

ЛОКТЕВА Наталья Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ
В ПРОЦЕССЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛЫ ВРАЩАЮЩИМСЯ
ДИСКОМ**

Специальность: 01.02.06. – динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2002

Работа выполнена в Сибирском государственном индустриальном университете

Научный	–доктор технических наук, профессор
руководитель	Л.Т. Дворников
Официальные	доктор технических наук, профессор
оппоненты:	П.Я. Крауиньш
	доктор технических наук, профессор
	В.О. Каледин

Ведущая организация: ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат».

Защита состоится «17» апреля 02 г. в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.269.01 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск – 34, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТПУ.

Автореферат разослан «16» марта 2002 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета, д.т.н., проф.
С.В. Кирсанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обнаружение в науке ранее неизвестного нового физического эффекта всегда влечет за собой разработку целого ряда технологий, позволяющих использовать данный эффект в промышленности. Однако между открытием физического явления и его использованием проходит значительный период времени, потребный на изучение особенностей эффекта, возможностей его реализации в тех или иных условиях, определение области рационального его использования.

В 1990 году в Сибирском государственном индустриальном университете группой ученых было высказано предположение о существовании эффекта так называемого циркуляционного трения и получен подтверждающий экспериментальный материал. Этот эффект по мнению авторов открывает большие возможности в области трибометаллургических технологий. Для реального использования циркуляционного трения в практике возникает необходимость всестороннего изучения и экспериментального исследования процессов, определяющих эффект. Таким образом, выявление особенностей реализации процесса циркуляционного трения и на этой основе нахождение способов управления этим процессом является актуальной задачей, от решения которой зависит использование трибометаллургических технологий в технике.

Цель исследования. Целью данной работы является установление закономерностей влияния термодинамических и волновых факторов на синергетику процессов, происходящих в приповерхностном слое металла при воздействии на него быстро вращающимся диском в режиме циркуляционного трения, и оценка возможностей использования волновых процессов в зоне трения для организации трибометаллургических технологий.

Методы исследования. Общая методика исследования основана на современных экспериментальных, аналитических и численных методах, реализуемых на вычислительной технике. Для анализа развивающихся во времени познавательных процессов в трибомеханике применен исторический подход, для анализа волновых и механических процессов использованы различные методы физического и численного эксперимента, для оценки результатов взаимодействия поверхностей трения использовались металлографические методы.

Научная новизна работы. Новизна работы заключается в установлении факта влияния на возникновение в зоне взаимодействия двух поверхностей движения частиц материала по замкнутым траекториям наряду с термодинамическим механизмом самоорганизации этого процесса еще и волнового синергетического процесса. Показаны возможности использования волновых сигналов из зоны трения для управления трибометаллургическим процессом и взаимосвязь этих сигналов с динамическими процессами в самой трибометаллургической установке. Разработана динамическая модель поведения трибометаллургической установки, позволяющая выполнять амплитудно-частотный анализ спектра ее колебаний и на этой основе находить режимы циркуляционного механизма трения. Получен экспериментальным путем спектр колебаний системы агрегат – зона циркуляционного трения, выполнен его

амплитудно-частотный анализ, выделен участок спектра, соответствующий режиму реализации трибометаллургической технологии.

Практическая ценность работы. Практическое применение результатов исследования может позволить внедрить в производство новые трибо-металлургические технологии, и благодаря этому получить высоколегированные, аморфизированные и композиционные материалы с уникальными свойствами. Именно такие материалы по прогнозам металловедов будут составлять основу техники в XXI веке.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: Четвертой научно-практической конференции по секции машиностроения и горных машин (г. Новокузнецк, 1995 г.), Международной научно-технической конференции «Структурная перестройка металлургии: экономика, экология, управление, технология» (г. Новокузнецк, 1996 г.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы материаловедения в металлургии» (г. Новокузнецк, 1997 г.), Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути развития металлургии» (г. Новокузнецк, 1997 г.), Седьмой научно-практической конференции по проблемам машиностроения, металлургических и горных машин (г. Новокузнецк, 1998 г.), Десятой научно-практической конференции по проблемам машиностроения и горных машин (г. Новокузнецк, 2000 г.), Одиннадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения (г. Новокузнецк, 2001 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в одиннадцати научных статьях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 109 наименований и приложения. Общий объем работы - 169 страниц, 47 иллюстраций, 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе работы приводится выполненный в рамках исторического подхода обзор существующих теорий трения, начиная с Г. Амантона, И. Дезагюлье, Ш. Кулона, Дж. Лесли и кончая Б.И. Костецким, И. Минг-Фингом, П.А. Тиссоном, Г. Пурше, А.Н. Савельевым, И.В. Крагельским, Г. Польцером, Ф. Майсснером, В.Б. Дерягиным и многими другими исследователями. В этом обзоре показывается последовательность развития представлений о взаимодействии контактируемых поверхностей. Эта последовательность представлена в виде двух процессов: процесса выявления новых механизмов трения и процесса объединения вариантов механизмов в комплексные теории. Такое развитие взгляда на трение привело, прежде всего, к пониманию того, что этот процесс является весьма сложным, в котором реализуется почти весь спектр существующих механизмов взаимодействия двух поверхностей. Кроме того показано, что этот процесс является процессом самоорганизующегося типа и в каждом конкретном случае в нем доминирует один из существующих механизмов трения. В результате этого в зоне трения формируется слой особого материала называемого «третьим телом», свойства и размеры которого зависят от энергетического баланса зоны трения.

Из литературы следует, что с позиции самоорганизации механизма взаимодействия поверхностей пары трения все виды трения по энергетическому признаку делятся на две большие группы (рис.1): группу низкоэнергетического трения или износа в машинах и механизмах (зона II, рис.1) и группу высокоэнергетического трения или износа при обработке материалов (зона IV).

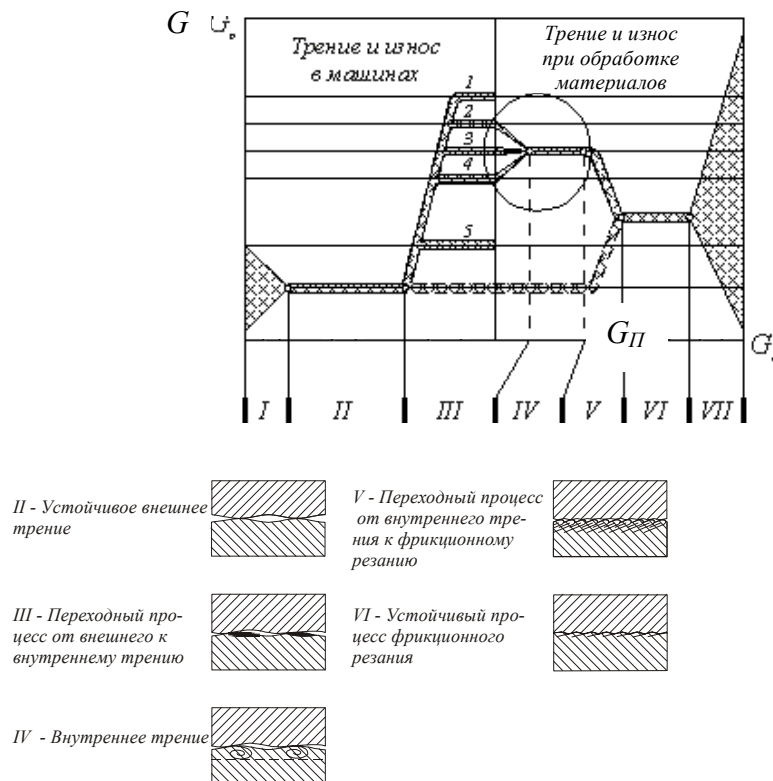


Рис. 1. Классификация микрокинетики трения в зависимости от энергетических условий взаимодействия поверхностей

Между зоной микрорезания (зона III) и зоной перехода к фрикционному резанию (зона V) в рамках энергетических координат расположена третья устойчивая зона - циркуляционное трение. Такой режим возникает в результате определенным образом организованного контакта материала с инструментом, рабочая поверхность которого движется со скоростью 80-100 м/с. Во время воздействия на материал происходит сильный, локализованный в зоне контакта разогрев и последующая его интенсивная объемная деформация по циркуляционным траекториям (рис.2). Интенсивная механическая деформация разрушает кристаллическую структуру материала, делая ее квазиаморфной (рис.3), а циркуляционные течения равномерно ее перемешивают, перенося поверхностные слои материала в подповерхностные и обратно. Одновременно

циркуляционные потоки могут переносить подаваемую в зону деформации лигатуру, распределяя её по всему деформированному слою и реализуя, таким образом, разнообразные трибометаллургические технологии.



Рис. 2. Характер деформации бронзы АЖ 9-4 при циркуляционном трении

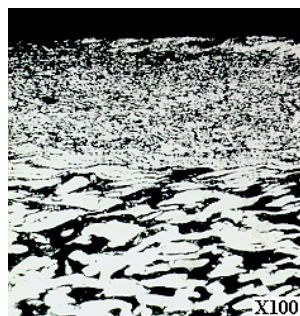


Рис. 3. Квазиаморфный слой, образовавшийся в процессе циркуляционного трения

В показанных на рис. 1 зонах I, II и III механизмы трения хорошо объясняются с позиции активационно-пассивационных процессов термодинамики открытых систем. Что же касается микрокинетики областей IV и V, то здесь возникают структурные объемные образования, механизм которых термодинамика объяснить не может. Отсюда возникает потребность искать пути объяснения возникновения механизма объемных структур.

В процессе преобразования подводимой в зону трения механической энергии, часть ее превращается в энергию колебательного процесса и отводится от зоны трения в виде спектра упругих волн колебаний. Данные колебательные процессы, с одной стороны, являются результатом колебаний собственно силы трения, связанным с ее формированием, закономерностями взаимодействия поверхностных слоев, разрушением тонких поверхностных пленок и т.д. Другой вид колебаний – это вибрации технической системы, включая и узел трения, вызванные силовым возбуждением процесса трения в механической системе привода машины. Этот вид колебаний определяется динамическими характеристиками всей технической системы в целом, включая и физико-механические процессы зоны трения. Как показывают литературные источники, механические релаксационные колебания, возникающие в зоне трения, являются одним из каналов отведения энергии пассивации из зоны трения, который в некоторых случаях может становиться значительным. Этот процесс по своим свойствам может определять степень структурирования «третьего тела» в зоне трения.

Таким образом, трение сопровождается динамическими процессами в зоне трения и в самом агрегате. Эти процессы взаимосвязаны, в некоторых случаях значительны по величине и участвуют в синергетических процессах зоны трения. Во второй главе показано, что процесс трения является сложной, состоящей из разнородных элементов, открытой, обменивающейся энергией и материалами с внешней средой системой. Известно, что сложные системы

самоорганизуются, и механизм их самоорганизации зависит от внешних условий. Б.И. Костецкий показал, что в трении реализуется процесс самоорганизации, механизм которого является термодинамическим. Общей закономерностью данного механизма является равенство энергии активации зоны трения- G_A энергии пассивации этой зоны - G_{II} . Каждая из этих энергий определяется следующими величинами:

$$A = Q + \Delta E_{\sigma} + \Delta E_{\tau} = G_A,$$

$$G_p + G_{III} = G_{II},$$

где: A – внешняя механическая энергия, Q – энергия внутренних тепловых процессов, G_p – энергия, рассеиваемая в виде теплоты и продуктов трения, G_{III} – поглощаемая энергия, – энергия пассивации, ΔE_{σ} - энергия структурной активации от нормальных напряжений, ΔE_{τ} - энергия структурной активации от касательных напряжений.

Различие в процессах трения (фазах трения), обусловлено разной природой и интенсивностью активирования и разными механизмами пассивации. В силу того, что в процессе активирования участвуют три составляющие энергии активации, существуют три стационарных механизма трения. В зонах I и II (рис.1) в структурном активировании принимает участие преимущественно энергия от касательных напряжений, что обуславливает реализацию механизма внешнего трения. При переходе к зоне III внешнее трение переходит во внутреннее и, наряду с термическим, и структурным активированием от касательных напряжений, начинает играть заметную роль структурное активирование от нормальных напряжений. В IV зоне избыточное тепловое активирование снижает прочностные характеристики поверхностного слоя на значительную для процесса трения глубину, обеспечивая тем самым качественный (фазовый) переход в механизме трения. Увеличение толщины достаточно легко деформируемого слоя дает возможность реализовывать вторую степень структурного активирования в глубь слоя трения, приводя к виду трения, называемому циркуляционным. В изменившихся условиях металл в зоне трения IV стабильно активизируется сразу тремя способами - тепловым и двумя деформационными, вдоль и вглубь зоны трения. Участок V является переходным к зоне VI преимущественного теплового активирования. В этой области поверхностный слой трения становится еще более подвижным. Появляется возможность выносить его из зоны трения сопряженной поверхностью, переходя от циркуляционного трения к резанию.

Однако чтобы объяснить процессы, происходящие при взаимодействии двух поверхностей, термодинамического процесса недостаточно. Так в начале зоны III наблюдается процесс разветвления механизмов трения - бифуркация, что происходит при одних и тех же энергетических условиях активации зоны контакта материалов. Наступление бифуркации свидетельствует о том, что существующий до этого механизм самоорганизации исчерпал себя и он недостаточен, чтобы организовать стабильный процесс трения. Согласно диаграмме зависимости микрокинетики процесса трения от

величины активации и пассивации зоны трения, уже после третьей бифуркационной области снова наступает устойчивая четвертая область, что свидетельствует о том, что вступает в действие новый организующий механизм.

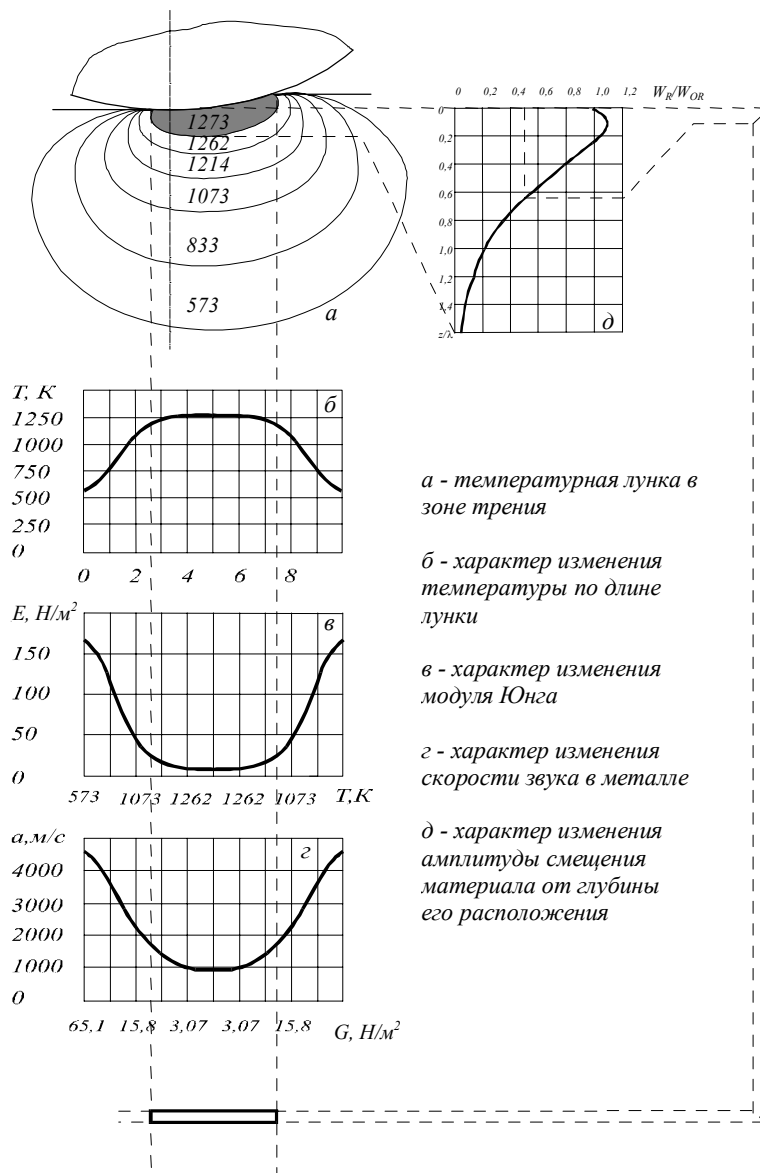


Рис. 4. Представление зоны циркуляционного трения в виде тонкого упругого волновода

Из литературы известно, что на сегодняшний день в физических процессах выделяются два синергетических механизма - термодинамический и волновой механизмы самоорганизации. Таким образом, после третьей, бифуркационной зоны трения наступает зона с действием сразу двух механизмов самоорганизации: термодинамического и волнового. Таким образом, четвертую зону трения можно отнести к области с одновременно действующими термодинамической и волновой синергетикой.

Для оценки ситуации внутреннего трения с термоволновых позиций рассмотрим процесс трения вращающегося с высокой скоростью диска о плоскую поверхность (рис.4). Энергия, подводимая в зону трения, определяет температурное поле, которое формируется согласно закономерностям теплораспределения от сосредоточенного источника энергии и построено на основании экспериментальных данных различных авторов. Из рис. 4,в видно, что модуль Юнга в зоне трения ниже модуля Юнга исходного материала более чем в 17 раз и что изменение этого показателя образует своеобразную зону упругости, совершенно отличную от исходного материала. Скорость упругих волн в этой зоне или лунке также будет отличаться от таковой в исходном материале (рис.4,г). На рис.4,д представлены зависимости амплитуд смещений $\hat{U}_R, \hat{W}_R$ по оси x и оси z в рэлеевской волне от глубины ее движения. Приведенная на рис.4 совокупность кривых иллюстрирует, что рэлеевская волна локализована в тонком поверхностном слое толщиной, соответствующей одной - двум длинам волны λ_R , и ограничивается по длине распространения шириной термолунки. Таким образом, слой, в котором распространяются рэлеевские волны, можно представить в виде стержня, и в дальнейшем все волновые процессы рассматривать, моделируя верхний слой термолунки упругим стержнем.

Размеры микронеровностей на обрабатываемой поверхности и на диске, которым обрабатывается материал, приблизительно одинаковы и равны в среднем 0,1-0,5 мм. Возьмем длину выступов равную 0,2 мм. Тогда выступ, наезжающий на неровность и съезжающий с нее, пройдет путь $S=0,0004$ м. Известно, что линейная скорость V вращающегося диска равна 100 м/с. Исходя из этих данных, возможно вычислить время взаимодействия двух неровностей:

$$t = \frac{0,0004}{100} = \frac{1}{250000} \text{ с.}$$

Тогда частота волны, возникающей в результате взаимодействия неровностей, будет равна

$$f = 250000 \text{ с}^{-1}.$$

Зная частоту колебаний материала и скорость рэлеевской волны в термолунке, определим длину волны:

$$\lambda = \frac{a}{f} = 3,6 \text{ мм.}$$

Расстояние между пучностями:

$$s = \frac{\lambda}{2} = 1,8 \text{ мм.}$$

Сравниваем полученное значение s с взятыми из литературы экспериментальными данными, полученными для бронзы АЖ 9-4 и показанными на рис. 5, где расположены узлы циркуляции в зоне трения.

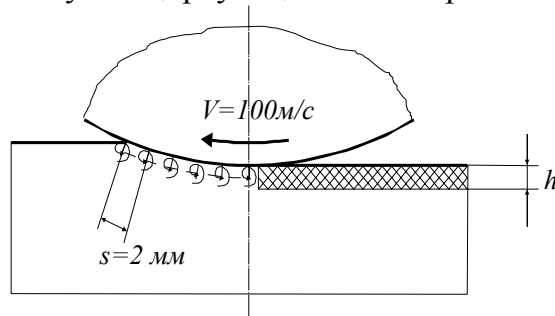


Рис.5. Экспериментально полученный характер расположения узлов циркуляции при циркуляционном трении инструмента из стали Ст3 по бронзе АЖ 9-4

Из экспериментов следует, что $s_{\text{эк}} = 2 \text{ мм}$. В нашем случае $s = 1,8 \text{ мм}$. Расхождение экспериментальных и расчетных результатов составляет

$$\frac{2 - 1,8}{2} = \frac{0,2}{2} = 0,1.$$

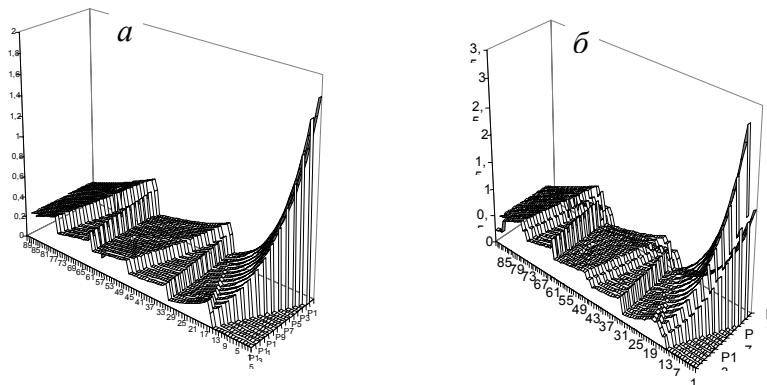


Рис. 6. Упругая волна, возникающая в стержне при: *а* - одинарном ударе выступа инструмента по выступу материала, *б* – при двойном ударе

Однако в данном расчете рассмотрен вариант движения волны только от одного волнового импульса. Для того, чтобы убедиться, что волновая картина в термолунке от многократных импульсов не изменяется, был проведен численный эксперимент. Результаты волновой картины от одного и от двух последовательных импульсов показаны на рис. 6. Таким образом, продемонстрировано, что многократное возбуждение волны упругих колебаний в стержне не размывает возникновения пучностей, которые впоследствии становятся очагами циркуляций.

Этот факт подтверждает организационную роль волновых процессов в режиме циркуляционного трения.

Возникновению циркуляции в пучностях волны способствует не только наличие выпуклостей внешней поверхности в этих местах, но и силовая, и деформационная картины в зоне пучности.

Оценим характер влияния деформационно-силового состояния в пучности рэлеевской волны на образование циркуляционных узлов в зоне трения.

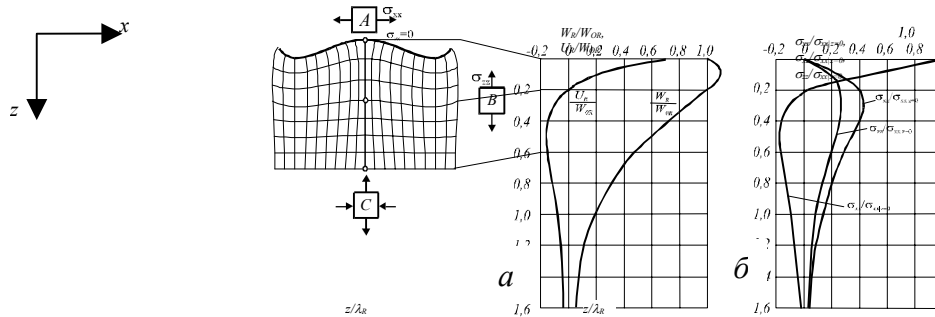


Рис.7. Картина смещений в рэлеевской волне: *а* – зависимость амплитуд смещений в рэлеевской волне от глубины, *б* – зависимость амплитуд напряжений в рэлеевской волне от глубины

На рис.7. изображена известная из литературы картина смещений в рэлеевской волне, точками обозначены частицы среды, которые в отсутствие волны расположены на равных расстояниях, а также представлены зависимости амплитуд смещений U_R, W_R по оси x и оси z и амплитуд напряжений $\sigma_{zz}, \sigma_{xx}, \sigma_{xz}$ в среднем сечении гребня рэлеевской волны от глубины ее проникновения в тело. Кривые даны в безразмерной форме: амплитуды смещений отнесены к амплитуде нормального смещения на поверхности W_{0R} , а амплитуды напряжений – к амплитуде $\sigma_{x|x} = 0$ на поверхности. Из графиков смещений видно, что на поверхности гребня волны присутствует смещение по направлению движения волны или по направлению движения инструмента. Это смещение в точке B становится равным нулю, а далее в глубь материала оно меняет знак на противоположный. Таким образом, в точке B образуется как бы центр вращения, вокруг которого поверхностные точки гребня волны движутся вдоль поверхности в направлении движения инструмента, а слои, лежащие ниже точки B – навстречу движения волны, т.е. частицы материала в зоне гребня волны движутся по циркуляционным траекториям. Аналогичным образом складывается и силовая ситуация. Из графика напряжений в сечении гребня волны видно, что напряжения по мере перемещения в глубь материала уменьшаются, в точке B меняет знак на противоположный и становится напряжением сжатия. Таким образом, напряженное состояние материала в гребне волны относительно точки B таково, что оно способствует его циркуляционному движению относительно этой точки.

Известно, что все без исключения процессы трения сопровождаются эмиссией волн напряжения. Волны такой природы, зародившиеся в зоне трения, несут самую непосредственную информацию о происходящих в этой зоне явлениях и могут быть использованы для их оценки. Из всего многообразия акустических волн, возникающих в результате локальной деформации материала, могут быть легко зафиксированы только поверхностные. В связи с этим речь в данном случае идет о поверхностных, рэлеевских волнах.

Как было ранее отмечено, зоне циркуляционного трения предшествует зона внутреннего трения. В этой зоне на одной из поверхностей металла начинают образовываться задиры, которые к моменту перехода от зоны внутреннего трения к зоне циркуляционного трения становятся достаточно крупными. Процесс формирования импульса может быть описан следующим образом (рис. 8). В случае, когда выступ поверхности инструмента еще не наехал на задиры, сформировавшийся на взаимодействующем с ним металле, напряжение на границе поверхности $\sigma = 0$. Как только выступ начинает взаимодействовать с задиром и вдавливать его ($|x| \leq a$), напряжение начинает возрастать по закону $\sigma_{zz|z} = e^{i\omega t}$. В последующий момент, когда выступ трущей поверхности резко соскакивает с задир ($|x| > a$) напряжение $\sigma_{zz|z} = 0$. Если подставить значения напряжений импульса упругой среды в волновые уравнения и проинтегрировать их, получим значения амплитуд W_0 и U_0 волны Рэлея.

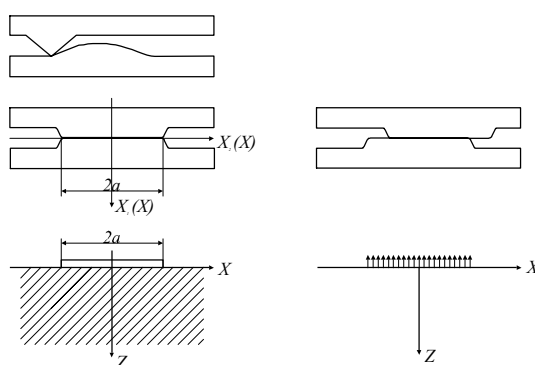


Рис. 8. Процесс упругого деформирования выступа в зоне внутреннего трения.

В случае фрикционного резания, т.е. для зоны, расположенной за зоной циркуляционного трения, формирование задир происходит иначе. Энергия, подводимая в зону трения, такова, что металл обрабатываемой поверхности становится мягким, и выступ выдавливает его перед собой (рис.9).

Резко выдавленный металл бьет по холодному и соответственно упругому металлу, расположенному перед зоной контакта пары трения и создает волну. При этом напряжения на границе обрабатываемого металла: $\sigma_{xz|x} = \sigma(t)e^{-i\alpha x}$, если $|x| < a$; $\sigma_{xz|x} = 0$, если $|x| > a$.

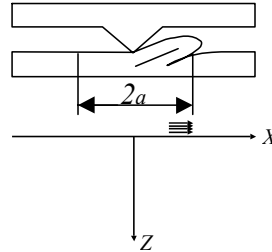


Рис.9. Процесс пластического деформирования выступа в зоне фрикционного резания.

При сравнении формул, описывающих значение амплитуд волн колебаний рассмотренных зон трения, а именно зон, расположенных по обе стороны от зоны циркуляционного трения, видно, что характер (знак) амплитуд с изменением механизма трения меняется (рис.10). При внутреннем трении фаза волны, выходящая из-под выступа, отрицательная, а при фрикционном резании - положительная. Соответственно, при переходе от зоны внутреннего трения к зоне фрикционного резания фаза амплитуды меняет свой знак и, следовательно, существует момент, когда амплитуда близка к нулю. Этот участок и приходится на зону циркуляционного трения.

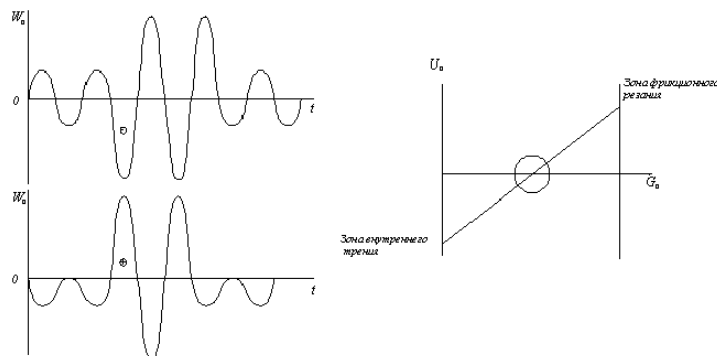


Рис.10. Изменение амплитуды волн Рэлея при переходе через зону циркуляционного трения

Уменьшение амплитуды упругой волны при переходе через зону циркуляционного трения указывает на наступление деформации элементов взаимодействующих при трении поверхностей, где металл начинает двигаться по замкнутым траекториям. Наличие такого спада волновой активности дает

основание использовать этот факт для настройки технологического режима трибометаллургического процесса.

В третьей главе оцениваются динамические процессы, возникающие в установке циркуляционного трения. Установка состоит из двух механизмов – механизма вращения инструмента (диска) и механизма подачи рабочего стола.

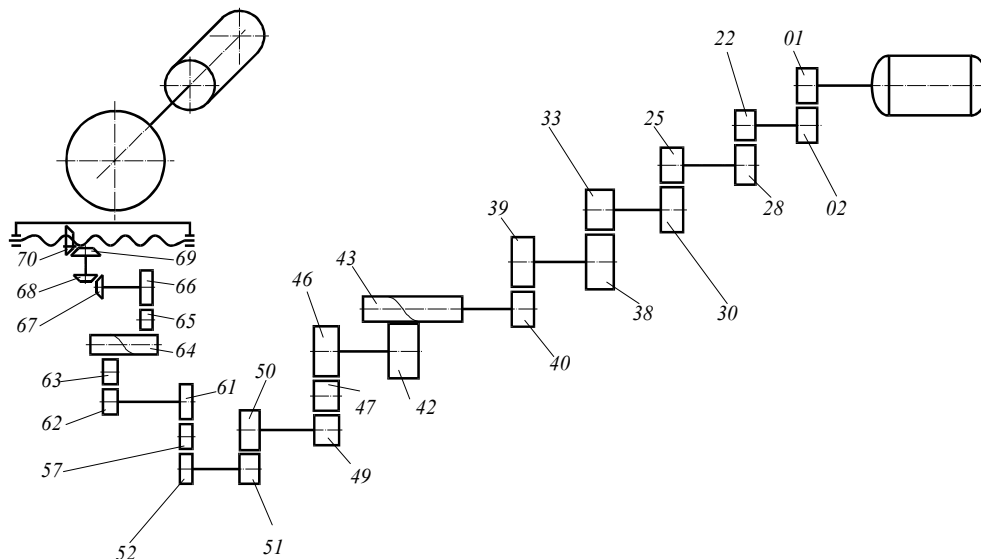


Рис. 11. Кинематическая схема установки циркуляционного трения: 01 – 70 шестерни

Вычисление моментов инерции и жесткостей элементов привода машин оформлено в одну из программ пакета программ «FISHKA». Программа представляет группу частей, их количество соответствует набору элементов, на которые может быть разбита конструкция машины. В каждой части вычисляются моменты инерции J и податливости e одного конкретного элемента. Для подготовки исходных данных подбирается набор чертежей агрегата, позволяющий получить все необходимые для расчета размеры. В данном расчете механизм привода рабочего стола разбит на 151 элементарную геометрическую составляющую, а привод инструмента разбит на три составляющие. Результатом выполнения подпрограммы явился массив моментов инерций и массив податливостей всех выделенных элементов.

Для оценки колебательных процессов, протекающих в механических системах, необходимо сформировать его динамическую модель. Наиболее распространенный способ структурной оценки модели сводится к сравнению частотно-амплитудных характеристик модели и объекта. В процессе сравнения перебираются разные структурные варианты модели, определяются их частотно-амплитудные характеристики и определяется степень их совпадаемости с реальным объектом. В качестве

идентификатора в данном случае берется первая собственная частота колебаний. Для определения частотно-амплитудных характеристик динамической модели используется

метод Хольцера. Начинается процесс формирования модели с составления первого, самого большого по количеству масс варианта. После получения первой пробной структуры определяется серия частот и относительных амплитуд, находится параметр идентификации и сравнивается с эталоном. Если отклонение меньше допускаемой ошибки, все повторяется, т.е. формируется второй вариант с меньшим количеством масс, третий, и так до тех пор, пока не будет получен результат с минимальным количеством масс, но с ошибкой по первой собственной частоте, не превышающей допускаемой величины.

Исходными данными для программы формирования динамической модели являются массивы моментов инерции J и массив податливостей E . Работа программы начинается с того, что из массива моментов инерции выделяются максимальный и минимальный элементы J_{max} и J_{min} . Диапазон разброса значений моментов инерции $J_{max} - J_{min}$ разбивается на k равных частей. Величина k выбирается пользователем программы исходя из желаемой точности, и определяет количество перебираемых в расчете вариантов модели. Затем определяется шаг каждого k -того участка

$$h = \frac{J_{max} - J_{min}}{k}.$$

После чего от всего поля изменения моментов инерции $J_{max} - J_{min}$ отсекается часть h . В результате этого получается поле, вне которого формируется первый вариант динамической модели. Для этого вновь перебирается весь массив и запоминаются порядковые номера тех элементов, которые попали выше текущей линии. Номера всех моментов, значение которых выше отсекаемой величины, выводятся на печать и являются центрами концентрации масс при формировании первого варианта модели. На месте каждого звена, выбранного в качестве концентратора масс, создается новая масса. Эта масса складывается из половины суммарной массы звеньев, расположенных до звена концентратора $1/2 S_i$, половины массы звеньев, расположенных после звена, в котором концентрируются эти массы $1/2 S_{i+1}$, и массы самого звена концентратора. Полученные таким образом значения масс инерции (моментов инерции) модели и податливостей связей между массами используются для нахождения частотно-амплитудных характеристик модели методом Хольцера, а затем выполняется их сравнение с допускаемой величиной.

В результате вышеописанных операций была получена динамическая модель, состоящая из 16 масс и имеющая следующие собственные частоты: $W(1) = 0,315$ Гц; $W(2) = 1,540$ Гц; $W(3) = 2,114$ Гц; $W(4) = 3,174$ Гц; $W(5) = 3,882$ Гц.

На основе динамической модели была сформирована математическая модель установки циркуляционного трения.

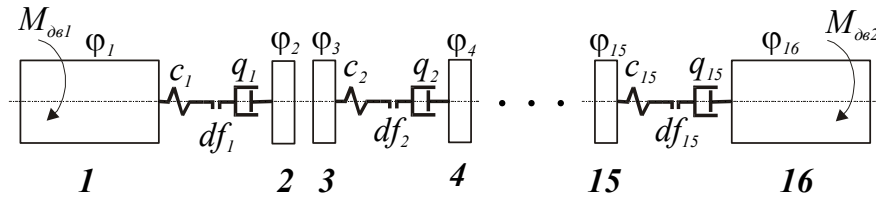


Рис. 12. Динамическая модель установки циркуляционного трения

Эта модель представляет собой минимально-допустимый набор сосредоточенных масс, связанных упругими связями (рис. 12), поведение которых описано системой следующих дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_1}{dt} &= \dot{\phi}_1; & \frac{d\dot{\phi}_1}{dt} &= \frac{M_1}{J_1}; \\ \frac{d\phi_2}{dt} &= \dot{\phi}_2; & \frac{d\dot{\phi}_2}{dt} &= \frac{M_2}{J_2}; \\ &\dots & &\dots \\ \frac{d\phi_n}{dt} &= \dot{\phi}_n; & \frac{d\dot{\phi}_n}{dt} &= \frac{M_n}{J_n}. \end{aligned}$$

где $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$ - угол поворота, угловая скорость и ускорение i -ой массы системы; M_i - суммарный момент внешних и внутренних сил, действующих на i -тую массу; J_i - момент инерции i -ой массы.

В суммарный момент внешних и внутренних сил входят момент в упругих связях, соединяющих массы системы, моменты двигателей и момент технологической нагрузки. В данной модели массы соединены между собой упругими связями с зазорами и демпферами. Реакция связи между массами модели определяется по формуле

$$M_{ij} = g(\phi_j - \phi_i) + m_{ij},$$

где:

$$m_{ij} = \begin{cases} c_{ij}(\phi_j - \phi_i + \Delta_{ij}) & \text{при } (\phi_j - \phi_i) < -\Delta_{ij} \\ 0 & \text{при } -\Delta_{ij} < (\phi_j - \phi_i) < 0 \\ c_{ij}(\phi_j - \phi_i) & \text{при } (\phi_j - \phi_i) > 0 \end{cases}$$

g - коэффициент эквивалентного вязкого демпфирования в упругих связях; $\phi_i, \dot{\phi}_i$ - перемещение и скорость поворота i -ой массы системы; c_{ij} - жесткость упругой связи; Δ_{ij} - зазор в упругой связи.

Моменты двигателей в данной модели вычисляются по следующей формуле:

$$M_{\mathcal{D}} = 2M_k / \left(\frac{S_1}{S} + \frac{S}{S_1} \right),$$

где: $M_k = M_n \cdot k$ – момент критический; M_n – момент номинальный; k – коэффициент перегрузки; S_l – критическое скольжение статора; S – скольжение поля статора, находится из выражения

$$S = \frac{\dot{\phi}_{ст} - \dot{\phi}_я}{\dot{\phi}_{ст}},$$

где $\dot{\phi}_{ст}$ – скорость вращения поля статора, $\dot{\phi}_я$ – скорость вращения якоря двигателя.

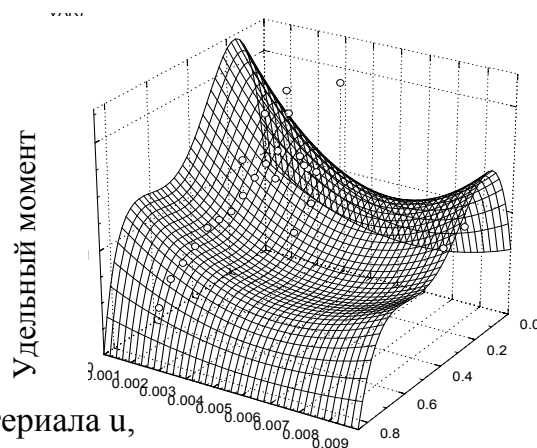
Технологический момент определялся как

$$M_T = m_T \cdot l \cdot B,$$

где: l – длина зоны трения; B – ширина зоны трения; m_T – удельный момент трения.

Исходным эмпирическим материалом, на основе которого получен удельный технологический момент, являются взаимосвязь удельной мощности трения и скорости подачи материала в зону трения и зависимость удельной мощности трения от величины заглабления инструмента. Эти данные преобразованы в зависимость удельного момента трения от параметров скорости и заглабления, описываемые формулой $m_T = (65903 \cdot u^2 - 722.04 \cdot u + 3.7692) \cdot (-69.746 \cdot t^4 + 124.23 \cdot t^3 - 73.923 \cdot t^2 + 15.107 \cdot t + 0.6884) / 2.8$

Для численного исследования динамики движения полосы и инструмента была использована вышеописанная программа, моделирующая процессы в элементах установки циркуляционного трения.



Скорость подачи материала u ,
рад/с

Рис. 13. Теоретически определенный характер изменения удельного момента трения

Для решения уравнений расчетной модели разработан пакет программ расчета силовых и кинематических параметров процесса циркуляционного трения, основой которого является стандартная программа численного интегрирования

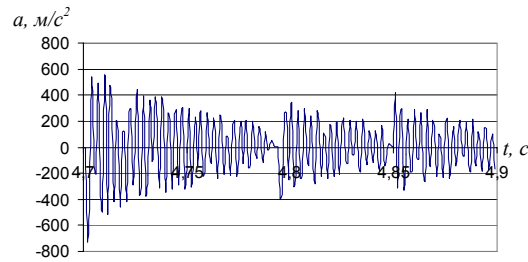
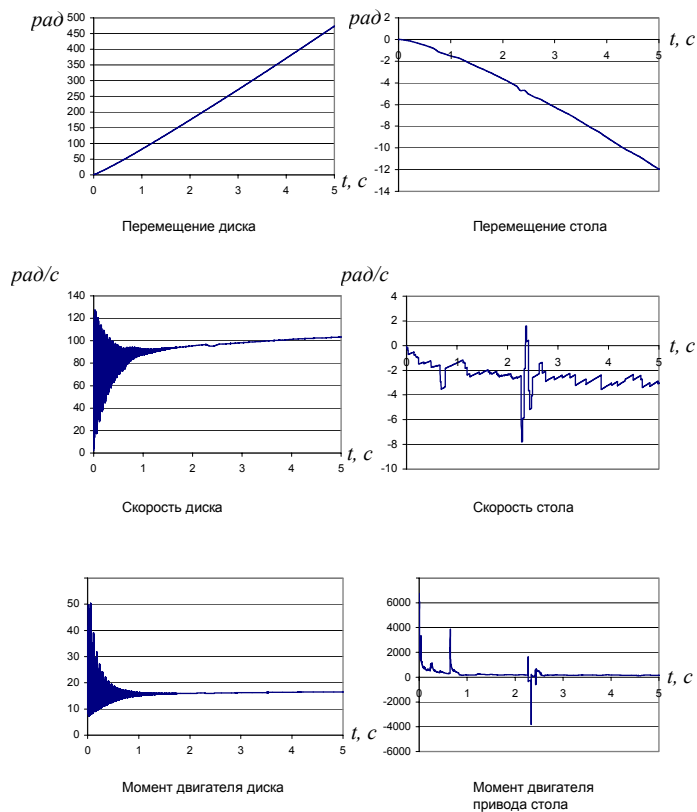


Рис. 14. Фрагмент колебательного процесса в образце в установившейся его части



дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутта

В основную программу входят также подпрограмма по определению силовых условий поведения технологической системы; подпрограмма моментов в связях между массами системы; подпрограмма моментов двигателей; подпрограмма технологических моментов и т.д. Используя пакет программ, согласно матрице проведения численного эксперимента, выполнен ряд расчетов, в результате чего получен набор характеристик динамических процессов движения обрабатываемого материала и инструмента. Пример скоростных и силовых характеристик исследуемого процесса приведен на рис. 14. и 15.

При оценке динамических процессов по максимальному ускорению получены зависимости динамики от скорости движения материала и для различной величины заглабления инструмента рис. 16.

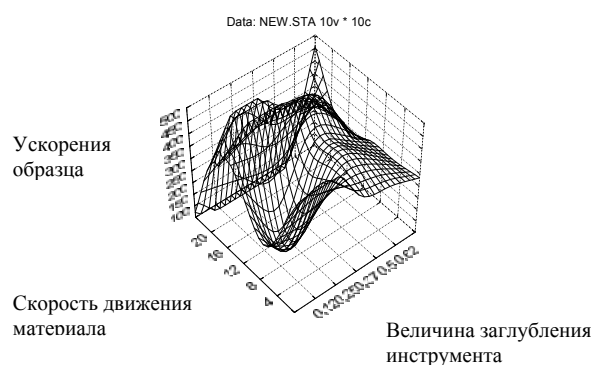


Рис. 16. Зависимость максимальных амплитуд колебания ускорения от заглабления инструмента и от скорости подачи материала

Из кривых изменения динамики движения материала видно, что есть благоприятные с точки зрения минимального характера колебательного процесса участки скоростей, что позволяет принимать обоснованное решение при проектировании трибометаллургических агрегатов на основе эффекта циркуляционного трения.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию энергетических и динамических процессов в трибометаллургической установке. Лабораторная установка изготовлена на базе горизонтального фрезерного станка модели 6Н81Г. Со станины станка снят хобот и вместо него в пазах, типа «ласточкин хвост», установлена плита с закрепленным на ней электродвигателем мощностью 9,5 кВт, развивающим при технологической загрузке скорость 2650 об/мин. На вал электродвигателя насажен диск из стали Ст.3 диаметром 690 мм. Диаметр диска выбран из расчета обеспечения его окружной скорости вращения в пределах 95-98 м/с. Толщина диска составляет 20 мм. Диск сбалансирован совместно с валом электродвигателя и шлифован после установки его на место с целью устранения возможного радиального биения.

В исследованиях применялись прямоугольные образцы из бронзы АЖ 9-4 толщиной 30 мм, шириной 100 мм и длиной 250 мм.

Инструмент к моменту взаимодействия с обрабатываемым материалом смазывали технологической смазкой ТАД – 17 с добавлением MoS_2 .

В процессе эксперимента фиксировались частота колебаний, возникающих в образце, и изменение мощности двигателя. Замеры частоты колебаний производились с помощью установленного (ввинченного на торце образца) акселерометра, сигнал с которого далее подавался на усилитель, а затем на компьютер через аналого-цифровую плату UBA-ADC/2. Для измерения мощности двигателя на одну из его фаз был установлен ваттметр.

Далее проведены две серии опытов, первая из которых была проведена с целью установления зависимости между заглублением инструмента, скоростью перемещения инструмента по образцу и мощностью двигателя диска. При этом фиксировалась мощность энергии, вводимой инструментом в зону трения, в виде мощности двигателя диска.

Во второй серии опытов образцы устанавливались под небольшим углом, обеспечивающим изменение заглубления диска по мере прохождения его по образцу. В результате на длине прохода, равного 225 мм, заглубление диска менялось от 0 мм до 0,895 мм. Во второй серии экспериментов скорость стола была выбрана на основании результатов первой серии опытов и соответствовала 3,83 мм/с. Фиксировалась также мощность двигателя инструмента и часть энергии пассивации в виде упругих колебаний, распространяющихся по образцу от зоны трения.

На основании результатов первой серии экспериментов построена зависимость величины технологического момента от заглубления и скорости подачи материала. В процессе обработки результатов эксперимента находилась амплитудно-частотная характеристика колебательного процесса и анализировались гармоники, имеющие наибольшие амплитуды. Для нахождения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) использовалась программа Conan-t 3.1.

При построении АЧХ запись колебательного процесса разбивалась на временные участки по 0,51 с. Каждый из участков обрабатывался отдельно, в результате чего получались АЧХ для различных величин заглубления инструмента в образец. Пример результатов приведен на рис.17.

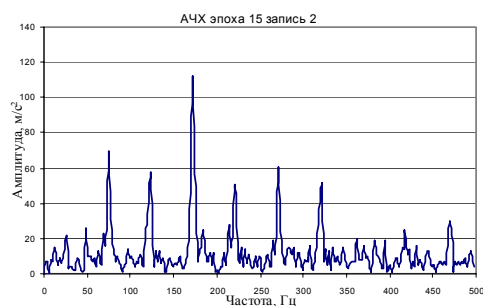


Рис. 17. Пример амплитудно-частотной характеристики для одного из режимов заглубления инструмента при скорости его подачи 3,83 мм/с

Далее при оценке АЧХ выделены однотипные участки с пиковыми значениями амплитуд, зафиксированы частоты, соответствующие этим пикам, и для этих частот построены характеристики изменения амплитуд колебаний в зависимости от величины заглубления инструмента в материал.

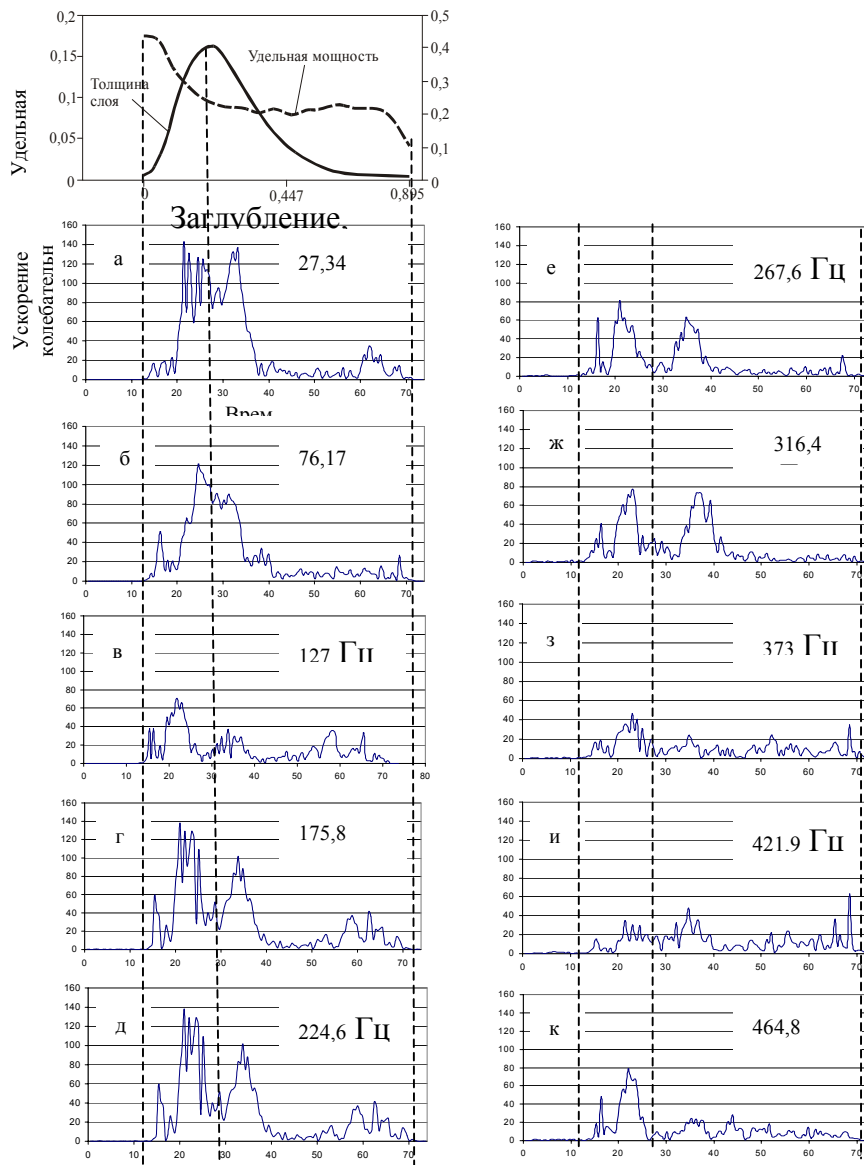


Рис. 18. Амплитудно-частотный анализ колебательного процесса в образце при его обработке инструментом

Анализируемый частотный диапазон ограничен 500 Гц. Полученные в этом диапазоне зависимости амплитуды колебаний от величины заглабления инструмента приведены на рис. 18.

Из амплитудных характеристик видно, что по мере увеличения заглабления амплитуда резко возрастает и на участке, соответствующем циркуляционному виду трения, остается максимальной. При этом кривая изменения амплитуды колебаний имеет седлообразную форму и в зоне трения, обеспечивающего максимальную объемную проработку приповерхностного слоя обрабатываемого материала, амплитуда колебаний совпадает с минимумом седловины. При выходе за зону циркуляционного трения амплитуда колебаний значительно снижается. Максимум амплитуд в рассматриваемом диапазоне частот по мере увеличения частоты также уменьшается.

Таким образом, процесс перехода трения через зону циркуляционного трения отображается в виде уменьшения колебательного процесса с последующим его увеличением и однозначно фиксирует этот момент.

Для оценки адекватности результатов моделирования динамических процессов в установке во время реализации процесса воздействия инструмента на металл используется корреляционный анализ. Анализируется корреляция между данными, полученными на модели и в физическом эксперименте.

Сравнение производится по средним значениям на основании t-статистики и по дисперсия на основании F-статистики.



Рис. 19. Примеры ускорений обрабатываемого образца

Двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями

	Переменная 1	Переменная 2
Среднее	-85,927	3,297
Дисперсия	61476,720	58733,015
Наблюдения	144	144
Гипотетическая разность средних	0	
df	286	
t-статистика	-3,088	
P(T<=t) одностороннее	0,001	
t критическое одностороннее	1,650	
P(T<=t) двухстороннее	0,002	
t критическое двухстороннее	1,968	

Характер колебательного процесса, полученный в численном эксперименте, адекватен характеру колебательного процесса в образце при циркуляционном трении.

Итак, в результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований разработан метод поиска режимов осуществления трибометаллургических технологий, который реализуется путем решения взаимосвязанного набора частных задач: построения динамической модели технологического агрегата; построения математической модели динамической системы; нахождения режимов реализации трибометаллургических технологий.

Основные итоги и выводы

1. Оценка литературных источников показала, что трение как сложный процесс характеризуется различными механизмами трения; одновременно, процесс трения – это самоорганизующийся процесс, в зоне взаимодействия пары трения которого формируется особый слой материала, называемый «третьим телом»; при реализации циркуляционного механизма трения «третье тело» образуется путем циркуляции значительного слоя материала, достигающего толщины 2-3 мм; при реализации трибометаллургических технологий в этот слой может вводиться лигатура, в нем могут реализовываться различные термохимические реакции, что может приводить к созданию новых материалов с уникальными свойствами.
2. В результате анализа характера самоорганизации процесса циркуляционного трения установлено, что наряду с термодинамическим механизмом самоорганизации этого процесса действует еще и волновой синергетический процесс.
3. В основе механизма волновой самоорганизации в зоне циркуляционного трения лежит процесс формирования термодинамической лунки и организации в ее границах рэлеевской стоячей упругой волны; в пучностях этой волны при взаимодействии с инструментом и образуются очаги циркуляции материала.
4. Волновой процесс в зоне трения однозначно отражает особенности реализации механизма циркуляционного трения и может быть использован для настройки режимов взаимодействия материалов в паре трения.

5. Волновой процесс в зоне трения является частью динамической системы технологического агрегата и взаимосвязан с динамическим процессом в самом агрегате.
6. Режимы реализации трибометаллургической технологии на конкретном технологическом агрегате определяются на основе динамических характеристик этого агрегата.
7. Разработанный инструментарий, путем автоматизации метода поиска на ЭВМ, позволяет находить рациональные режимы реализации трибометаллургических технологий. Таким образом, на основании теоретических и экспериментальных разработок и научных обобщений, выполненных в работе, решена задача, имеющая существенное значение для использования и развития трибометаллургических технологий в производстве.

Настоящее исследование выполнялось с 1995 г. Автор исследования Локтева Н.А. до 1998 г. носила фамилию Савельева Н.А.

Основные публикации по диссертационной работе

1. Дворников Л.Т., Локтева Н.А. “Механизмы взаимодействия контактируемых поверхностей энергетически различных процессов трения”, Из-во СибГИУ, г. Новокузнецк, 64 с.
2. Савельев А.Н., Савельева Н.А. Конвергенционный процесс развития методов формирования поверхностей трения. Материалы четвертой научно-практической конференции по секции машиностроения и горных машин. г. Новокузнецк, 1995 г.
3. Савельев А.Н., Савельева Н.А. Трибометаллургическая технология на основе эффекта циркуляционного трения. Международная научно-техническая конференция «Структурная перестройка металлургии: экономика, экология, управление, технология». Тезисы докладов. г. Новокузнецк, 1996 г. с. 258, 259.
4. Савельева Н.А. Использование акустических сигналов для организации трибометаллургической технологии. Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы материаловедения в металлургии» Тезисы докладов. г. Новокузнецк, 1997 г.
5. Савельева Н.А. Теоретические предпосылки использования волн эмиссии для оценки режимов в зоне циркуляционного трения. Современные проблемы и пути развития металлургии. Тезисы докладов международной научно-практической конференции. 16-19 сентября 1997 г. г. Новокузнецк. с. 135.
6. Савельев А.Н., Савельева Н.А. Основы технологических процессов получения аморфизированных лент на основе эффекта циркуляционного трения. Материалы седьмой научно-практической конференции по проблемам машиностроения, металлургических и горных машин. г. Новокузнецк, 1998 г. с. 95 - 99.

7. Савельев А.Н., Савельева Н.А., Пономарев А.Н. Оценка области использования эффекта циркуляционного трения в промышленности. Материалы седьмой научно-практической конференции по проблемам машиностроения, металлургических и горных машин. г. Новокузнецк, 1998 г. с. 106 - 109.
8. Савельев А.Н., Осколкова Т.Н., Савельева Н.А. Оценка фазового состава и характера изменения параметров решетки фаз аморфизированного слоя бронзы АЖ 9-4. Материалы десятой научно-практической конференции по проблемам машиностроения и горных машин. Новокузнецк, 2000.
9. Савельев А.Н., Локтева Н.А., Бич Т.А. Одни из подходов к формированию модели динамической системы. Материалы десятой научно-практической конференции по проблемам машиностроения и горных машин. Новокузнецк, 2000.с. 150 – 158.
10. Савельев А.Н., Локтева Н.А., Бич Т.А. Математическая модель процессов в установке циркуляционного трения. Материалы одиннадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. Новокузнецк, 2001 г. с. 159 – 163.
11. Н.А. Локтева Оценка возможности использования волн Рэлея для настраивания оборудования при реализации трибометаллургических технологий.// Изв. вуз. Черная металлургия. 2002. №4