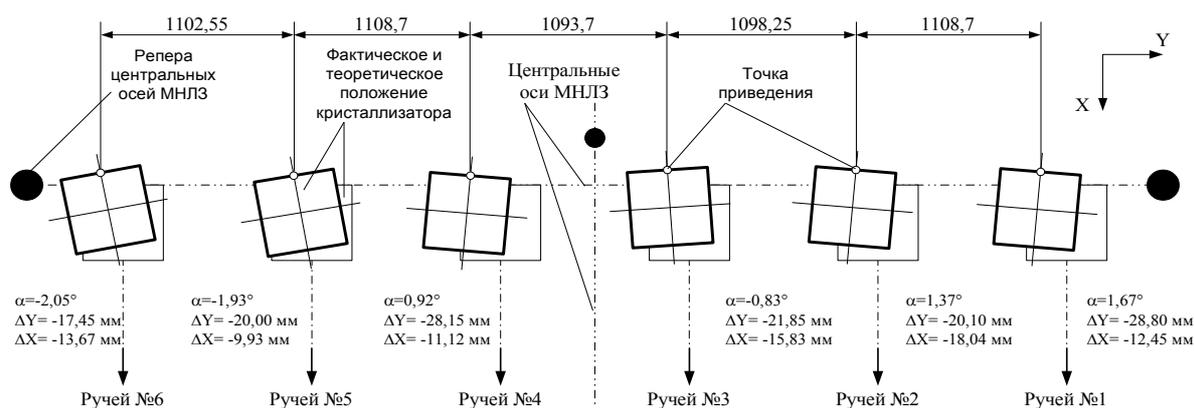


Рисунок 1. Фактическое положение гильз 6-ти кристаллизаторов относительно технологических и центральных осей МНЛЗ в плане:

$\Delta Y$  и  $\Delta X$  – линейные отклонения точки приведения кристаллизатора вдоль осей  $Y$  и  $X$ , соответственно;  $\alpha$  – угол поворота кристаллизатора относительно оси перпендикулярной плоскости рисунка

Максимальное отклонение в радиальном направлении роликовой проводки зоны вторичного охлаждения от технологической оси ручья МНЛЗ отмечается на секции №1 (в среднем 32,71 мм), а минимальное – на 3-й (в среднем 5,53 мм). Отклонение роликовой клетки тянуще-правильного устройства составляет в среднем 0,53...0,6 мм. Данные отклонения приводят к изменению шага расположения роликов вдоль технологической оси ручья МНЛЗ.

По абсолютным координатам положения роликов можно определить фактические форму и параметры технологической оси ручья машины, что позволяет дать ее оценку с точки зрения осуществления прогрессирующей правки слитка. Для определения радиуса дуги окружности и положения центра ее кривизны, образующейся в результате расположения роликов с отклонениями, была составлена система уравнений, описывающая технологическую ось ручья (рисунок 2):

$$\begin{cases} S_1^2 = (R + r_2)^2 + (R + r_1)^2 - 2(R + r_2)(R + r_1) \cos \alpha_1, \\ S_2^2 = (R + r_3)^2 + (R + r_2)^2 - 2(R + r_3)(R + r_2) \cos \alpha_2, \\ S_3^2 = (R + r_3)^2 + (R + r_1)^2 - 2(R + r_3)(R + r_1) \cos \varphi, \\ \varphi = \alpha_1 + \alpha_2. \end{cases}$$

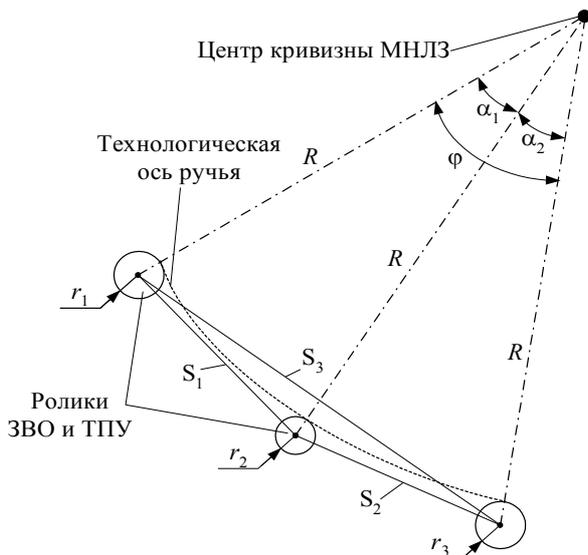


Рисунок 2. Расчетная схема к определению фактического радиуса дуги окружности технологической оси

В результате вычислений установлено, что технологическая ось каждого ручья представляет собой кривую с несколькими радиусами разгиба непрерывного слитка, отличающихся от заданного радиуса (8000 мм) на 0,2...4,1 %. Также выявлено наличие перегиба движущегося слитка на ролике секции №3 зоны вторичного охлаждения, что обуславливает действие дополнительных нагрузок как на слиток, так и на ролик. Это обстоятельство приводит к снижению качества заготовок, а также к ограничению максимальной скорости вытягивания слитка из кристаллизатора.

Приведенные значения отклонений положения оборудования МНЛЗ относительно технологической оси ручья ха-

рактерны для традиционной технологии выставки оборудования, заключающейся в выставке одного механизма относительно другого, рядом расположенного, с помощью уровней, отвесов и шаблонов без учета его технического состояния. В связи с чем, актуальной является задача разработки альтернативной технологии высокоточного контроля положения и выставки оборудования.

В третьем разделе «Развитие научных основ формирования технологических параметров МНЛЗ» определены рациональные режимы работы шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ конструкции ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» из условия предупреждения разрушения его звеньев.

Оценка статической и динамической прочности звеньев механизма качания в широком диапазоне режимов работы позволяет установить максимально возможную частоту колебательного движения кристаллизатора, пропорциональную максимальной скорости вытягивания слитка из кристаллизатора.

Для выявления концентраторов напряжений и оценки прочности звеньев механизма качания в диапазоне частоты колебательного движения кристаллизатора от 200 до 400 кач./мин выполнено динамическое моделирование его механической системы, результаты которого легли в основу совершенствования постановки краевой задачи напряженно-деформированного состояния.

Разработка конечно-элементных моделей звеньев выполнялась с использованием стержневых и объемных конечных элементов. Исследование напряженно-деформированного состояния осуществлялось с помощью программного комплекса DSMFEM. Вычисление максимальных напряжений в расчетных зонах и эквивалентных напряжений, осредненных по всем конечным элементам, связанным с узлом модели, проводилось на одном цикле качания в различных положениях звеньев для номинальной и увеличенной частоты качания кристаллизатора.

В результате вычислений выявлено, что во всех звеньях механизма напряжения возрастают в 1,5...3 раза при увеличении частоты качания с 200 до 400 кач./мин, но при этом на всех частотах они остаются значительно ниже допускаемых (коэффициент запаса прочности составляет от 3,4 до 23,3 для различных звеньев). Исходя из этого, масса звеньев механизма качания может быть снижена за счет уменьшения толщины листов металлоконструкций звеньев, что позволит уменьшить инерционные и динамические нагрузки.

Расчет на долговечность выполнялся для конкретной зоны каждого звена механизма качания, потенциально наиболее опасной с точки зрения возникновения усталостного разрушения. Установлено, что при частоте качания 200 кач./мин для всех звеньев обеспечивается практически неограниченная долговечность. При повышении частоты до 400 кач./мин недостаточная долговечность ожидается в основании и столе качания, где наблюдаются явные зоны концентрации напряжений.

Кроме этого определено, что разрушение эксцентрикового вала привода происходит в результате накопления усталостных повреждений при воздействии циклических изгибных напряжений при его вращении с умеренными напряжениями. При этом передаваемые через вал рабочие нагрузки (4...12 МПа) не могут привести к его усталостному разрушению, в том числе при увеличении частоты качания кристаллизатора с 200 до 400 кач./мин.

К разрушению звеньев электромеханического привода шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора могут приводить резонансные явления обусловленные особенностью его конструкции, заключающейся в размещении электродвигателя и редуктора на качающейся платформе. В связи с этим проведено исследование динамических характеристик (частот и амплитуд колебаний), а также нормирование режимов работы привода на основе его динамического моделирования.

Разработанная динамическая модель (рисунок 4а) с сосредоточенными параметрами характеризуется 4 степенями свободы и позволяет описать колебания центра масс узлов привода: редуктора ( $m_1, k_1, c_1$ ), электродвигателя ( $m_2, k_2, c_2$ ), качающейся платформы ( $m_3, k_3, c_3$ ), упругой муфты ( $m_m, k_m, c_m$ ), а также угловые колебания всего привода вокруг его центра тяжести (ЦТ):

$$\left. \begin{aligned} [(k_1 + k_{10} - m_1\omega^2) + i\omega(c_1 + c_{10})]X_1 - (k_m + i\omega c_m)X_2 - (k_1 + i\omega c_1)X_3 - m_1L_1\omega^2\varphi &= F_1(t) + F_3(t) \\ - (k_m + i\omega c_m)X_1 + [(k_2 - m_2\omega^2) + i\omega c_2]X_2 - (k_2 + i\omega c_2)X_3 + m_2L_2\omega^2\varphi &= F_2(t) - F_3(t) \\ - (k_1 + i\omega c_1)X_1 - (k_2 + i\omega c_2)X_2 + [(k_1 + k_2 + k_3 - m_3\omega^2) + i\omega(c_1 + c_2 + c_3)]X_3 + m_3L_3\omega^2\varphi &= 0 \\ m_1L_1\omega^2X_1 - m_2L_2\omega^2X_2 - m_3L_3\omega^2X_3 + [(k_y - I_z\omega^2) + i\omega c_y]\varphi &= -\omega^2X_{ocb}(X_1m_1 + X_2m_2 + X_3m_3) \end{aligned} \right\}$$

где  $F_i(t)$  – суммарные усилия, генерируемые дисбалансом, соответственно, вала редуктора ( $i=1$ ) и вала двигателя ( $i=2$ ), подшипниками редуктора и двигателя, а также пальцами моторной муфты;  $F_3(t)$  – силовая связь между редуктором и двигателем;  $\varphi$  – амплитуда угловых колебаний привода, рад.;  $X_i$  – амплитуда колебаний редуктора ( $i=1$ ), двигателя ( $i=2$ ) и платформы ( $i=3$ ), м;  $k_{10}$  – жесткость эксцентрикового вала, Н/м.

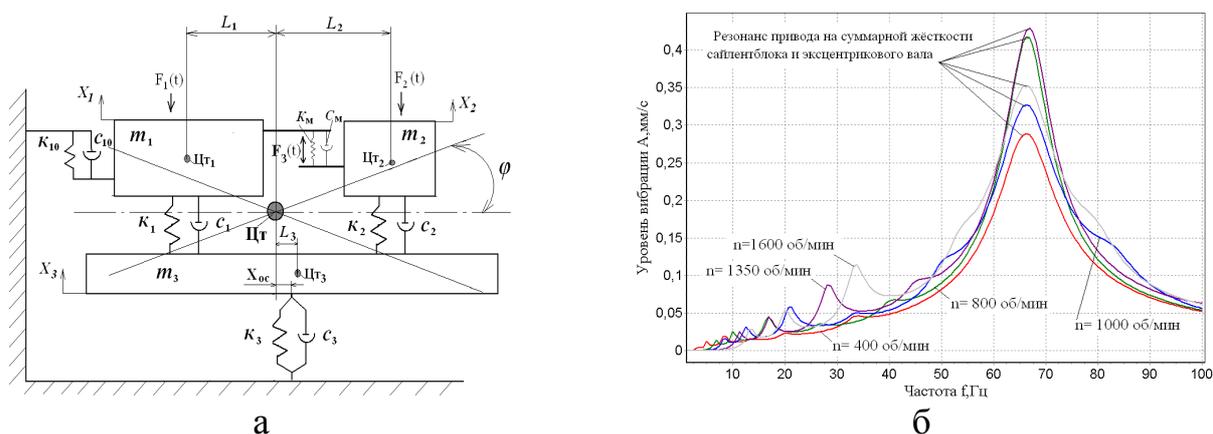


Рисунок 4. Динамическая модель привода механизма качания (а) и спектр его колебаний при увеличении частоты вращения вала двигателя (б)

Характерной особенностью полученных графиков амплитудно-частотной характеристики привода (рисунок 4б) является наличие пика, указывающего максимальное значение амплитуды его колебаний. Частота, на которой это происходит, является резонансной частотой – 3900 об/мин (65 Гц).

Результаты исследования позволили выполнить нормирование режимов работы и общего уровня вибрации электромеханического привода механизма качания в зависимости от частоты вращения вала двигателя ( $n$ ): дорезонансный –  $\leq 1,8 \dots 2,8$  мм/с ( $n \leq 1200 \dots 2700$  об/мин); резонансный –  $> (2,8 \dots 3,8)$  мм/с ( $n = 2700 \dots 3900$  об/мин); зарезонансный –  $< 2,8$  мм/с ( $n > 3900$  об/мин). Достоверность результатов подтвердили экспериментальные исследования уровня вибрации привода механизма качания с помощью анализатора вибрации СД-21.

Таким образом, рациональная частота качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ конструкции ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» составляет 200 кач./мин (проектное значение – 310 кач./мин). При этом его электромеханический привод способен обеспечивать частоту качания 400 кач./мин до возникновения резонансных явлений. В связи с этим, даны рекомендации по изменению конструкции основания и стола качания механизма для снижения концентрации напряжений в указанных зонах и обеспечения возможности увеличения частоты качания кристаллизатора и соответственно скорости вытягивания слитка из кристаллизатора.

**В четвертом разделе «Развитие научных основ формирования конструктивных параметров МНЛЗ»** разработаны принципы и метод синтеза шарнирно-рычажных механизмов качания кристаллизаторов сортовых МНЛЗ, методология расчета напряженно-деформированного состояния упругих элементов рессорных механизмов качания, а также принципы обеспечения точности формы и параметров технологической оси ручья сортовой МНЛЗ.

В механизмах качания радиальных сортовых МНЛЗ конструкции «Danieli & C. Officine Meccaniche S.p.A.» и ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» для реализации требуемых параметров колебательного движения кристаллизатора используется шарнирно-рычажная система, представляющая собой комбинацию четырехзвенных механизмов. Точность колебательного движения кристаллизатора относительно технологической оси ручья обеспечи-

вается точностью геометрических размеров звеньев и зазорами в кинематических парах механизмов, а также их расположением относительно центра кривизны МНЛЗ. Целевыми функциями кинематического синтеза являются минимальные отклонения траектории кристаллизатора относительно технологической оси ручья.

Для разработанной параметризированной кинематической схемы шарнирно-рычажного механизма качания выполнен геометрический анализ с выводом соответствующих систем уравнений, на основании которых составлена расчетная программа MathCAD для выполнения синтеза механизма качания.

В ходе математического моделирования установлено, что лежащее в основе синтеза механизма качания условие наличия в его конструкции выходного кривошипного рычажного механизма, длины коромысел которого равны между собой и в горизонтальном положении стола качания являются лучами, исходящими из центра кривизны МНЛЗ, никак прямо не связано с основной целью синтеза – получения заданной дугообразной траектории кристаллизатора. Это ограничение приводит к тому, что отклонение кристаллизатора относительно технологической оси ручья меньше 1 % в крайних его положениях обеспечить невозможно. В связи с этим, были разработаны рекомендации по повышению точности конструктивных параметров механизма качания за счет использования выходного некривошипного рычажного механизма, длины коромысел которого будут различными. Аналитико-оптимизационный синтез такого механизма качания позволяет максимально точно приблизить дугообразную траекторию кристаллизатора к форме технологической оси ручья.

Нетрадиционной также является постановка задачи синтеза современных механизмов качания с упругими элементами, так как их напряженно-деформированное состояние описывается нелинейной зависимостью деформации и действующих нагрузок.

Действие со стороны подвижной части механизма качания на рессору приводится к главному вектору системы сил  $P$  и главному моменту  $M$  (рисунок 6). Исследование напряженно-деформированного состояния основано на принципе суперпозиций, то есть независимо выполняется исследование действия силы  $P$  и момента  $M$ .

Для расчета напряженно-деформированного состояния упругих элементов механизма качания в виде листовой и стержневой рессоры использована математическая модель продольно-поперечного изгиба стержня, которая в отличие от классической модели, имеет нелинейную зависимость деформаций от действующих нагрузок. Данная нелинейность обусловлена возникновением дополнительных продольных усилий за счет удлинения стержня от его поперечной деформации.

Определение продольного усилия при действии поперечной силы  $P$  реализуется на основе метода последовательных приближений, который основывается на том, что наличие продольной нагрузки при любом ее значении приводит к уменьшению деформации (момент силы  $N$  всегда направлен в противоположную сторону от момента силы  $P$ ). Таким образом, задаваясь произвольным значением, в первом приближении  $N_{10}$ , из известного дифференциального урав-

нения продольно-поперечного изгиба балки определяется деформация, а из уравнения продольной деформации, то есть удлинения рессоры, – значение  $N_{11}$ , соответствующее данной деформации. Найденные значения сравниваются, при относительной разнице больше заданного значения процедура повторяется, принимая в новом приближении  $N_{20}=0,5(N_{10}+N_{11})$ . Значение  $N$ , с точностью до 1 %, находится за 3...5 циклов в соответствии со следующей зависимостью

$$\tilde{N}_{i1} = \frac{\tilde{P}^2}{8\tilde{N}_{i0}^2} \int_0^1 \left( \frac{\cosh \tilde{N}_{i0}^2 \psi - 1}{\sinh \tilde{N}_{i0}^2 \psi} \sinh \tilde{N}_{i0}^2 \psi \xi + \left( 1 - \cosh \tilde{N}_{i0}^2 \psi \xi \right) \right)^2 d\xi.$$

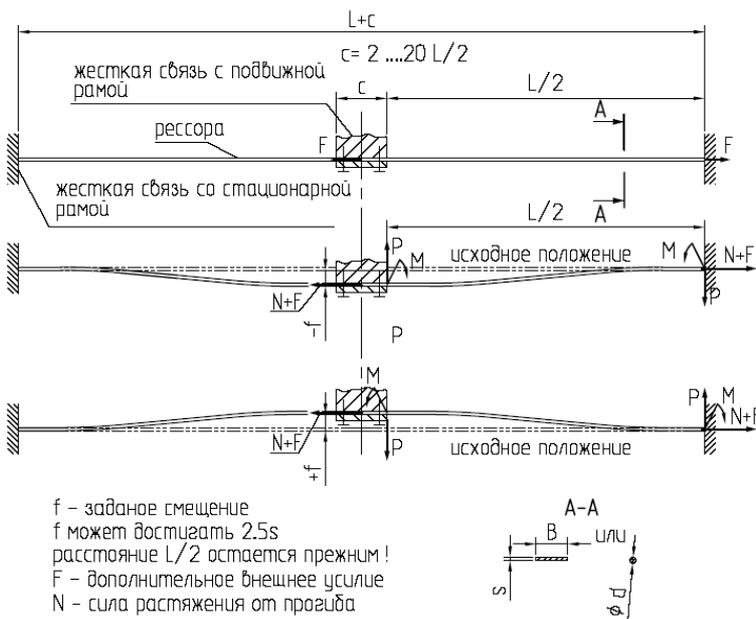


Рисунок 6. Расчетная схема рессоры механизма качания

Для определения искомых параметров модели, в общем виде, введен ряд обозначений безразмерных величин:  $\xi = x/l$  – координата;  $\tilde{N} = N/EA$  – продольное усилие;  $\tilde{P} = P/EA$  – нагрузка;  $\psi = l/i_z$  – гибкость, где  $i_z = \sqrt{J/F}$  – осевой радиус инерции сечения;  $x$  – продольная координата;  $l$  – длина участка рессоры;  $E$  – модуль упругости;  $A$  – площадь поперечного сечения;  $J$  – осевой момент инерции поперечного сечения;  $\tilde{y}_{\max} = f/l$  – относительный прогиб.

Остальные параметры (прогибы, углы поворотов, усилия и напряжения) рассматриваемой модели продольно-поперечного изгиба стержня рассчитываются с использованием известных зависимостей сопротивления материалов.

Аналогичный подход используется для расчета рессоры на воздействие момента  $M$  и комбинацию нагрузок.

Используя различные вариации безразмерных параметров, можно на основании численных вычислений выполнять проектировочные и проверочные расчеты, например, для заданных параметров нагрузки и прогиба подобрать размеры сечения рессоры с наперед заданной точностью.

Для верификации результатов расчета упругих элементов в виде листовой и стержневой рессоры с помощью разработанной математической модели напряженно-деформированного состояния проведены экспериментальные исследования на специально сконструированном лабораторном стенде. Для измерений напряжений в рессорах была разработана система тензометрических измерений. Результаты исследований показали высокую сходимость и подтвер-

дили правильность принятых теоретических положений при расчете упругих элементов механизма качания.

Известно, что напряжения деформации правки непрерывнолитого слитка для вывода его на горизонт пропорционально зависят от радиуса кривизны  $R$  технологической оси. Если рассмотреть возможность изменения радиуса кривизны на 0,2...0,5 мм (в пределах установленного допуска проектно-конструкторской документацией МНЛЗ), то очевидно, что это несильно отразится на значении напряжения.

В случае многоточечного разгиба слитка технологическая ось ручья образуется совокупностью сопряженных дуг окружностей с различными радиусами. В этом случае кривизна технологической оси и степень деформации должны быть постоянными на всем участке формирования слитка. Функция кривизны, а также первая и вторая ее производные не должны иметь разрывов. А это будет возможно, если кривизна каждого дугообразного участка технологической оси, характеризуемого своим радиусом дуги (кривизны), будет равна как между собой, так и некоторому заданному значению.

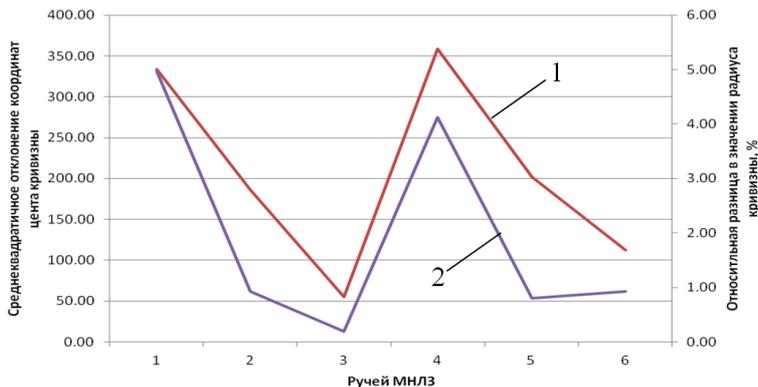


Рисунок 7. Среднеквадратичное отклонение координат фактического центра кривизны (1) и относительная разница в значении радиуса кривизны (2) технологической оси МНЛЗ

Как показали экспериментальные данные на МНЛЗ конструкции «Danieli & C. Officine Meccaniche S.p.A.», технологическая ось имеет два участка с различным радиусом дуг окружностей, ее образующих. На основании этих данных дана количественная оценка нарушения формы и параметров технологической оси каждого ручья МНЛЗ. Сопоставление приведенных данных с результатами причинно-количественного анализа отказов и неисправностей МНЛЗ позволяет сделать вывод о том, что именно разность значения кривизны сопряженных дугообразных участков, образующих технологическую ось ручья, является определяющим фактором обеспечения точности конструктивных и технологических параметров машины. Из приведенной диаграммы (рисунок 7) следует, что технологическая ось ручья №3, характеризующегося в рассматриваемом периоде времени минимальным количеством отказов и неисправностей, имеет переход от одного дугообразного участка к другому с изменением радиуса кривизны на 0,19 %, среднеквадратичное отклонение координат фактического центра кривизны составляет 54,94 мм. По ручьям №2, №5 и №6 наблюдается картина, когда относительная разница в значении радиуса кривизны стремится к минимальному значению, а среднеквадратичное отклонение координат центра кривизны – к максимальному, что можно также сопоставить с низкими показателями безотказности оборудования МНЛЗ.

Таким образом, при выставке оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка радиальной сортовой МНЛЗ относительно технологической оси ручья в первую очередь следует руководствоваться отклонениями координат положения оборудования относительно заданных проектно-конструкторской документацией. Во-вторых – значением относительной разницы кривизны сопряженных дугообразных участков, образующих технологическую ось. Минимального значения разницы можно достичь путем совмещения их центров кривизны при условии равенства значения кривизны. Отклонение оборудования МНЛЗ относительно технологической оси в радиальном направлении в диапазоне 0,2...0,5 мм установлено исходя из обеспечения минимального отклонения координат фактических центров кривизны сопряженных дугообразных участков технологической оси.

**В пятом разделе «Развитие практики контроля конструктивных и технологических параметров МНЛЗ»** рассматривается научно-обоснованная практика контроля и диагностирования привода механизма качания кристаллизатора, контроля конструктивных и технологических параметров оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка сортовой МНЛЗ.

Ранее разработанная динамическая модель электромеханического привода механизма качания позволяет провести исследования влияния: погрешности сборки и монтажа привода на напряжения в опасном сечении эксцентрикового вала; усталостного разрушения эксцентрикового вала на амплитудно-частотную характеристику и уровень вибрации привода. На основе полученных результатов в первом случае определены пределы точности монтажа (сборки) привода, а во втором – границы технического состояния (целостности) эксцентрикового вала привода МКК.

Исследования показали, что причина разрушения эксцентрикового вала заключается в возникновении «монтажных» напряжений из-за погрешностей сборки и монтажа привода механизма качания. При отклонении положения опоры качающейся платформы привода в продольном или поперечном направлении выше 0,15...0,2 мм на эксцентриковом валу появляется постоянная по значению и направлению сила, которая при вращении вала будет изгибать его консольную часть, и соответственно – способствовать накоплению усталостных повреждений. Возникающие при этом в сечении консольной части вала амплитуды напряжений (62...81 МПа) в несколько раз больше напряжений от рабочей нагрузки и соизмеримы с пределом выносливости стали вала (62,5...63,5 МПа). Долговечность вала при отсутствии «монтажных» напряжений достаточно высокая. При неточном монтаже долговечность существенно снижается и может составить от нескольких часов до нескольких дней. Для предупреждения возникновения «монтажных» напряжений были разработаны рекомендации по изменению порядка сборки и монтажа привода механизма качания.

Для проведения исследования влияния усталостного разрушения эксцентрикового вала на амплитудно-частотную характеристику привода механизма качания разработана математическая модель разрушения вала – развитие трещины в консольной части вала приводит к уменьшению его диаметра  $d_0$  в опасном сечении, что в свою очередь уменьшает его коэффициент жесткости:

$$k_B(\tau) = k_B(0) \left( 1 - \frac{l_{mp}(\tau)}{d_0} \right)^4, \quad l_{mp}(\tau) = d' e^{\ln 1000 \left( \frac{\tau}{T} - 1 \right)},$$

где  $k_B(0)$  – исходная жесткость вала при отсутствии в нем трещины;  $d_0$  – исходный диаметр вала в опасном сечении;  $l_{mp}(\tau)$  – текущая длина трещины рассчитывается на основе теории Шенли;  $\tau$  – текущее время с момента зарождения трещины и до разрушения вала;  $d'$  – диаметр равный критической длине трещины  $l_{кр}$ , при которой происходит разрушение эксцентрикового вала (в расчете полагалось, что  $d' = d_0$ );  $T$  – наработка вала до разрушения;  $\tau/T$  – относительная наработка эксцентрикового вала привода (изменяющаяся от 0 до 1).

Из результатов исследования амплитудно-частотной характеристики привода при усталостном разрушении эксцентрикового вала, следует, что уменьшение коэффициента жесткости консольной части вала (с  $4,1 \cdot 10^7$  Н/м до нуля, в момент разрушения вала) приводит к росту суммарного уровня вибрации привода в 5 раз. Соответственно изменяется и спектр колебаний (частота его максимума понижается), что является следствием уменьшения суммарной жесткости крепления привода.

Установленные границы технического состояния эксцентрикового вала положены в основу виброметрического метода диагностирования, направленного на предупреждение возникновения и аварийного развития его усталостного разрушения. Экспериментальное опробование разработанного метода диагностирования подтвердило его достоверность и эффективность.

Контроль конструктивных и технологических параметров оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка МНЛЗ направлен на оценку фактического планово-высотного положения оборудования (I) и параметров колебательного движения кристаллизатора (II) относительно технологической оси ручья с последующей разработкой корректирующих воздействий по выставке и настройке оборудования.

Для решения первой задачи была разработана технология контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ с помощью измерительного комплекса «Визир 3D». Технология контроля заключается в проведении измерений координат контрольных точек оборудования МНЛЗ электронным тахеометром в системе координат, привязанной к центральным осям машины. Форма и параметры фактической технологической оси ручья машины определяются с помощью ранее созданной ее математической модели.

По техническим причинам в условиях цеха, где располагается МНЛЗ, невозможно закрепить места установки (так называемые станции) тахеометра и каждый раз точно устанавливать его при измерениях в одно и то же место. Поэтому измерения проводятся по технологии «свободной станции», то есть при произвольном расположении станций. Для этого на неподвижных металлоконструкциях цеха закрепляются опорные точки. Опорная сеть привязывается к центральным осям МНЛЗ. В результате получается геодезическая сеть опорных точек, относительно которой можно выполнять высокоточные измерения положения оборудования МНЛЗ в режиме реального времени.

Для измерения используются магнитные марки и разработанная призма с измерительной штангой, уровнем и отражающей поворотной пластиной. Уровень обеспечивает центрирование измерительного приспособления с точностью 0,05 мм. Призма позволяет находить верхнюю образующую цилиндра (ролика), когда измерительная штанга находится в вертикальном положении.

Технология измерений следующая: тахеометр устанавливают таким образом, чтобы можно было измерить не менее трех опорных точек и некоторое количество контрольных точек оборудования. Тахеометр наводится на соответствующие опорные точки, после чего с управляющего компьютера посылается команда на выполнение измерений, тахеометр проводит пятикратное измерение горизонтального и вертикального углов и наклонного расстояния. Результаты передаются в компьютер для вычисления среднего значения результатов измерения и оценки их разброса. Измерения, результаты которых сильно отличаются, не берутся в расчет. Сразу после измерений опорных точек можно уравнивать измерения, выполненные с данной станции и оценить точность определения их координат. Если точность достаточная, то переходят к измерению контрольных точек оборудования. Такая технология измерений позволила добиться точности определения координат  $\pm 0,2 \dots 0,5$  мм.

Проведение всех измерений в одной системе координат позволяет получать данные о фактическом положении всех единиц оборудования МНЛЗ и образуемой ими технологической оси ручья. При сопоставлении полученной трехмерной модели плано-высотного положения оборудования с теоретической моделью соответствующей проектно-конструкторской документации вычисляются абсолютные отклонения значений контролируемых координат по всему участку формирования непрерывнолитого слитка МНЛЗ. На основании полученных результатов вычислений даются рекомендации по корректирующим воздействиям: выставке, настройке или регулировке относительного положения оборудования, оказывающих значительное влияние на отклонение формы и параметров технологической оси.

Для решения второй задачи контроля параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ относительно технологической оси ручья разработан новый комбинированный метод контроля соосности колебательного движения кристаллизатора с технологической осью ручья машины, объединяющий периодический контроль положения стола качания в крайних положениях геодезическими методами с помощью тахеометра и оперативный контроль траектории движения контрольной точки стола качания методами виброметрии с использованием анализатора вибрации в режиме измерения орбиты точки.

Вибрация в любой точке стола качания в продольной и поперечной плоскостях характеризуется траекторией движения этой точки, описывающей ее положение во времени. Форма траектории зависит от динамических характеристик шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора, технического состояния подшипников качения шарниров и опор, его геометрии и вида сил, возбуждающих дополнительную вибрацию стола качания. В общем случае причиной отклонения траектории контрольной точки от заданной формы и положения может быть множество факторов, что приводит к появлению траекто-

рии сложной формы, которая представляет собой векторную сумму откликов на действие каждого вынуждающего фактора. По результатам опытно-промышленного опробования нового метода контроля колебательного движения кристаллизатора относительно технологической оси ручья сформирован альбом неисправностей механизма качания по форме траектории контрольной точки.

Синхронизация результатов измерения траектории контрольной точки с углом поворота эксцентрикового вала привода механизма качания позволяет определить положение на траектории точки, соответствующей крайнему верхнему положению кристаллизатора. Зная координаты данной точки в статике по результатам измерения геодезическими методами, можно построить траекторию этой точки в системе координат МНЛЗ для расчета отклонений ее положения относительно технологической оси ручья машины с последующей выработкой корректирующих воздействий по дополнительной выставке механизма качания с целью минимизации значений отклонения. Для этого результаты измерения импортируются из анализатора вибрации в программное обеспечение измерительного комплекса «Визир 3D».

**В шестом разделе «Характеристика внедренных научно-технических решений и мероприятий, перспективы их развития»** выполнено обобщение результатов практического использования на металлургических, машиностроительных и др. промышленных предприятиях, научно-обоснованных решений и мероприятий, разработанных в диссертационной работе при: контроле планово-высотного положения и выставке оборудования сортовых и слябовых МНЛЗ, транспортно-отвального моста, магистрального канатно-ленточного конвейера, прокатных станков; расчетах и конструировании шарнирно-рычажных и рессорных механизмов качания кристаллизаторов сортовых, слябовых и блюмово-сортовых МНЛЗ; диагностировании технического состояния механического оборудования; передаче технологии контроля положения и выставки крупногабаритного оборудования и измерительного комплекса «Визир 3D»; проектировании манипуляторов для быстрой установки и замены стаканов-дозаторов промежуточного ковша сортовой и слябовой МНЛЗ.

Применительно к МНЛЗ разработанные научно-технические решения и мероприятия позволили повысить производительность машин и качество непрерывнолитой заготовки за счет сокращения количества дефектов, увеличить коэффициент использования и безотказность оборудования, снизить затраты на его техническое обслуживание и ремонт, что способствовало росту технико-экономической эффективности технологических процессов непрерывной разливки стали соответствующих металлургических предприятий. Внедрение результатов диссертационной работы позволило получить в 2014 г. фактический экономический эффект 6668828,65 грн.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе решена актуальная **научная проблема** развития основ обеспечения точности конструктивных и технологических параметров МНЛЗ за счет создания математической модели технологической оси ручья

машины и метода формирования на ее базе фактической оси; модели напряженно-деформированного состояния звеньев и амплитудно-частотных характеристик электромеханического привода и метода расчета на их основе рациональных режимов работы механизма качания кристаллизатора; модели механизма качания кристаллизатора и метод синтеза на ее основе рациональных длин звеньев механизма качания, а также зависимостей для расчета напряженно-деформированного состояния упругих элементов (направляющих и шарниров) рессорных механизмов качания кристаллизатора, и установления границ технического состояния электромеханического привода механизма качания, **имеющая важное хозяйственное значение** для увеличения производительности существующих и новых МНЛЗ, обеспечения безопасности и стабильности процессов непрерывной разливки стали, а также повышения качества получаемых заготовок.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Анализ практики эксплуатации сортовых МНЛЗ показал, что, несмотря на успехи в решении отдельных вопросов, в целом состояние оборудования МНЛЗ, их производительность и коэффициент использования, а также стабильность и безопасность процессов разливки стали отстают от современных требований. Основная причина данной ситуации – недостаточное развитие теоретических основ обеспечения точности конструктивных и технологических параметров МНЛЗ. Поэтому актуальными являются исследования факторов, влияющих на точность параметров и работоспособность оборудования МНЛЗ, а также разработка научных основ их контроля и обеспечения на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации машины.

2. На основе выполнения комплекса теоретических, лабораторных и опытно-промышленных исследований разработаны математические, динамические и диагностические модели и реализованы инновационные способы синтеза шарнирно-рычажного и рессорного механизмов качания кристаллизаторов МНЛЗ конструкции ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», методы расчета их элементов, контроля и диагностирования, что обеспечивает на всех этапах жизненного цикла машины точность конструктивных и технологических параметров, безотказность и долговечность оборудования машины.

3. Определены и научно обоснованы основные резервы повышения производительности и коэффициента использования МНЛЗ, стабильности и безопасности процессов непрерывной разливки стали для существующих и перспективных МНЛЗ. Они заключаются в освоении разработанных способов и методов обеспечения точности конструктивных и технологических параметров, включающих: контроля параметров колебательного движения кристаллизатора; диагностирования состояния электромеханического привода механизма качания; контроля положения и выставки оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка.

4. Получили развитие научные основы контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ с помощью специально разработанных измерительных комплексов на основе электронного тахеометра и анализатора вибрации. В ходе

промышленного опробования подтверждено, что точность конструктивных и технологических параметров оборудования МНЛЗ является одним из условий обеспечения заданной скорости вытягивания слитка из кристаллизатора, безотказности и долговечности оборудования, а также качества получаемых заготовок.

5. На основе положений теории упругости и прочности разработаны математические модели для расчета напряженно-деформированного состояния звеньев шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ. Установлено, что рабочую частоту колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ необходимо выбирать с учетом прочностных характеристик массивных и конструктивно сложных звеньев механизма качания. В методике выбора рациональных режимов работы механизма качания учитывается ограничение долговечности его звеньев при повышении частоты колебательного движения кристаллизатора в результате концентрации напряжений. Для механизма качания сортовой МНЛЗ конструкции ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» рабочая частота колебательного движения кристаллизатора установлена - 200 кач./мин, что обеспечивает практически неограниченную долговечность его звеньев.

6. На основе положений динамики машин разработана динамическая модель для исследования амплитудно-частотной характеристики привода шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ. Установлено существование дорезонансного, резонансного и зарезонансного режимов работы привода. Рекомендуемым режимом работы привода является дорезонансный с частотой колебательного движения кристаллизатора до 400 кач./мин для привода МКК сортовой МНЛЗ конструкции ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», что характеризует возможность увеличения рабочей частоты колебательного движения кристаллизатора свыше 200 кач./мин при соответствующей конструкторской доработке механизма качания.

7. В ходе промышленного применения предложенных разработок подтверждена справедливость выдвинутых теоретических положений и правильность технических решений, а также достигнута высокая эффективность реализуемых с их использованием технологий диагностирования, контроля, сборки, монтажа, технического обслуживания и ремонта оборудования для обеспечения точности конструктивных и технологических параметров МНЛЗ, что способствовало снижению брака литых заготовок с 3...4 до 1,5...2 баллов (баллы – это интегральная характеристика, которая оценивает число и значимость дефектов), замен оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка с 10 до 1...2 за 2...3 недели эксплуатации МНЛЗ. Суммарный годовой фактический экономический эффект от внедрения предложенных разработок составил 6668828,65 грн.

8. Разработанные научно-технические мероприятия и решения являются теоретической и методологической основой для обеспечения точности конструктивных и технологических параметров промышленного оборудования различного вида. Работа с уникальными требованиями по точности к монтажу и выставке объектами (слябовые МНЛЗ, транспортно-отвальный мост, маги-

стральный канатно-ленточный конвейер, вращающиеся печи и сушильные бараны, прокатные клетки и др.) показала, что для каждого из объектов необходимо разрабатывать метод геодезического контроля, который бы учитывал тип и точность измерительного оборудования, и геометрию геодезической сети.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях*

1. Аввакумов, С.И. Особенности диагностирования металлургического оборудования / С.И. Аввакумов, В.А. Сидоров, **А.Л. Сотников** // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – №3. – С. 96-99. (*Анализ условий эксплуатации и конструктивных особенностей металлургического оборудования*).

2. Сидоров, В.А. Параметры относительного движения слитка и кристаллизатора МНЛЗ / В.А. Сидоров, Н.А. Зоренко, **А.Л. Сотников** // Металл и литье Украины. – 2005. – №9-10. – С. 21-26. (*Сравнительный анализ известных подходов к описанию совместного и относительного движения кристаллизатора МНЛЗ и формируемого в нем непрерывнолитого слитка, разработка альтернативного метода регулировки параметров колебательного движения кристаллизатора*).

3. Розробка діагностичної моделі механізму хитання кристалізатора машини безупинного лиття заготовки (Разработка диагностической модели механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовки) / Р.В. Ковальов, **О.Л. Сотніков**, В.А. Сидоров, Н.Н. Лисіков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2006. – №1Е(6). – С. 113-119. (*Постановка цели и задачи работы, разработка диагностической модели шарнирно-рычажного механизма качания для предупреждения отклонений параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ*).

4. Сидоров, В.А. Організація технічного обслуговування і ремонту механізму хитання кристалізатора МБЛЗ (Организация технического обслуживания и ремонта механизма качания кристаллизатора МНЛЗ) / В.А. Сидоров, **О.Л. Сотніков**, С.В. Птуха // Защита металлургических машин от поломок. – 2009. – Вып.11. – С. 125-129. (*Разработка рекомендаций по организации технического обслуживания и ремонта механизма качания кристаллизатора МНЛЗ по результатам оценки фактического технического состояния механизма качания*).

5. Сидоров, В.А. Аналіз характеру і причин несправностей підшипникових вузлів механізму хитання кристалізатора (Анализ характера и причин неисправностей подшипниковых узлов механизма качания кристаллизатора) / В.А. Сидоров, В.П. Цокур, **О.Л. Сотніков** // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – Вип.6(154). – С. 226-235. (сер.: машинобудування і машинознавство) (*Анализ видов поврежденных и неисправностей роликовых подшипников механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ и разработка рекомендаций по повышению их безотказности*).

6. **Сотніков, О.Л.** Діагностування підшипників важільного механізму хитання кристалізатора МБЛЗ (Диагностирования подшипников рычажного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ) // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. 21. – С. 89-94. (сер.: технічні науки)

7. **Сотніков, О.Л.** Віброметричний метод контролю соспрямованого руху кристалізатору з технологічною віссю МБЛЗ (Виброметрический метод контроля сонаправленного движения кристаллизатора с технологической осью МНЛЗ) / **О.Л. Сотніков, В.І. Руденко, Е.В. Ошовська** // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2010. – Вып.32. – С. 200-207. (*Анализ результатов теоретического и экспериментального исследования возможностей различных методов контроля отклонений геометрической оси кристаллизатора от технологической оси ручья МНЛЗ*).

8. Расчет и конструирование системы быстрой замены погружных стаканов при непрерывной разливке стали / С.П. Еронько, **А.Л. Сотников**, М.Ю. Ткачев, В.А. Чеченев // *Металл и литье Украины*. – 2011. – №12. – С. 36-44. (*Исследование кинематической точности усовершенствованной манипуляционной системы замены погружных стаканов*).

9. Автономная пневмомеханическая система дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ / С.П. Еронько, **А.Л. Сотников**, А.А. Котелевец, В.А. Чеченев // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2011. – №2. – С. 10-18. (*Анализ кинематических и энергосиловых параметров разработанного пневмомеханического устройства для дозированного ввода шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ*).

10. **Сотніков, О.Л.** Статичне врівноважування механізму хитання кристалізатора МБЛЗ (Статическое уравнивание механизма качания кристаллизатора МНЛЗ) / **О.Л. Сотніков, М.О. Родіонов** // *Защита металлургических машин от поломок*. – 2011. – Вып. 13. – С. 172-179. (*Постановка цели и задачи работы, анализ известных методов статического уравнивания и разработка динамической модели механизма качания кристаллизатора МНЛЗ*).

11. **Сотніков, О.Л.** Врівноважування механізму хитання кристалізатора МБЛЗ (Уравнивание механизма качания кристаллизатора МНЛЗ) / **О.Л. Сотніков, М.О. Родіонов** // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – Вып.35. – С. 192-201. (*Постановка цели и задачи работы, анализ известных методов динамического уравнивания и разработка динамической модели механизма качания кристаллизатора МНЛЗ*).

12. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, А.А. Лунев, **А.Л. Сотников**, Э.М. Ватралик, И.С. Фролов // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2012. – №3. – С. 12-25. (*Разработка математической модели технологической оси МНЛЗ, метода рациональной выставки оборудования машины относительно ее и методологии обеспечения точности конструктивных и технологических параметров*).

13. **Sotnikov, A.L.** The control system of balancing of the CCM mold oscillation mechanism (Система контроля уравновешенности механизма качания кристаллизатора МНЛЗ) / **A.L. Sotnikov, N.A. Rodionov** // Metallurgical and Mining Industry. – 2012. – №3. – P. 166-169. (*Постановка цели и задачи работы, определение функций системы контроля режима работы механизма качания кристаллизатора МНЛЗ по минимизации его динамической неуравновешенности и стабилизации режима работы*).

14. Состояние непрерывной разливки стали на сортовых МНЛЗ в Украине и Молдове / **А.Л. Сотников, В.Н. Киреев, А.Ю. Оробцев, Н.Н. Галян, О.Ю. Гладилин, Д.И. Душкевич, В.С. Плугатарь, С.В. Птуха, А.Ю. Цупрун** // Сталь. – 2013. – №12. – С. 8-13. (*Сбор и обработка сведений об эксплуатации сортовых МНЛЗ Украины и Молдовы, анализ состояния МНЛЗ и перспективных направлений их совершенствования. Определены направления повышения эффективности использования потенциальных возможностей повышения производительности отечественных МНЛЗ*).

15. Нормирование режимов работы и уровня вибрации механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / **А.Л. Сотников, В.М. Нагорный, А.Ю. Оробцев, С.В. Птуха, Н.А. Родионов** // Metallurgical processes and equipment. – 2013. – №1. – С. 44-54. (*Разработка и исследование динамической модели электромеханического привода механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ, выбраны рациональные режимы работы привода и выполнено нормирование общего уровня его вибрации*).

16. Расчет усилия предварительной затяжки резьбового крепления полого вала редуктора / **А.Л. Сотников, Н.А. Родионов, А.А. Ольшевский, С.В. Птуха** // Metallurgical processes and equipment. – 2013. – №2. – С. 50-57. (*Постановка цели и задачи работы, анализ результатов сравнительного расчета усилия затяжки резьбового крепления вала редуктора на эксцентриковом валу привода механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ*).

17. **Сотников, А.Л.** Диагностирование технического состояния вращающихся агрегатов / **А.Л. Сотников, А.А. Шоломицкий, П.П. Якобсон** // Metallurgical processes and equipment. – 2013. – №3. – С. 77-88. (*Комплексное диагностирование сушильного барабана для выявления причин выхода из строя подшипников качения опорных роликов барабана*).

18. Кинематические локационные измерения вращающихся агрегатов / **С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, А.А. Лунев, А.Л. Сотников, И.С. Фролов** // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вип.1 – С. 3-14. (сер.: гірничо-геологічна). (*Разработка нового способа определения геометрических и кинематических параметров вращающихся агрегатов в рабочем состоянии на базе дистанционных измерений с помощью электронного тахеометра*).

19. **Сотников, А.Л.** Исследование влияния инерционных нагрузок на нагружение шарнирно-рычажного механизма качания сортовой МНЛЗ / **А.Л. Сотников, Н.А. Родионов, В.В. Журба** // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – №4(44). – С. 70-74. (*Постановка цели и задачи работы, анализ влияния инерционных нагру-*

зок на параметры нагружения шарниров, опор и привода шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ).

20. **Сотников, А.Л.** Задачи и методы контроля и диагностирования технологического оборудования МНЛЗ // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2014. – №3. – С. 33-44.

21. **Сотников, А.Л.** Анализ силового нагружения шарниров и опор механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ / **А.Л. Сотников**, Н.А. Родионов, С.В. Птуха // *Металлург*. – 2014. – №10. – С. 51-56. (*Постановка цели и задачи работы, определение рациональных значений давления воздуха в амортизаторах механизма качания кристаллизатора МНЛЗ из условия обеспечения минимального значения размаха сил реакций в его шарнирах и опорах*).

22. **Сотников, А.Л.** Расчет долговечности подшипников качения механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / **А.Л. Сотников**, Н.А. Родионов, А.С. Парфенюк // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2014. – №1. – С. 71-78. (*Анализ известных методов расчета срока службы работающих в режиме качательного движения подшипников качения шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ*).

23. Failure analysis of the hinge-lever mould oscillator bearings of the continuous casting machine (Анализ отказов подшипников шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок) / **О. Sotnikov**, М. Rodionov, Р. Maruschak, J. Brezinova, А. Guzanova, Y. Apostol // *Strength, Fracture and Complexity*. – 2014. – Issue 8. – P. 135-143. (*Постановка цели и задачи работы, анализ результатов исследования повреждений подшипников качения шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ*).

24. Scale levels of damage to the raceway of a spherical roller bearing (Масштабные уровни повреждения к дорожке качения сферического роликового подшипника) / Р.О. Maruschak, S.V. Panin, I.M. Zakiev, М.А. Poltaranin, **А.Л. Sotnikov** // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol.59. – P. 69-78. (*Анализ механизмов деформирования и износа подшипника качения механизма качания кристаллизатора МНЛЗ с использованием многоуровневого подхода*).

25. **Сотников, А.Л.** Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2016. – Т.59, №5. – С. 334-338.

#### ***Научные работы в виде монографий***

26. Сидоров В.А. Эксплуатация подшипников качения: монография / В.А. Сидоров, **А.Л. Сотников**. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2014. – 175 с. (*Исследование видов повреждений и неисправностей подшипников качения промышленного оборудования, в том числе механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ, и разработка мероприятий по их предупреждению*).

#### ***Научные работы, опубликованные в других журналах и изданиях***

27. Сидоров, В.А. Исследование причин неисправностей работы привода перемещения холодильника МНЛЗ / В.А. Сидоров, **А.Л. Сотников**, И.Г.

Золкин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. – №1. – С. 21-24. (*Причинно-количественный анализ неисправностей привода и кинематический анализ параметров движения холодильника с шагающими балками сортовой МНЛЗ*).

28. **Сотников, А.Л.** Отклонения роликов зоны вторичного охлаждения от технологической оси МНЛЗ // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2006. – №2. – С. 43-48.

29. Еронько, С.П. Исследование кинематики манипулятора для быстрой замены погружных стаканов при непрерывной разливке стали / С.П. Еронько, **А.Л. Сотников**, В.С. Седуш // *Бюллетень науч.-техн. и эконом. инфор. «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация»*. – 2006. – №8. – С. 34-37. (*Разработка математической модели шарнирно-рычажного манипулятора для быстрой замены погружного стакана и синтез рациональных длин звеньев манипулятора из условия обеспечения заданных параметров движения стакана*).

30. **Сотников, А.Л.** Контроль соосности оборудования МНЛЗ // *Бюллетень науч.-техн. и эконом. инфор. «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация»*. – 2006. – №11. – С. 52-55.

31. Последовательность оценки технического состояния механического оборудования при использовании спектрального анализа вибрации / В.А. Сидоров, **А.Л. Сотников**, Л.М. Серебров, А.А. Духовский // *Вибрация машин: измерение, снижение, защита*. – 2006. – №2. – С. 30-33. (*Разработка методологии оценки технического состояния оборудования по результатам спектрального анализа его вибрации*).

32. Сидоров, В.А. Метод оперативного контроля соосности кристаллизатора с технологической осью ручья МНЛЗ / В.А. Сидоров, **А.Л. Сотников** // *Бюллетень науч.-техн. и эконом. инфор. «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация»*. – 2006. – №9. – С. 38-41. (*Разработка виброметрического метода определения фактического радиуса качания кристаллизатора МНЛЗ*).

33. Шоломицкий, А.А. Контроль геометрических параметров машины непрерывного литья заготовок / А.А. Шоломицкий, **А.Л. Сотников**, В.И. Адаменко // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2007. – №3. – С. 27-30. (*Адаптация применительно к слябовым МНЛЗ технологии контроля положения и выставки оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка с помощью электронного тахеометра*).

34. Романов, В.А. Совершенствование метода измерения несоосности валов с помощью лазерных излучателей / В.А. Романов, **А.Л. Сотников** // *Вибрация машин: измерение, снижение, защита*. – 2008. – №1. – С. 47-51. (*Сравнительный анализ недостатков способов измерения несоосности валов с помощью индикаторов часового типа и лазерных излучателей*).

35. Могильный, С.Г. Геодезические работы при проверке соосности оборудования машины непрерывного литья заготовок / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, **А.Л. Сотников** // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2009. – №2. – С. 19-27. (*Анализ требований проектно-конструкторской документации сортовой МНЛЗ в части допустимых отклонений оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка относительно технологиче-*

ской оси ручья, анализ причин отклонения положения оборудования МНЛЗ в процессе эксплуатации).

36. Сидоров, В.А. Исследование влияния давления воздуха в пневмоамортизаторах механизма качания на параметры движения кристаллизатора МНЛЗ / В.А. Сидоров, **А.Л. Сотников**, А.Л. Нестеров // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2009. – №4. – С. 14-19. (*Постановка цели и задачи работы, анализ результатов экспериментальных исследований влияния давления воздуха в пневматических амортизаторах механизма качания на биения кристаллизатора МНЛЗ и определение рациональных значений давления воздуха*).

37. Наблюдения за деформациями, оценка и прогнозирование технического состояния подъемно-транспортного оборудования / А.А. Шоломицкий, **А.Л. Сотников**, В.М. Нагорный, В.В. Нагорный, Т.Г. Николаева, Н.В. Малеев // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2009. – №3. – С. 31-38. (*Разработка метода диагностирования транспортно-отвального моста на основе сбора и анализа данных о деформациях его металлоконструкций в процессе эксплуатации*).

38. **Сотников, А.Л.** Виброметрический метод диагностирования подшипников рычажного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // *Вибрация машин: измерение, снижение, защита*. – 2010. – №3. – С. 27-32.

39. Геодезическое обеспечение высокоточного монтажа и выверки технологического оборудования / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, **А.Л. Сотников**, И.С. Фролов, Е.Е. Кужненко // *Вибрация машин: измерение, снижение, защита*. – 2011. – №2. – С. 34-45. (*Техническое диагностирование и разработка методологии по контролю положения и выставке оборудования МНЛЗ и другого промышленного оборудования*).

40. Шоломицкий, А.А. Высокоточный измерительный комплекс «Визир 3D» / А.А. Шоломицкий, **А.Л. Сотников** // *Prostoev.NET*. – 2014. – №1. – С. 52-58. (*Анализ возможностей измерительного комплекса применительно к измерению геометрических размеров и контролю положения и выставки промышленного оборудования*).

#### ***Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций***

41. Сидоров, В.А. Выбор средств технического диагностирования механического оборудования / В.А. Сидоров, **А.Л. Сотников** // *Вибрация машин: измерение, снижение, защита: материалы Межд. науч.-техн. конф., 13-15 мая 2003 г., Донецк*. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – С. 25-30. (*Классификация современных анализаторов вибрации по видам решаемых задач*).

42. Сидоров, В.А. Техническое состояние механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / В.А. Сидоров, **А.Л. Сотников** // *Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век: тезисы докладов Межд. науч.-техн. конф., 21-23 сентября 2004 г., Донецк*. – Донецк: ДонГТУ, 2004. – С. 58. (*Анализ видов неисправностей и причин их возникновения механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ*).

43. Мазуренко, В.В. Определение причин отклонения параметров движения рычажных механизмов / В.В. Мазуренко, В.А. Мешков, **А.Л. Сотников** //

Машинознавство і деталі машин: матеріали 7-ої регіональної наук.-метод. конф., 29 березня 2005 р., Донецьк. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 38-41. (*Анализ причин отклонения параметров колебательного движения шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ*).

44. Могильный, С.Г. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, **А.Л. Сотников** // Теория и практика технического диагностирования оборудования предприятий металлургических и энергетических комплексов: тезисы докладов Межд. науч.-практ. конф., 2012 г., Урзуф. – Мариуполь: ММК им. Ильча, 2012. – С. 33-34. (*Вычисление отклонений оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка МНЛЗ от технологической оси ручья и разработка методологии по контролю положения и выставке оборудования машины*).

45. Проблемы совершенствования оборудования машин непрерывного литья заготовок / Е.Н. Смирнов, **А.Л. Сотников**, Н.А. Родионов, А. Стефаник // XIII Int. Scientific Conf. «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering»: a collective monograph. – Czestochowa: Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, 2012. – Chap.1, No.24. – P. 69-76. (*Анализ проблем эксплуатации и направлений совершенствования современных механизмов качания кристаллизаторов МНЛЗ*).

46. **Сотников, А.Л.** Технический аудит оборудования машин непрерывного литья заготовок // Современные тенденции ТООР. Диагностика оборудования горно-металлургического и энергетического комплексов: тезисы докладов Межд. науч.-практ. конф., 2013 г., Мариуполь. – Мариуполь: ММК им. Ильча, 2013. – 57-59 с.

47. **Сотников, А.Л.** Исследование нагружения подшипниковых узлов рычажного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / **А.Л. Сотников**, Н.А. Родионов // Надежность металлургического оборудования: сб. науч. тр. по материалам Межд. науч.-тех. конф., 28-31 октября 2013 г., Днепропетровск. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2013. – С. 196-202. (*Постановка цели и задачи работы, исследование силового нагружения шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ*).

48. **Сотников, А.Л.** Развитие теоретических основ обеспечения параметрической точности машин непрерывного литья заготовок // Инновационные перспективы Донбасса: тезисы докладов 2-й Межд. науч.-практ. конф., 25-26 мая 2016 г., Донецк. В 8 т. Т.3. Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – С. 42-46.

49. **Сотников, А.Л.** Контроль параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ / Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 5-й Межд. науч.-практ. конф., 30 июня-1 июля 2016 г., Санкт-Петербург; под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 242-249.

Подписано к печати 15.09.2016 г.  
Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Бумага мелованная.  
Гарнитура «Newton». Печать – лазерная.  
Ус. печ. л. 2,0. Заказ №0916. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии  
Издательства «Донецкая политехника»  
на цифровом лазерном издательском комплексе  
Xerox DocuColor 2060  
Тел.: +380 (62) 304-60-82