

где  $\omega$  – угловая скорость барабана измельчителя ИСБ – 1, рад/с.

Тогда первая составляющая мощности  $N_1$  примет вид

$$N_1 = \frac{0.275 \rho \cdot \theta \cdot R^3 \sin \theta (1-e)^2 \omega^2 \cos^4 (\theta/4)}{(\pi + \theta) \sin \alpha (1+e)^2} \quad (7)$$

где  $\alpha$  – угол наклона ЛЭН к продольной оси барабана измельчителя, град.

Вторая составляющая прироста потребляемой мощности  $N_2$  определяется с учетом геометрических параметров барабана измельчителя и массы мелющей загрузки в динамике

$$N_2 = \frac{k \cdot m \cdot g \cdot L}{\Delta t} \quad (8)$$

где  $m$  – масса мелющей загрузки, кг;  $k$  – коэффициент трения;  $g$  – ускорение силы тяжести м/с<sup>2</sup>;  $L$  – расстояние, на которое перемещается масса мелющих тел, м;  $\Delta t$  – время перемещения, с.

Тогда прирост потребляемой мощности  $N$  (кгм/с) с ЛЭН измельчителя ИСБ – 1 будет иметь вид

$$N = \frac{0.275 \rho \cdot \omega^2 \cdot \theta \cdot R^3 \sin \theta \cdot \cos^4 (\theta/4) (1-e)^2}{(\pi + \theta) \sin \alpha (1+e)^2} + \frac{k \cdot m \cdot g \cdot L}{\Delta t} \quad (9)$$

УДК 519.28:620.171

Еловой О.М.

## МЕТОДЫ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗНОСОУСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ДИСКРЕТНЫХ ТОЧКАХ

Известно немало методов измерения износа при испытаниях на трение при скольжении или качении [1-4] Методологическая основа всех таких методов едина контактным или бесконтактным способом измеряют толщину снятого в процессе испытаний слоя материала в заданные моменты времени. Оцениваемый таким образом износ можно назвать интегральным (суммарным).

В данной работе сообщается о разработанном методе измерения дискретного износа (при испытаниях на трение скольжения или фрикционно-механическую усталость (ФМУ)) и смещения осей пары трения (при испытаниях на трение качения или контактно-механическую усталость

Рассмотренные выше аналитические зависимости позволяют рассчитать значения дополнительной мощности привода любого аналогичного барабана измельчителя, имеющего заданные геометрические параметры лопастных энергообменных ножей. Конструктивные поисковые изменения, например, геометрических параметров ЛЭН обеспечат интенсификацию процесса дробления материалов в барабанных измельчителях и снижение расхода электроэнергии.

Данная методика расчета кинематических и энергомеханических параметров барабанного измельчителя с ЛЭН может быть использована и при разработке крупногабаритных установок для стационарного их режима работы в строительном производстве.

Приоритет технического решения измельчителя ИСБ (измельчитель – смеситель барабанный) защищен патентом Республики Беларусь.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент ВУ 2010 СИ, ВО2С 17/00, В 09В 3/00, В 28С 5/20. Барабанный измельчитель – смеситель/ Б.С. Устинов, Д.Б. Устинов//Офи. Бюл. РБ, №7 – 1997. – С. 24.
2. Ханин С.И. Расчет прироста потребляемой мощности трубной мельницы с лопастными энергообменными устройствами/ Тез.докл. Всесоюзной конференции «Машины и комплексы для новых экологически чистых производств строительных материалов, ч.3/ Белгород, 1991 – С.26-27.
3. Воронков И.М. Курс теоретической механики. Госиздат физико-математической литературы. – М. – 1961. – С.402-406.

(КМУ)) [5]. Ниже приводится описание метода и некоторые основные результаты испытаний силовой системы сталь 45 – сталь 45 на ФМУ (испытания проводились на машине СИ-01) и силовой системы сталь 45 – сталь 25 ХГТ на КМУ (испытания проводились на машине СИ-02) [6, 7].

Сущность метода состоит в том что в опасном сечении образца, где возбуждаются наибольшие циклические напряжения и одновременно реализуется процесс трения скольжения (при ФМУ) или трения качения (при КМУ) (рисунок 1), отмечаются по длине окружности (пути трения) 8 точек, в каждой из которых с высокой точностью измеряется дискретный износ в течение 1 оборота образца; естественно, что та-

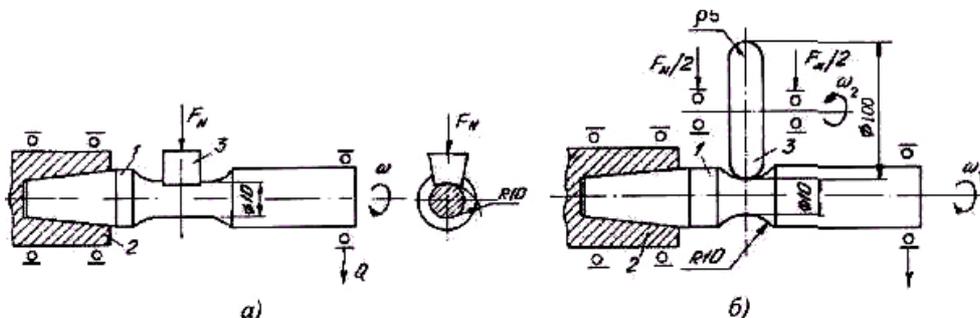


Рисунок 1 – Схема испытаний на фрикционно-механическую усталость (а) и контактно-механическую усталость (б) 1 - образец, 2 - шпindelь, 3 – контрообразец.

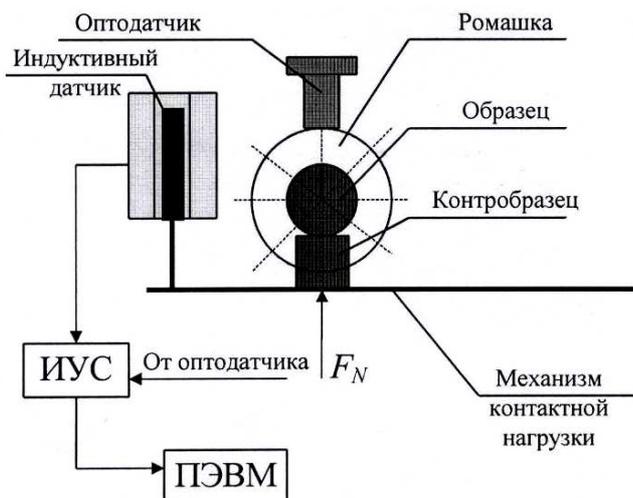


Рисунок 2 – Схема измерений износа (при испытаниях на трение скольжения и фрикционно-механическую усталость, контрообразец колодка) и смещения осей пары трения (при испытаниях на трение качения и контактно-механическую усталость контрообразец-ролик).

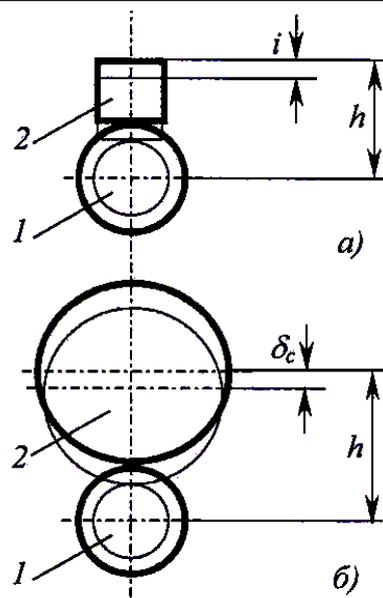


Рисунок 3 – Схемы, поясняющие измерение износа (а) и смещения осей пары трения (б): 1 – образец, 2 – контрообразец (жирными линиями показаны контуры элементов до испытаний тонкими после или в процессе испытаний).

кие измерения могут быть проведены в любой момент испытаний (по времени) Процесс испытания полностью автоматизирован с применением ПЭВМ и специализированной информационно-управляющей системы (ИУС).

Необходимо заметить, что износ понимается как толщина снятого слоя материала в результате контактного взаимодействия образца и контрообразца при трении скольжения и ФМУ, а смещения осей пары трения - как суммарный эффект повреждения поверхностей элементов силовой системы при трении качения и КМУ (износ + остаточная деформация + вибрация в системе). Схемы измерения этих параметров представлены на рисунке 2 и 3 соответственно.

Измерение износа  $i$  и смещения осей пары трения  $\delta_c$  осуществляется с помощью индуктивного датчика микроперемещений (см. рисунки 2 и 3), катушка которого закреплена на специальном держателе, жестко связанного со станиной испытательной установки. Якорь датчика, закрепленный на рычаге механизма контактной нагрузки, может свободно перемещаться вместе с контрообразцом. Следовательно, по мере уменьшения расстояния  $h$  (см. рисунок 3) между осями образца 1 и контрообразца 2 (вследствие изнашивания), якорь перемещается внутри катушки. Соответствующий электрический сигнал преобразуется ИУС в линейное перемещение и воспроизводится в ПЭВМ (для записи в память и вывода на экран). Заметим, что нормированный диапазон измерений износа  $i$  и смещения осей пары трения  $\delta_c$  составляет 10 - 3500 мкм. На машинах для износоусталостных испытаний измерение и регистрация износа  $i$  (смещения осей  $\delta_c$ ) может производиться двумя способами: интегральным и дискретным. Первый способ предусматривает выполнение измерений величины  $i$  (либо  $\delta_c$ ) через любые, достаточно малые промежутки времени. При этом каждое измеренное их значение соответствует произвольной точке на периметре опасного сечения образца и (или) рабочей поверхности контрообразца. Второй способ (дискретный) предполагает выполнение измерений  $i$  (либо  $\delta_c$ ) через заданные промежутки времени, но в

строго определенных точках по периметру поверхности опасного сечения образца. Легко увидеть, что с помощью данного способа можно следить за кинетикой повреждения каждой из точек на протяжении всего времени испытаний. В данном случае дискретные измерения производятся в восьми точках. А вообще, количество дискретных точек может ограничиваться только скоростью передачи информации в ИУС и пропускной способностью каналов системы.

Для экспериментального изучения некоторых закономерностей износоусталостного повреждения и апробации предложенных методов измерений дискретных параметров повреждения элементов силовых систем выполнен комплекс исследований. Рассмотрим некоторые типичные результаты.

На рисунке 4 представлены результаты измерений дискретного износа в 8-ми точках одного опасного сечения образца при ФМУ. Условия испытаний образец – вал (сталь 45), контрообразец – колодка (сталь 45), контактная нагрузка 20 Н, одновременно в систему были введены циклические напряжения на уровне 60% предела выносливости, частота нагружения - 50 Гц. Результаты измерений дискретного износа при трении скольжения и ФМУ можно представлять двояко.

Первое представление - в виде 8 кинетических кривых изменения износа по времени  $t$ . Каждое сечение таких кривых представляется в виде 8-ми экспериментальных точек, которые в совокупности определяют разброс величины износа в одном сечении образца в данный момент времени, т.е. 8 реализаций случайного процесса изнашивания за один цикл. Полоса разброса снизу и сверху ограничена линиями максимальных и минимальных кинетических значений каждой точки. Изменение среднего значения износа показано пунктиром. По существу, это среднее значение можно отождествить с интегральным износом, который измеряется обычно. Нетрудно видеть, сколь серьезно отличается дискретная картина изнашивания от интегральной в количественном отношении. Ширина полосы разброса достигает 87 мкм при среднем износе порядка 110 мкм. Другими словами, "амплитуда" износа относительно среднего значения составляет в условиях опыта

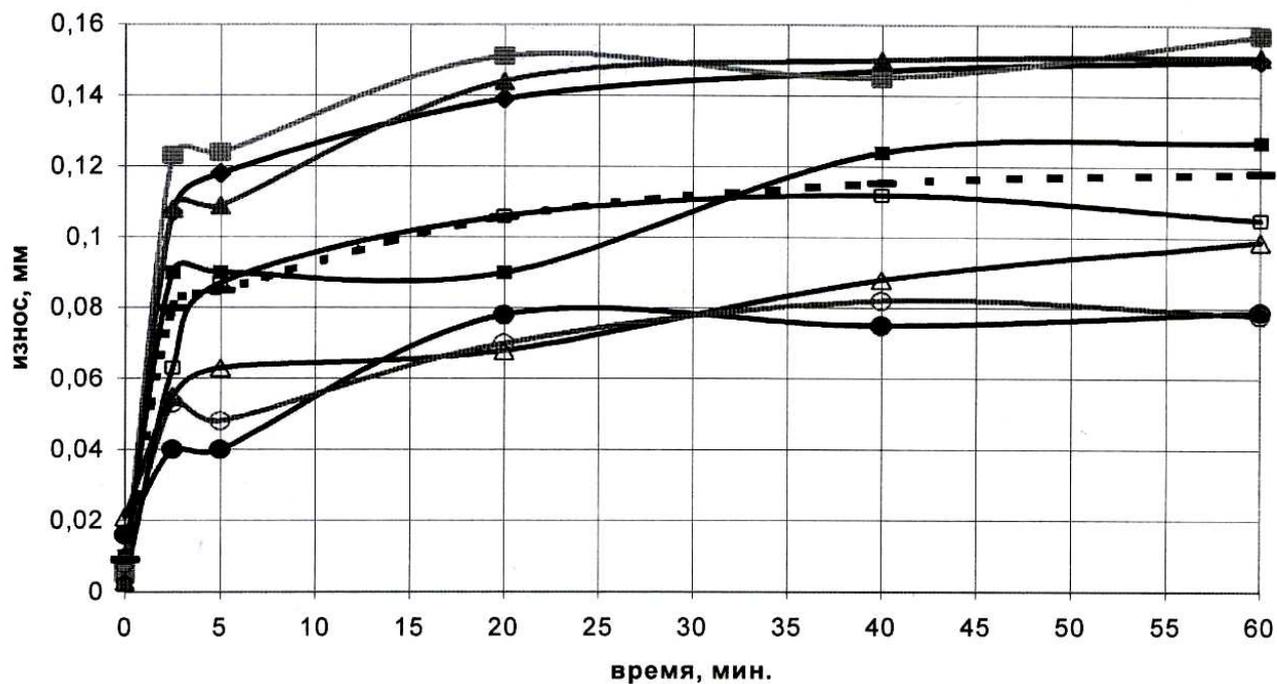


Рисунок 4 – Кинетическая «полоса» износа.

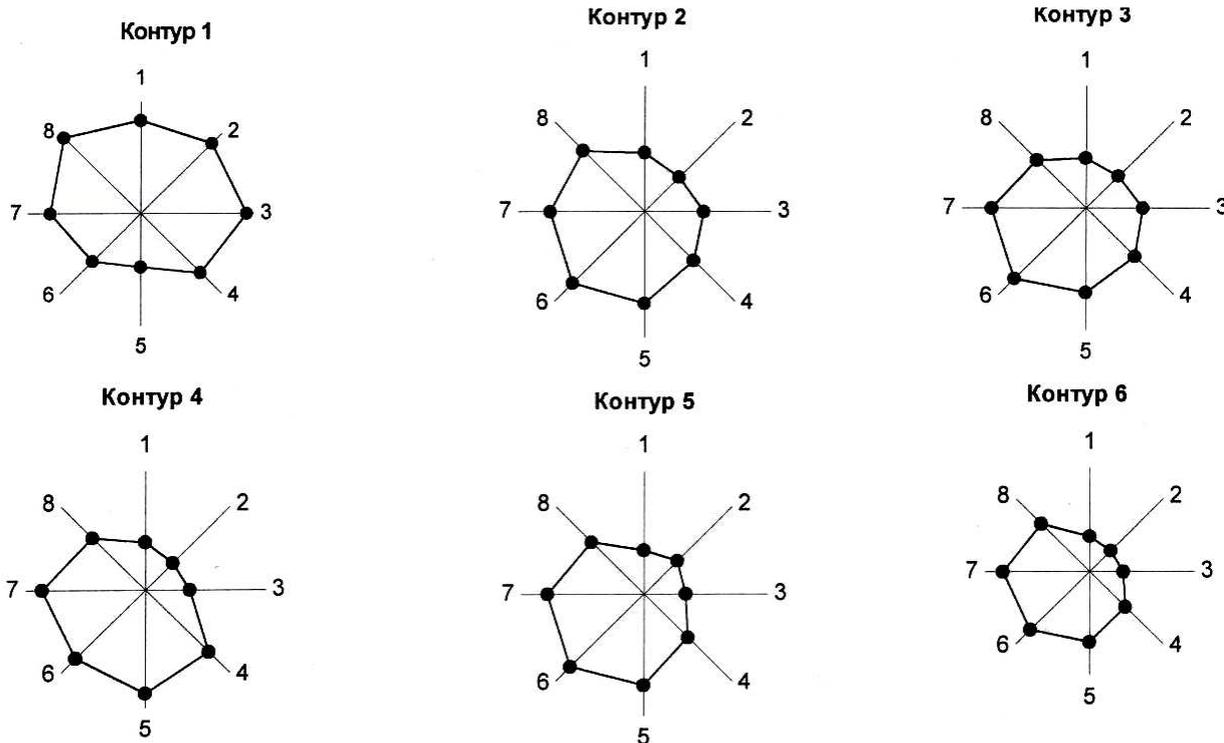


Рисунок 5 – Контур износа, зарегистрированные в различные моменты времени: 0 мин, 2,5 мин, 5 мин, 20 мин, 40 мин и 60 мин, соответственно, контур 1, контур 2, контур 3,... контур 6. Цифры 1... 8 – нумерация точек на поверхности образца. Контур в 0 мин измерен для учета постоянной составляющей биения образца.

к 40 мкм ("35%). Это можно представлять как разброс значений на микроуровне.

Второе представление - в виде "контуров" износа (см. рисунок 5), получаемых в заданные моменты времени. Эти контуры представляют собой соответствующие сечения кинетических процессов дискретного износа, изображенных на рисунке 4. Экспериментальные точки определяют контур изношенной поверхности. Контур образуют условные прямые,

соединяющие эти точки. Величина износа представляется в мм и изображается в определенном масштабе, а рассчитывается как разница между значением износа в каждой точке исходного контура (0 мин) и измеренным текущим значением в этой же точке. Нетрудно видеть, сколь серьезно отличается картина действительного (дискретно измеряемого) износа в точках сечения образца за 1 его оборот от интегрального износа в качественном отношении. Это может объясняться тем,

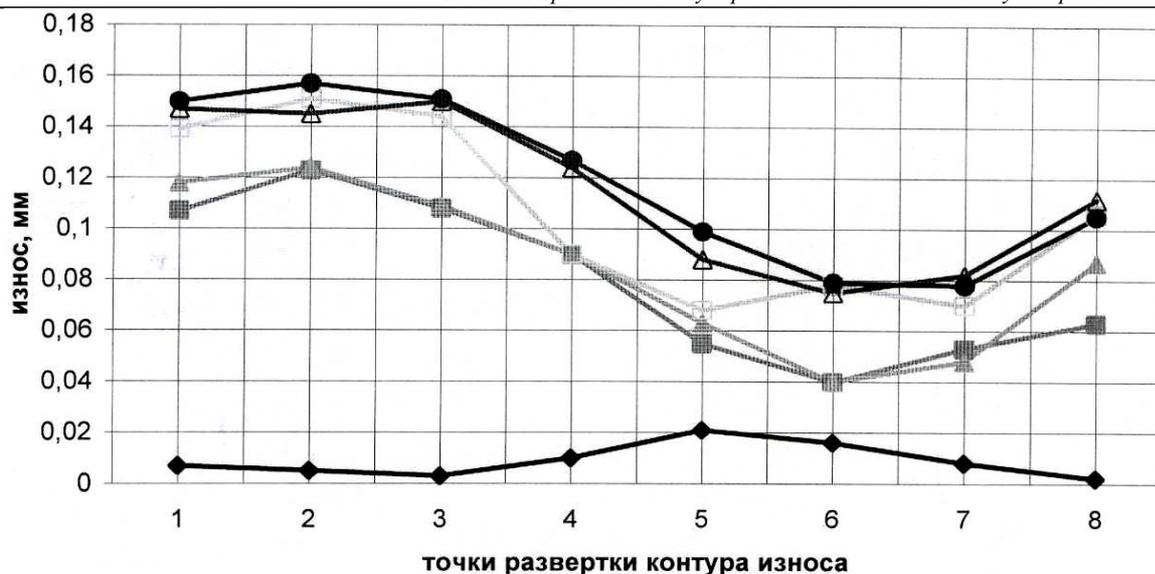


Рисунок 6 – Развертка контуров износа, изображенных на рисунке 5.

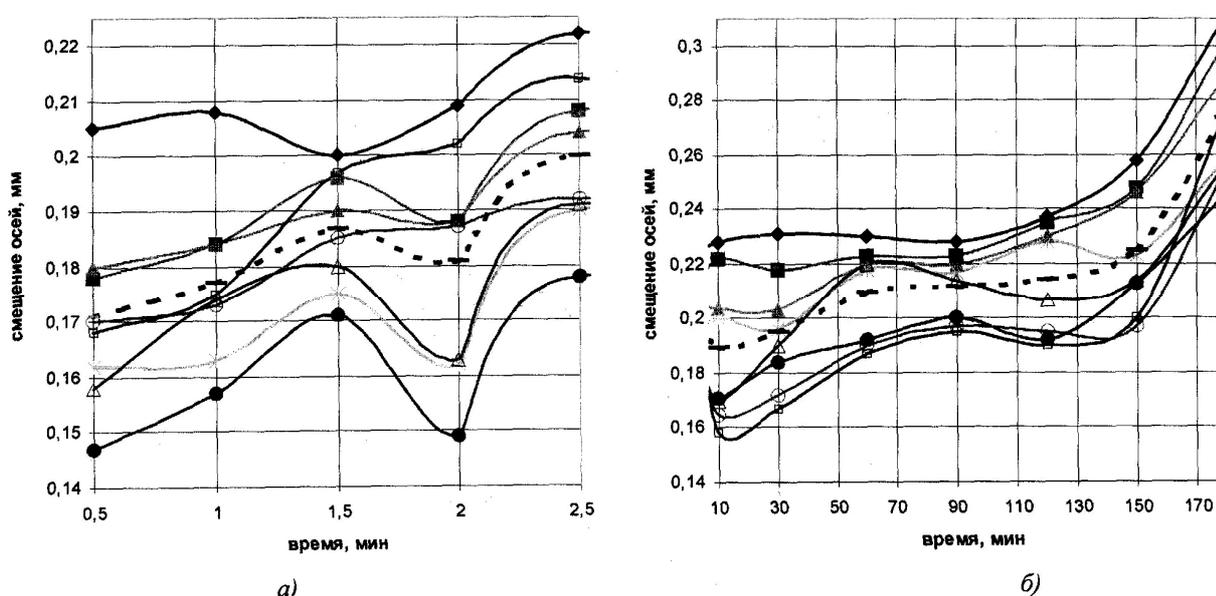


Рисунок 7 – Кинетическая «полоса» смещения осей: режим приработки (а), процесс рабочих измерений (б). Изменение среднего значения износа показано пунктиром. По существу, это среднее значение можно отождествить с интегральным износом, который измеряется традиционным методом.

что физико-механические свойства поверхностных слоев металла могут быть существенно неодинаковы (в пределах одного сечения). Следовательно, коль скоро сопротивление разрушению дискретных поверхностных участков образца различно, то и дискретный износ на таких участках должен быть разным. Кроме того, в условиях опыта обнаруживается, что контур изношенной поверхности не является кругом, а представляет собой сложную кривую второго порядка, смещенную в некотором направлении (возможно, это направление остаточного прогиба образца).

Еще одну особенность поверхностного разрушения при фрикционно-механической усталости можно видеть по данным на рисунке 5: если контур поверхности образца симметричен относительно его центра до испытаний, то "контур" износа, определяемый восемью точками, в которых измерен действительный (дискретный) износ, оказывается существенно несимметричным относительно того же центра (после испытаний). И степень этой асимметрии тем выше, чем больше

время испытаний (или чем больше величина интегрального износа). На развертке контуров (см. рисунок 6) отчетливо прослеживается тенденция к сужению профиля контура между 4-ой и 7-ой точкой, т.е. в определенной зоне поверхности образца.

На рисунке 7 представлены результаты измерений смещений осей при КМУ. Условия испытаний: образец - вал (сталь 45), контрообразец - ролик (сталь 25ХГТ), контактная нагрузка 200 Н, одновременно в систему были введены циклические напряжения на уровне предела выносливости, частота нагружения - 50 Гц.

Как результат повреждения поверхностей при КМУ, смещение осей обусловлено: износом образца и ролика: остаточной деформацией обоих элементов и вибрациями в системе. И, если можно математически вычленив вибрацию в виде главных амплитуд виброускорений, то остаточную деформацию в процессе испытаний выделить пока не удастся. Из рисунка 7 хорошо, например, видно, что полоса разброса значений смещения осей в период приработки (до 10 мин) значи-

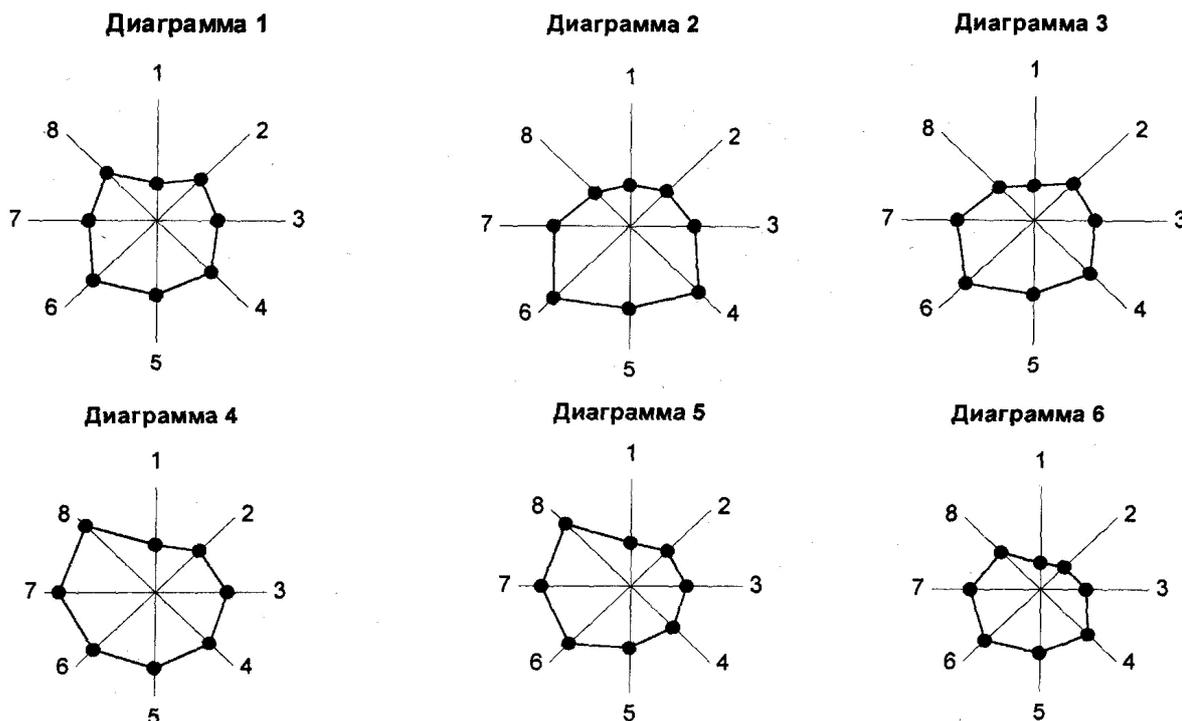


Рисунок 8 – Диаграммы смещения осей, зарегистрированные в различные моменты времени. 0.5 мин, 1.5 мин, 2.5 мин, 30 мин, 90 мин и 180 мин, соответственно, диаграмма 1, ... диаграмма 6. Цифры 1 ... 8 – нумерация точек на поверхности образца.

тельно шире полосы остального времени испытаний. Очевидны значительные пересечения линий. Это является прямым следствием больших амплитуд вибрации и существенных деформаций поверхностных слоев металла в этот период испытаний.

Характерная особенность - резкое увеличение амплитуды смещений в зоне наступления предельного состояния. Одно из несомненных достоинств этого метода возможность диагностировать наступление предельного состояния пары трения или силовой системы по параметру амплитуды смещений осей.

На рисунке 8 представлены диаграммы смещения осей, зарегистрированные в различные моменты времени испытаний, соответствующие сечениям кинетических полос на рисунке 7.

По характеру расположения точек на диаграммах можно заключить, что смещения осей резко нестационарны. Они определяются влиянием следующих (пока неразделенных) факторов, износом, остаточными деформациями и вибрациями. Заметна тенденция диаграмма теряет форму, становится нерегулярной.

Для количественного описания предложены коэффициенты асимметрии ( $R_\sigma$ ) и неравномерности ( $\eta$ ). Эти коэффициенты характеризуют нестационарность процесса смещений и рассчитываются по следующим формулам:

$$\bar{R}_\sigma = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{r_{min(i)}}{r_{max(i)}}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{r_{наим}}{r_{наиб}}, \quad (2)$$

где (1)  $r_{min, max}$  - меньший и больший радиус одного ( $i$ -того) диаметра сечения образца;

(2)  $r_{наим, наиб}$  - наименьший и наибольший радиус в сечении образца.

Таким образом, процесс изнашивания в общем случае представляется случайным процессом, его характер зависит от многих факторов и в достаточной мере не изучен. Каждая дискретная точка является его оригинальной реализацией, и материал может иметь существенно различные свойства в одной и той же точке при одних и тех режимах нагружения в разные моменты времени.

По нашему мнению, для того, чтобы дать правильную и полную интерпретацию отмеченных (и, вероятно, имеющих иных) особенностей износоусталостного повреждения системы сталь - сталь, необходимо спланировать и провести специальный комплекс экспериментальных исследований.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдеевский В. С., Броневец М.А., Буше Н.А. Трибология и триботехника/ Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1996. - № 4. - С. 3-13.
2. Браун Э.Д., Буяновский И.А. Тенденции развития методов трибологических испытаний (обобщающая статья)/ Заводская лаборатория. - 1997. - № 1. - С. 31-43.
3. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. М.: Машиностроение. - 1980. - С. 191.
4. Трибофатика Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования Стандарт Беларуси СТБ 1067-97) - Минск: Госстандарт. - 1997. - С. 10.
5. Сосновский Л.А., Еловой О.М., Марченко А.В. Некоторые особенности повреждения при фрикционно-механической усталости/ Заводская лаборатория. - 1998. - № 12. - С. 39-42.
6. Трибофатика 95. Ежегодник. Под общей ред. Л. А. Сосновского. Вып. 1: Машины серии СИ для износоусталостных испытаний. Под ред. М. С. Высоцкого/ Авт.: Ф. 10. Белиц, А. В. Богданович, М. В. Высоцкий и др. - Гомель, НПО "ТРИБОФАТИКА". - 1996. - С. 80.
7. Сосновский Л.А., Махутов Н.А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности Москва-Гомель: ФЦНТП ПП «Безопасность машин». НПО «ТРИБОФАТИКА». - 2000. - С. 304.