

Определение границ работоспособного состояния столов качания сортовых МНЛЗ

Рассмотрено работоспособное состояние стола качания в следующих направлениях: искажение синусоидального характера движения и значения дополнительных, поперечных и продольных колебаний. Экспериментальные исследования проводились на сортовой МНЛЗ, оборудованной рычажными шарнирными четырехзвенными механизмами качания кристаллизатора. Сформирован справочник проявлений временной формы вибрационного сигнала, учитывающий характерные неисправности столов качания. Определены границы работоспособного состояния по значениям поперечных и продольных колебаний столов качания. Ил. 5. Табл. 5. Библиогр.: 3 назв.

Ключевые слова: столы качания, электромеханический привод, сортовая МНЛЗ, временная форма, вибрационный сигнал, продольные и поперечные колебания

Operable state of oscillation table is considered in the following directions: distortion of sinusoidal motion pattern and values of additional, lateral and longitudinal oscillations. Experimental research was carried on the continuous-casting machine equipped with lever joint four-links mechanisms of crystallizer oscillation. The directory of vibration signal time form appearance, which considers the characteristic malfunctions of oscillation tables, is compiled. The limits of operable state are defined by values of lateral and longitudinal vibrations of oscillation tables.

Keywords: oscillation tables, electromechanical drive, continuous-casting machine, time form, vibration signal, lateral and longitudinal oscillations

Механизм качания кристаллизатора машины непрерывного литья сортовой заготовки является неотъемлемой частью технологического оборудования непрерывной разливки стали. Актуальность исследования границ работоспособного состояния столов качания определяется их влиянием на параметры технологического процесса непрерывной разливки стали [1-3].

Работоспособное состояние стола качания следует рассматривать в двух направлениях: искажение синусоидального характера движения и величины дополнительных, поперечных и продольных колебаний. Отсутствие сведений о теоретических исследованиях работоспособного состояния потребовало проведения экспериментальных исследований в промышленных условиях путем регистрации формы вибрационного сигнала и измерения параметров движения кристаллизатора при изменении давления воздуха в пневмоамортизаторах.

Экспериментальные исследования проводились на сортовой МНЛЗ, оборудованной рычажными шарнирными четырехзвенными механизмами качания кристаллизатора. Привод механизма качания электромеханический от электродвигателя через редуктор и эксцентриковую муфту, являющейся ведущим звеном рычажного механизма качания. На ведомом звене рычажного механизма – столе качания, установлен и закреплен кристаллизатор. С противоположной стороны от привода, стол качания опирается на два пневмоамортизатора для частичного уравнивания силы тяжести стола, кристаллизатора и силы трения от разливаемого слитка.

Анализ формы вибрационного сигнала

Анализ характерных повреждений механизма ка-

чания кристаллизатора сортовой радиальной МНЛЗ показывает, что характерные повреждения связаны со следующими причинами:

- износ шпоночного соединения эксцентриковой муфты;
- ослабление и разрушение резьбовых соединений - болтов крепления шпонок эксцентриковой муфты, болтов крепления редуктора, болтов крепления механизма качания к основанию;
- разрушение эксцентрикового вала;
- повреждения посадочных мест и подшипников шарниров;
- нарушение режима смазывания шарниров и редуктора.

Форма вибрационного сигнала стола качания в вертикальном направлении предоставляет информацию об отклонении закона движения от синусоидального. Установлено, что техническое состояние столов качания с разных сторон характеризуется вибрационными параметрами. **Виброперемещение** показывает фактический характер движения стола, при заданной амплитуде качания (10 мм) и заданном законе движения – синусоидальном. Полученная временная реализация сигнала виброперемещения для стола качания сортовой радиальной МНЛЗ практически реализует синусоидальный закон движения с малыми отклонениями от задания (рис. 1).

Максимальное значение виброперемещения + 5,29 мм, минимальное значение – 5,04 мм, размах колебаний – 10,33 мм. Заданное значение – 10,0 мм. Сигнал практически симметричный, стабильный. Наблюдается периодическое уменьшение амплитуды колебаний до 8,4 мм. **Виброскорость** характеризует запас энергии, которая может приводить к разрушению деталей. По исследуемому столу качания временная реализация виброскорости приведена на рис. 2.

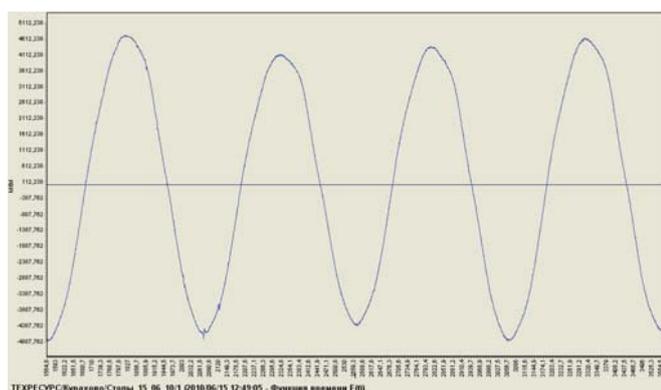


Рис. 1. Временной сигнал виброперемещения по столу качания

Таблица 1. Изменение амплитуды колебаний (мм) столов качания после ремонта

Номер стола	Амплитуда колебаний до ремонта	Амплитуда колебаний после ремонта	Стойкость, месяцев
1	↔1,2 ↑0,4	↔0,65 ↑0,5	8
2	↔0,9 ↑1,2	↔0,1 ↑0,3	2,5
3	↔1,0 ↑1,3	↔0,6 ↑0,4	4
4	↔0,7 ↑0,4	↔0,5 ↑0,5	7
5	↔1,0 ↑0,9	↔0,6 ↑0,5	3

Максимальное значение виброскорости + 72,0 мм/с, минимальное значение – 66,5 мм/с, размах колебаний – 138,5 мм/с. Теоретическое значение – 126,4 мм/с. Отклонения не превышают 10 %. Форма сигнала несколько отличается от синусоидальной, но стабильно повторяется. Это свидетельствует об удовлетворительном состоянии стола качания.

Наиболее ощутимо действующие силы и отклонения их от номинальных значений проявляются на кривых **виброускорения** (рис. 3) - максимальное значение виброускорения + 1,91 м/с², минимальное значение – 1,16 м/с², размах колебаний – 3,07 м/с². Теоретическое значение – 1,6 м/с². Отклонения почти двукратные. Известно, что изменение вибрации менее чем в два раза не приводит к изменению технического состояния, следовательно, возможно продолжение эксплуатации механизма.

Проведенные исследования позволили сформировать относительно наблюдаемого временного сигнала виброускорения справочник основных повреждений и отклонений в работе столов качания. Стол, находящийся в работоспособном состоянии имеет синусоидальную траекторию движения. При неработоспособном состоянии траектория движения становится полигармонической. Это результат сложения двух синусоидальных колебаний с практически одинаковой амплитудой: заданное движение стола; дополнительное перемещение стола в зазорах шарнирной системы.

Качения стола имеющие хаотический вид – реализация неустойчивого режима работы из-за неправильной регулировки давления воздуха в пневмоамортизаторах и возможных повреждениях деталей привода. Форма сигнала виброускорения, имеющая практически правильную синусоиду с небольшой высокочастотной модуляцией сигнала, характерна для затираний деталей пневмоамортизаторов. Отклонения от идеальной синусоиды в виде формирования второго цикла колебаний может возникнуть при ослаблении резьбовых соединений и повышенной податливости стола в вертикальном направлении.

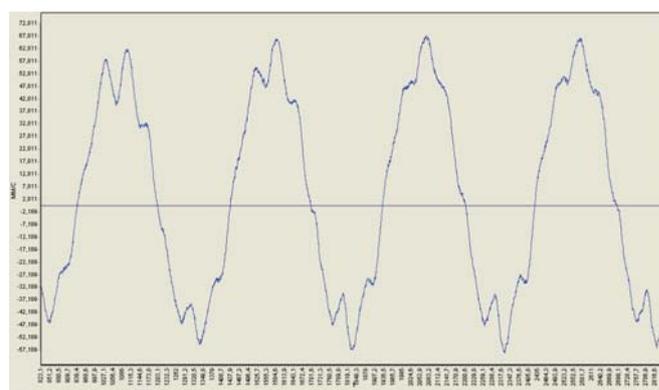


Рис. 2. Временной сигнал виброскорости стола качания

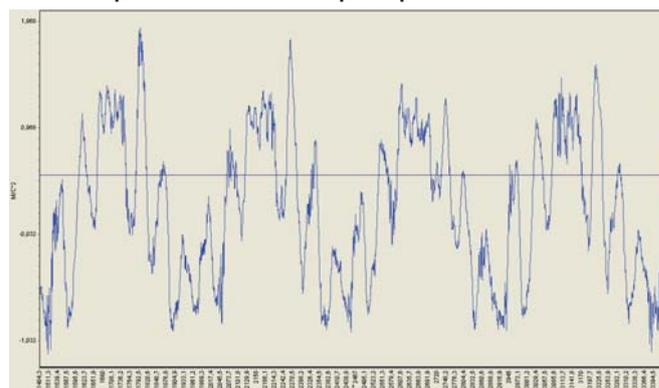


Рис. 3. Временной сигнал виброускорения стола качания

В процессе формирования справочника повреждений учтены все характерные неисправности столов качания, выявленные при анализе отказов. Необходимо отметить, что нарушения в синхронности работы пневмоамортизаторов (потаптывание) для столов качания сортовых МНЛЗ незначительно из-за большой жесткости стола в данном направлении при уравновешенном механизме.

Анализ поперечных и продольных колебаний
Путем регулировки давления воздуха в пневмоамортизаторах обеспечивается синусоидальный закон колебательного движения стола качания и, соответственно, кристаллизатора МНЛЗ. Изменение давления в пневмоамортизаторах приводит к изменению продольных и поперечных колебаний кристаллизатора, влияющих на параметры технологического процесса формирования слитка. Обеспечение колебательного движения кристаллизатора с минимальными отклонениями от рабочего режима позволяет обеспечить стабильность и безопасность технологического процесса разлива стали и увеличить срок службы механизма качания. Анализ данных по восстановительным ремонтам механизмов столов качания кристаллизаторов МНЛЗ (табл. 1), показывает:

1. В ходе восстановительных ремонтов достигается уменьшение амплитуды колебаний стола с 0,3-1,1 до 0,1-0,65 мм в поперечном направлении (↔) и

Таблица 2. Результаты измерения продольных и поперечных колебаний столов качания при изменении давления в пневмоамортизаторах

Давление, bar	Стол № 1		Стол № 2		Стол № 3	
	Продольные колебания, мм	Поперечные колебания, мм	Продольные колебания, мм	Поперечные колебания, мм	Продольные колебания, мм	Поперечные колебания, мм
2,0	0,5	0,4	0,5	0,5	0,3	0,4
2,5	0,3	0,45	0,35	0,15	0,3	0,5
3,0	0,3	0,3	0,25	0,45	0,35	0,35
3,5	0,3	0,3	0,4	0,35	0,4	0,6
4,0	0,2	0,4	0,3	0,2	0,5	0,55
4,5	0,25	0,35	0,25	0,5	0,6	0,2
5,0	0,3	0,25	0,55	0,1	0,8	0,35

Таблица 3. Изменение колебаний относительно минимального значения по столам качания при изменении давления (2,0-5,0 bar) в пневмоамортизаторах

Стол № 1		Стол № 2		Стол № 3	
Продольные колебания, мм	Поперечные колебания, мм	Продольные колебания, мм	Поперечные колебания, мм	Продольные колебания, мм	Поперечные колебания, мм
в 2,5 раза	в 1,8 раза	в 2,2 раза	в 4,5 раза	в 2,7 раза	в 3,0 раза

с 0,6-1,3 до 0,1-0,5 мм в продольном направлении (↓).

2. Технологические требования ограничивают продольные колебания стола качания, значением 0,1 мм, а поперечные колебания, значением 0,2 мм. Указанные значения после проведения ремонтов, в большинстве случаев не достигаются. Фактически столы качания имеют биения в пределах 0,3-0,6 мм.

Главной причиной ремонта механизмов столов качания является износ посадочных мест подшипников и осей шарнирного рычажного механизма вследствие циклического ударного воздействия. Увеличение амплитуды перемещения столов качания приводят к воздействию динамических нагрузок на формирующийся в кристаллизаторе слиток из-за отклонений фактической траектории движения кристаллизатора от расчетной. Возрастает вероятность прорывов металла под кристаллизатором, особенно при производстве заготовки квадрат 100 мм. Рабочие скорости разливки в этом случае – максимальные, толщина оболочки на выходе из кристаллизатора - минимальная, а динамическое воздействие на заготовку из-за относительно небольшой удельной массы – максимальное. Из-за увеличения колебаний в продольных и поперечных направлениях возникают возмущения на зеркале металла в кристаллизаторе, образуются наплески на стенки кристаллизатора с заворотом корочки. На поверхности заготовок при этом наблюдается косоугольное расположение складок, усиливается брызгообразование в кристаллизаторе.

Корреляционной зависимости между значениями колебаний и стойкостью оборудования не зафиксировано. Это указывает на присутствие дополнительных факторов, определяющих изменение работоспособного состояния. Долговечность восстановленных механизмов качания кристаллизатора 2,5-8 мес. Требуемая долговечность должна составлять не менее 1 года.

Для определения степени влияния давления в пневмоамортизаторах на продольные и поперечные колебания столов качения, а также на параметры движения стола проведены серии экспериментов по из-

менению давления в пневмоамортизаторах с одновременным контролем значений колебаний и параметров движения стола.

Измерения параметров вибрации проведены при помощи анализатора вибрации 795М и пьезоэлектрического датчика С11. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита. Измерялись продольные и поперечные колебания столов качания – виброперемещение (размах, частотный диапазон 2-200 Гц) в контрольных точках по осям симметрии кристаллизатора. Результаты измерений колебаний столов качания при изменении давления в пневмоамортизаторах приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показывает, что изменение давления в пневмоамортизаторах от 2,0 до 5,0 bar (рабочий диапазон регулирования), приводит к различному изменению значений колебаний. Выполнены расчеты изменения колебаний относительно минимального значения по столам качания. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

По результатам проведенных экспериментов, можно утверждать, что увеличение давления в пневмоамортизаторах оказывает большее влияние на поперечные колебания по сравнению с продольными. Степень влияния этого фактора может служить оценкой технического состояния механизма качания столов при взаимной оценке. Значения менее среднего (уменьшенное влияние давления на колебания) указывают на лучшее, более стабильное состояние стола качания. Увеличение колебаний в продольном и поперечном направлениях свидетельствует о различном характере повреждений в элементах механизма. Систематизация большого количества фиксируемых значений позволит обоснованно сформировать границы различия состояний механизма. В табл. 4 указаны значения давления, при которых в пневмоамортизаторах зафиксированы минимальные значения колебаний.

Значения результирующих колебаний и давлений в пневмоамортизаторах, зафиксированные после балансировки столов качания приведены в табл. 5.

Таблица 4. Значения давления в пневмоамортизаторах, при которых зафиксированы минимальные значения колебаний столов качания

Параметр	Стол № 1	Стол № 2	Стол № 3
Минимальное продольное колебание, мм	0,2	0,25	0,3
Давление при минимальном продольном колебании, bar	4,0	3,0; 4,5	2,0-2,5
Минимальное поперечное колебание, мм	0,25	0,1	0,2
Давление при минимальном поперечном колебании, bar	4,5	5,0	4,5

Таблица 5. Значения колебаний и давление в пневмоамортизаторах после балансировки столов качания

Параметр	Стол № 1	Стол № 2	Стол № 3
Продольное колебание, мм	0,35	0,3	0,35
Поперечное колебание, мм	0,1	0,2	0,35
Давление в пневмоамортизаторах, bar	4,8	3,8	3,0

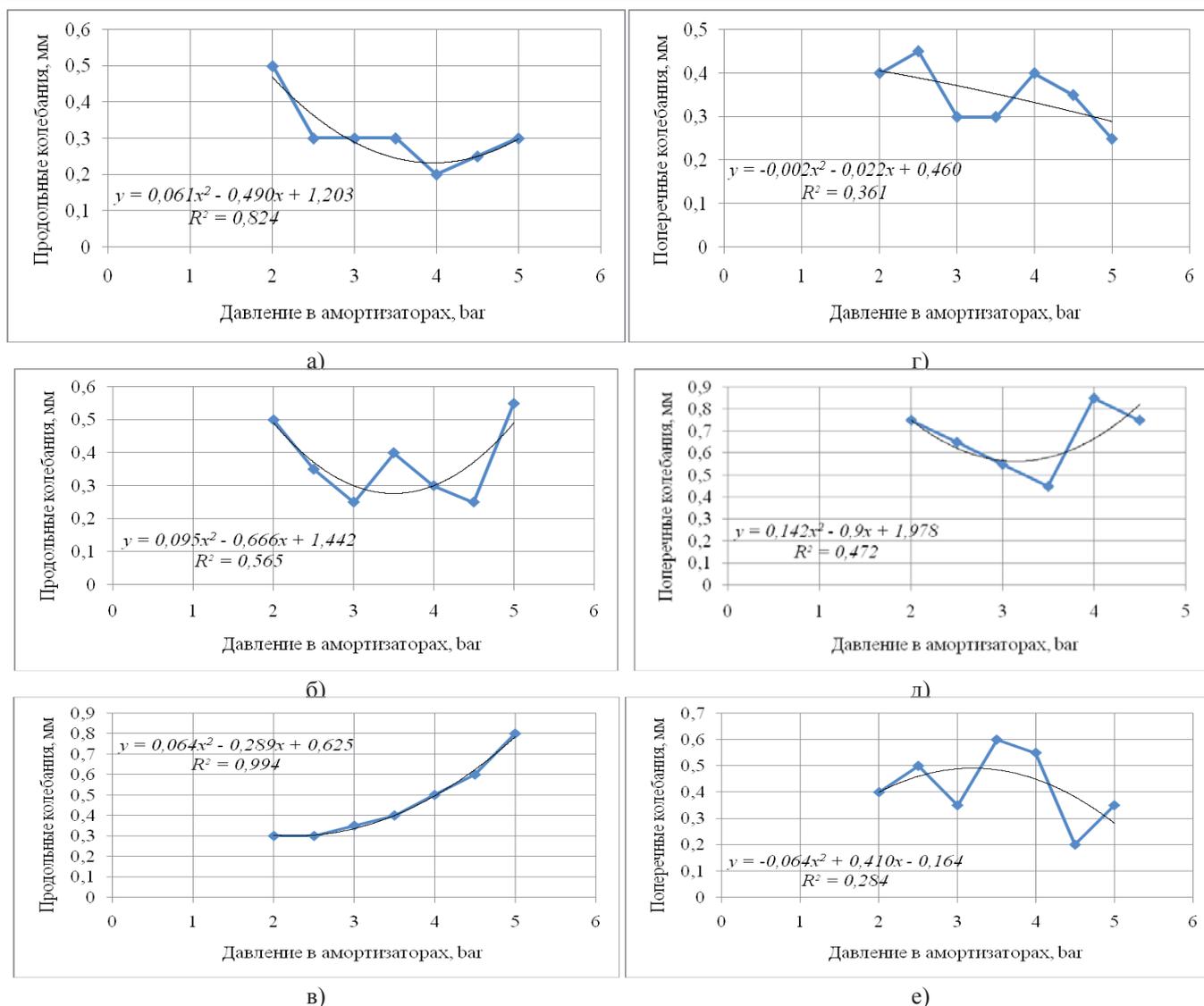


Рис. 4. Зависимость продольных и поперечных колебаний от давления в пневмоамортизаторах: а - стола качания № 1; б - стола качания № 2; в - стола качания № 3; г - стола качания № 1; д - стола качания № 2; е - стола качания № 3

Анализ полученных данных показывает, что различия между давлением с минимальными колебаниями и давлением столов после балансировки составляют 0,2-1,0 bar. Вероятно, балансировка стола позволяет выбрать наиболее приемлемый для разливки режим в зоне минимальных значений колебаний.

По результатам проведенных экспериментов определены зависимости биений столов от давления в пневмоамортизаторах (рис. 4), построены линии

тренда и определена достоверность аппроксимации.

При разливке струя разливаемого металла должна иметь минимальные перемещения относительно стенок кристаллизатора, для обеспечения стационарных условий охлаждения слитка. Определить допустимые отклонения струи металла возможно при моделировании поведения несимметричного теплового потока относительно стенок кристаллизатора. Анализ результатов измерений амплитуд колебаний сто-

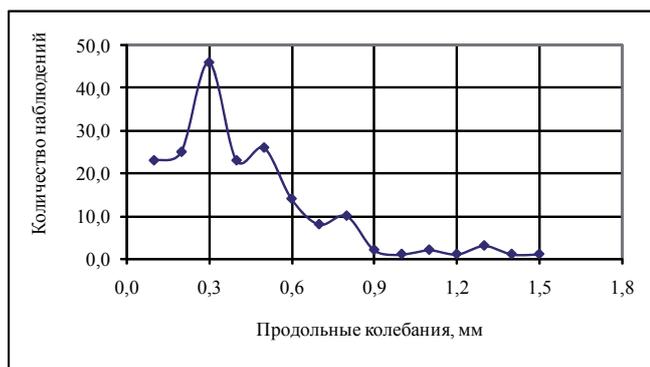


Рис. 5. График зависимости продольных колебаний и количества наблюдений

лов качания (выборка объемом 950 измерений) позволил установить границы работоспособного состояния методом статистической классификации, предполагая использование метода суперпозиции. Для продольных колебаний (рис. 5) установлены интервалы: до 0,4 мм – удовлетворительное состояние; 0,4-0,7 мм – плохое состояние; свыше 0,7 мм – аварийное состояние. Для поперечных колебаний установлены интервалы: до 0,5 мм – удовлетворительное состояние; 0,5-0,9 мм – плохое состояние; свыше 0,9 мм – аварийное состояние.

Выводы

Для определения нарушения границ работоспособности механизма качания кристаллизатора в производственных условиях необходимы:

1. Контроль параметров механических колебаний стола качания и кристаллизатора, в одной контрольной точке в вертикальном направлении, на продольной оси стола качания. Определяется различие между заданными параметрами и фактическими значениями.

2. Контроль продольных и поперечных колебаний стола качания и кристаллизатора в той же контрольной точке. Определяется отклонение от допустимых значений.

3. Контроль формы временного сигнала вибрационного сигнала в вертикальном направлении.

4. Для обеспечения безотказной работы стола качания, уменьшения износа гильз кристаллизатора и устранения возможных прорывов необходима индивидуальная регулировка давления воздуха в пневмоамортизаторах.

Библиографический список.

1. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.П., Минаев А.А. и др. Процессы непрерывной разливки стали: Монография - Донецк: ДонНТУ, 2002. - 536 с.
2. Повышение конкурентоспособности сортовых МНЛЗ путем их модернизации / А.М. Ротенберг, И.Н. Шифрин, А.К. Белитченко и др. // Электрометаллургия. - 2003. - № 3. - С. 41-46.
3. Петреев Д.В. Влияние зазоров в механизме качания кристаллизатора на время опережения // Сталь. - 2007. - № 4. - С. 67-69.

Поступила 05.08.2010

УДК 539.3

Наука

Ахундов В.М. /д. ф.-м. н./, Скрипочка Т.А. /к. ф.-м. н./
 Национальная металлургическая академия Украины

Натяг и разгерметизация эластичных цилиндров уплотнений валов

Проведено исследование деформационного поведения эластичного цилиндра при натяжении его на вал и последующем вращательном движении. Дается описание эффекта зеркального перераспределения радиального напряжения при переходе от натяга цилиндра на вал к разгерметизации соединения с ним под воздействием центробежных сил. Ил. 6. Библиопр.: 5 назв.

Ключевые слова: деформации большие, цилиндр вращающийся, уплотнение вала, силы натяжения, силы центробежные

Deformation behavior of the elastic cylinder at its tension on the shaft and the subsequent rotary motion is investigated. The effect of mirror-image redistribution of radial stress at transition from cylinder reload on the shaft to depressurization of coupling under effect of centrifugal forces is explained.

Keywords: large deformation, spinning cylinder, shaft seal, tensile stress, centrifugal force

Деформация вращающегося цилиндра под воздействием центробежных сил была изучена в линейной теории упругости. Исследование линейной задачи для однородных цилиндров вместе с указанием на обширную библиографию по этому вопросу приводится в [1]. Задача для эластичного цилиндра под воз-

действием центробежных сил в плоской постановке близка к соответствующей задаче о раздувании цилиндра под воздействием центрально-симметричных объемных и поверхностных сил [2].

В нелинейной постановке, которая имеет место при больших деформациях, исследования другими авторами вращающихся цилиндров в литературе не представлены. В статье приведены результаты изуче-