Вестник научно-технического развития
Bulletin of Science and Technical Development

Номер 170, 2023г.

DOI: 10.18411/vntr2023-170



Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

DOI: 10.18411/vntr2023-170

ОГЛАВЛЕНИЕ № 170, 2023

Александр Константинович Алешин, Наталья Львовна Ковалева, Исак Наумович Статников, Георгий Игоревич Фирсов. Анализ и определение диагностических признаков дефектных состояний узлов механизмов циклического действия…….**стр. 3 - 21**

Лидия Ивановна Куксенова, Владислав Ильич Савенко. Влияние смазочной среды и ее поверхностно-активных компонентов на формирование структурного состояния зоны деформации и кинетику разрушения при трении металлических трибосопряжений……..**стр. 22 – 41**

Николай Алексеевич Серков, Олег Викторович Пась. Исследование процессов коррекции отклонения траектории движения исполнительного органа многокоординатной машины с ЧПУ при наличии кинематического зазора в среде Matlab – Simulink…..……...**стр. 42 - 50**

Дмитрий Зиновьевич Ямпольский. Образцовые удары. Закономерности. Погрешности. Примеры……..……..…**стр. 51 – 67**

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.



ISSN 2070-6847

DOI: 10.18411/vntr2023-170-1

УДК 621.9.067

АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДЕФЕКТНЫХ СОСТОЯНИЙ УЗЛОВ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Александр Константинович Алешин, Наталья Львовна Ковалева, Исак Наумович Статников, Георгий Игоревич Фирсов
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
aleshin_ak@mail.ru, firsovgi@mail.ru

Аннотация. *Рассматривается процедура диагностического исследования узлов механизмов циклического действия. Рассматриваются проблемы, возникающие при выборе комплекса диагностических признаков, соответствующих неправильной наладке узлов, наличию износа деталей, результатам некачественной сборки и разрегулировки механизмов. Приведены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований информативности и чувствительности диагностических признаков на примере исследования поворотных столов с червячным редуктором.*
Ключевые слова*: механизм циклического действия, дефект, дефектное состояние, наладка, разрегулировка, червячный редуктор, диагностический признак, информативность, чувствительность.*

ANALYSIS AND DETERMINATION OF DIAGNOSTIC SIGNS OF DEFECTIVE STATES OF NODES OF CYCLIC ACTION MECHANISMS

A.K. Aleshin, N.L. Kovaleva, I.N. Statnikov, G.I. Firsov
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
aleshin_ak@mail.ru, firsovgi@mail.ru

Abstract. *The procedure of diagnostic examination of nodes of cyclic action mechanisms is considered. The problems arising when choosing a set of diagnostic signs corresponding to incorrect adjustment of components, the presence of wear of parts, the results of poor-quality assembly and misalignment of mechanisms are considered. The results of mathematical modeling and experimental studies of the informativeness and sensitivity of diagnostic signs are presented on the example of a study of rotary tables with a worm gear.*
Key words: *cyclic action mechanism, defect, defective state, adjustment, misalignment, gear-lever mechanism, diagnostic feature, informativeness, sensitivity.*

Требования регламентированных технических условий на механизм предписывают контролировать ряд его кинематических и силовых параметров. Так для переналаживаемого

механизма шпиндельного узла предусмотрен контроль семи функциональных параметров []. Для переналаживаемого поворотного стола требования технических условий предписывают контролировать угловые скорость ω(t) и ускорение ε(t) планшайбы, давления p_1 и p_2 в полостях гидромотора, координату ψ углового положения планшайбы. Это тот комплекс параметров, который позволяет оценить текущее техническое состояние механизма, и определить соответствие его функциональных характеристик требованиям технологического процесса, на выполнение которого настраивается механизм [1].

Но процесс диагностирования предполагает дополнительно к этому распознавать и упреждать на ранних стадиях процесс развития скрытых дефектов [2,3]. Как правило, комплекса параметров, указанного в технических требованиях, недостаточно для выявления скрытых дефектов. Требуется дополнительная информация. Её необходимо получить, измеряя дополнительно другие физические процессы, сопровождающие работу механизма. Поскольку измерение ряда параметров уже предписано требованиями технических условий, их целесообразно использовать также для решения задач диагностирования. Например, анализ дефектов поворотных столов [4] показал, что величины ускорений, скоростей, давлений в различных точках гидросистемы непосредственно связаны с дефектами отдельных механизмов и гидроаппаратов. Поэтому их целесообразно использовать в качестве диагностических параметров для локализации дефектов.

Современное перенастраиваемое технологическое оборудование и станки с ЧПУ оснащены развитой встроенной системой диагностики [5,6], возможности которой необходимо максимально использовать для распознавания дефектов механизмов. Её возможности могут быть расширены путём интегрирования в её структуру средств измерения дополнительных физических процессов.

Основным требованием к диагностическому признаку является его высокая чувствительность к отклонениям от нормативной величины одного структурного параметра механизма и минимальная, к отклонениям остальных.

Выбор диагностических признаков основан на построении и анализе блок-схемы структурно-следственных связей элементов и деталей механизма и оценке чувствительности диагностических признаков к дефектам [7-18]. Блок – схема строится как многоуровневая таблица. Элементы каждого уровня выполняют одну общую функцию.

Алгоритм построения блок – схемы состоит в следующем. Механизм разделяется на отдельные детали и их соединения в узлы. Из этого комплекса деталей выбираются такие, дефекты которых образуют дефекты всего механизма. Эта совокупность деталей образует первый уровень.

Второй уровень блок – схемы составляют конкретные геометрические размеры или физико-механические свойства деталей, отклонения которых от нормативных значений образуют дефект. Это структурные параметры механизма, подверженные деградации и подлежащие контролю. Отклонения других размеров детали, которые не влияют на образование дефекта, игнорируются.

Третий уровень - это количественное (численное) выражение отклонений указанных структурных параметров от своих нормативных значений.

Четвёртый уровень содержит информацию о том, как отклонения структурных параметров влияют на изменения экспериментально измеряемых кинематических и силовых параметров. Это комплекс диагностических признаков.

Пятый уровень составляют измеряемые физические процессы– диагностические сигналы, по которым определяются диагностические признаки и принимается решение о постановке диагноза.

Например, дефект, состоящий в недопустимо большом перемещении поршней гидроцилиндров зажима планшайбы проявляется в том, что при подаче команды на поворот планшайбы происходит задержка ее вращения на величину, большую 0,4 с. Время задержки может контролироваться по осциллограмме скорости ω(t) и ускорения ε(t) планшайбы. На рис. 1 приведены типичные осциллограммы указанных параметров с указанием интервала времени задержки a-c', Δt = 0.9 с. Он определяется как интервал между характерным всплеском на осциллограмме ε (точка «а») и моментом начала движения планшайбы (точка «с»). Всплеск на осциллограмме ε связан с импульсным воздействием на планшайбу механизма зажима.

Некачественное изготовление червячного редуктора проявляется в снижении быстроходности стола – одной из главных функциональных характеристик переналаживаемого механизма.

Таким образом, диагностическими признаками для данного дефекта являются ε и ω. Для определения их текущих значений необходимо регистрировать следующие параметры: ускорение планшайбы и угловая скорость вращения планшайбы.

Дефекты, связанные с некачественным изготовлением и сборкой корпуса путевого дросселя, а также с неправильной регулировкой гидравлического дросселя на панели гидростанции проявляются в том, что давление p_2 в сливной полости гидромотора увеличено. Это приводит кснижению быстроходности механизма стола.

Нормами ТУ установлена наибольшая допустимая величина p_2 при установившейся скорости вращения планшайбы, которая составляет 0,8 МПа. Таким образом, диагностическими признаками для данного дефекта являются: давление в сливной полости гидромотора и установившаяся скорость вращения планшайбы.

Анализ последних двух дефектов показывает, что принципиально разные дефекты приводят к одному и тому же результату – снижению быстроходности. Этот факт определяется по осциллограмме скорости ω(t). Но для распознавания действительной причины дефекта необходимо дополнительно регистрировать давления в нагнетательной и сливной полостях гидромотора.

Если механизм не оснащен встроенными датчиками давления, процесс измерения давлений в гидросистеме в условиях действующего производства связан с проведением трудоёмких мероприятий. Как показывает опыт, длительность установки в гидросистему датчиков давления, в ряде случаев, может составлять порядка 5 часов рабочего времени.

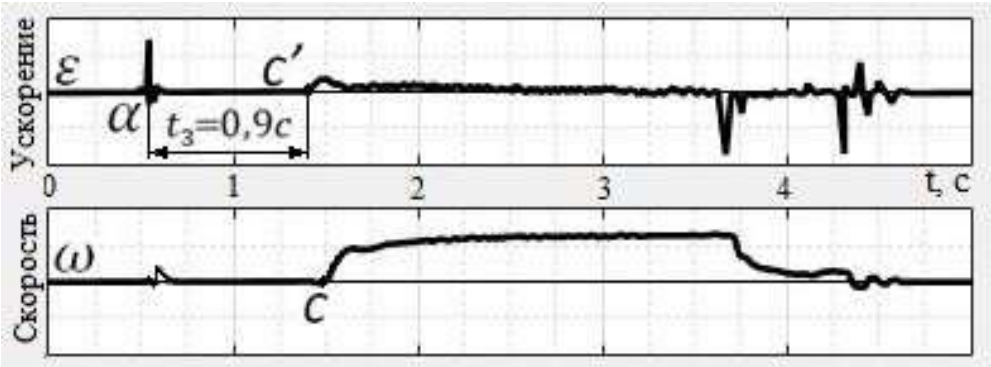


Рис. 1. Дефект настройки механизма зажима планшайбы.

Повысить оперативность постановки диагноза и снизить трудоемкость процедур диагностики в ряде случаев удаётся путём повышения информативности диагностических сигналов, уменьшая при этом количество регистрируемых сигналов. Это особенно актуально для перенастраиваемого оборудования и переналаживаемых механизмов, поскольку сокращает время оценки технического состояния и переналадки на новый технологический процесс. Поставленная задача решается сочетанием методов натурного и вычислительного экспериментов.

Например, детальный анализ осциллограммы скорости ω планшайбы позволяет локализовать указанные выше дефекты и однозначно установить причину недостаточной быстроходности, пользуясь только осциллограммой скорости ω, не прибегая к дополнительным измерениям давлений в гидросистеме.

Такая возможность связана с различным влиянием параметров гидромеханической системы механизма стола на характер изменения осциллограммы скорости на этапах разгона и установившегося движения. Это свойство было установлено в результате анализа динамических свойств механизма на математической модели.

Моделировался процесс разгона и выхода на установившийся режим вращения планшайбы.

При построении математической модели, принимались следующие допущения:

- зазоры в кинематической цепи отсутствуют;
- звенья кинематической цепи абсолютно жесткие;
- учитывается сжимаемость рабочей жидкости;
- температура рабочей жидкости постоянна;
- объемные утечки в гидросистеме отсутствуют;
- изменение давления в трубопроводах не учитывается;
- динамическая характеристика переливного клапана заменяетсястатической.

Зависимость расхода рабочей жидкости Q и давления, подаваемого насосной установкой в систему, имеет вид $p_1 = p_н - A_q Q$, где $p_н$ – давление настройки переливного клапана, равное 4 МПа; A_q – характеристика переливного клапана.

Уравнение расходов для полости нагнетания с учетом сжимаемости рабочей жидкости, согласно работе [19], имеет вид:

$$\frac{dp_1}{dt}\left(\frac{1}{E}+\alpha\frac{p_0}{p_1^2}\right)W_1 = \frac{p_н - p_1}{A_q} - qiw,$$

где W_1 – объем полости нагнетания; E – модуль упругости рабочей жидкости; p_0 – атмосферное давление = 0,1 МПа; q – удельный расход гидромотора; α – процент воздуха в рабочей жидкости; ω – скорость вращения планшайбы; i – передаточное отношение редуктора; p_1 – давление в полости нагнетания гидромотора.

Уравнение расходов для сливной полости гидромотора

$$\frac{dp_2}{dt}\left(\frac{1}{E}+\alpha\frac{p_0}{p_2^2}\right)W_2 = qiw - \frac{p_2}{K_1}$$

где W_2 – объем рабочей жидкости; p_2 – давление в сливной полости гидромотора; K_1 – коэффициент гидравлического сопротивления в сливной магистрали гидромотора, величина которого определяется техническим состоянием дросселей.

Границы изменения коэффициента K_1 оценивались по осциллограммам скорости ω и давлению p_2 в сливной полости гидромотора у дефектных и исправных механизмов: K_{1max} =9.83 ·10^9 кг/с·м^4, K_{1min} =1.12·10^9 кг/с·м^4.

Уравнение движения планшайбы с учетом сил трения в червячной передаче, т.е. с учетом к.п.д. червячного редуктора, следующее [20, 21]:

$$\frac{d\omega}{dt}\left(J_1+\frac{1}{\eta}J_2\right)=K_M(p_1-p_2)-M_{mp}(\omega)$$

где η – к.п.д червячного зацепления – параметр, влияющий на длительность цикла работы поворотного стола; J_1 - суммарный момент инерции вала гидромотора, муфты и червяка; J_2 – приведенный к валу гидромотора момент инерции червячного колеса, планшайбы, зубчатых колес, обрабатываемых деталей и приспособлений, установленных на планшайбе [20, 21]; $K_м$ – коэффициент момента гидромотора; $M_{mp}(\omega)$ – функция изменения момента трения в направляющихпланшайбы, приведённая к валу гидромотора.

Для определения момента трения $M_{mp}(\omega)$ экспериментально определялась зависимость этого момента от скорости ω вращения планшайбы.

В данном случае применялась кусочно-линейная аппроксимация экспериментальных данных для момента трения $M_{mp}(\omega)$ от скорости. Вид функциональной зависимости $M_{mp}\ (\omega)$ следующий:

$$M_{mp}(\omega)=\begin{cases}9,22-71,0\omega, & \text{если} \quad \omega\le 0,08\text{рад/с},\\ 3,44+1,26\omega, & \text{если} \quad \omega\ge 0,08\text{рад/с}\end{cases}$$

Совместно приведенные уравнения образуют систему нелинейных дифференциальных уравнений движения механизма на этапе разгона и выхода на установившееся движение

$$\begin{cases}\dfrac{dp_1}{dt}\left(\dfrac{1}{E}+\alpha\dfrac{p_0}{p_1^2}\right)W_1=\dfrac{p_н-p_1}{A_q}-qiw,\\ \dfrac{dp_2}{dt}\left(\dfrac{1}{E}+\alpha\dfrac{p_0}{p_2^2}\right)W_2=qiw-\dfrac{p_2}{K_1},\\ \dfrac{d\omega}{dt}\left(J_1+\dfrac{1}{\eta}J_2\right)_2=K_M(p_1-p_2)-M_{mp}(\omega).\end{cases}$$

Начальные условия: $t = 0$, $\omega = 0$, $p_1 = 0.15$ *МПа*, $p_2 = p_0$.

Решения системы уравнений численными методами относительно функции ω(t) в зависимости от параметров η и K_1 модели (Рис. 2)

Функция 1 соответствует разгону и выходу на установившейся режим вращения планшайбы при увеличенном трении в червячном редукторе, кривая 2 – после ремонта и увеличения η – к.п.д червячного зацепления. Анализ кривых показывает увеличение установившейся скорости и уменьшение времени разгона t_p при возрастании η. Принимается, что время разгона – это времядостижения скоростью величины $0,9\cdot\omega_y$.

Увеличение гидравлического сопротивления в сливной магистрали связано с изменением коэффициента K_1.

Величина K_{1min} соответствует исправному состоянию гидроаппаратов сливной магистрали. На рис. 2. функция 3 соответствует механизму с исправным червячным редуктором, но имеющим увеличенное гидравлическое сопротивление.

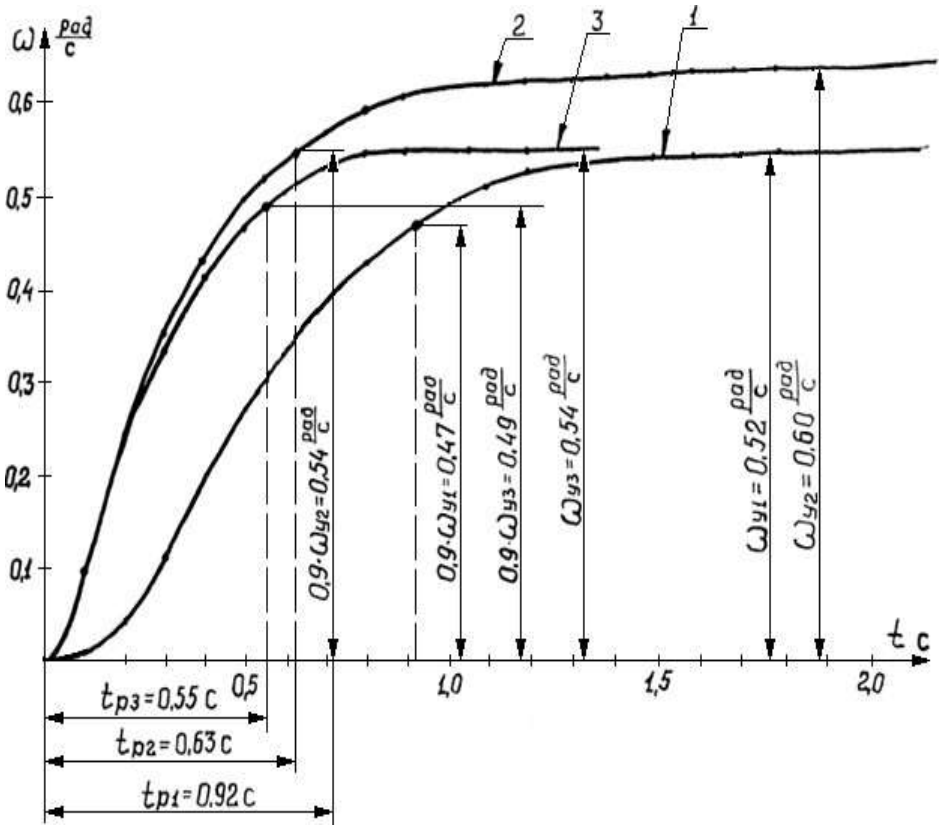


Рис. 2. Характер изменения скорости на этапе разгона планшайбы.

Анализ изменения функции $\omega(t)$ показывает, что увеличениегидравлического сопротивления приводит к уменьшению установившейсяскорости и уменьшению времени разгона t_p.

Так установлено, что интервал времени разгона t_p на осциллограмме скорости является чувствительным диагностическим признаком разделения дефектов механической и гидравлической подсистем механизма поворотного стола. Величина установившейся скорости вращения планшайбы ω_y «реагирует» на наличии или отсутствии повышенного сопротивления моменту гидромотора, а время разгона t_p, определяемое по осциллограмме скорости, позволяет определить конкретно, какая из подсистем ответственна за недостаточную быстроходность. Таким образом, информативность диагностического сигнала $\omega(t)$ увеличена. Регистрируя только скорость $\omega(t)$ удается локализовать дефект и определить способ изменения быстроходности поворотного стола.

Контроль интервалов времени на осциллограммах диагностических сигналов увеличивает информативность сигнала, являясь дополнительными информативными диагностическими признаками распознавания дефектов. Установив связь между отдельными интервалами времени, например, на осциллограмме скорости и деталями механизма, техническое состояние которых непосредственно влияет на длительность соответствующих интервалов времени, можно как локализовать дефект, так и воздействовать на время $t_ц$, регулируя соответствующее устройство и настраивая таким образом переналаживаемый механизм на требуемый режим движения.

Указанная информация является результатом предварительного, детального анализа динамических свойств гидромеханической системы механизма на математической модели, а также результатом экспериментальных исследований натурных объектов. Особенность этой информации в том, что она в дальнейшем многократно используется при формировании законов движения, когда необходимо учесть изменения инертных масс обрабатываемых деталей и приспособлений, устанавливаемых на планшайбу поворотного стола.

Другой метод увеличения информативности диагностического сигнала основан на изменении представления о нём, как о физическом процессе и соответствующем изменении его математического описания. Для этого меняется методика проведения экспериментов, и предлагаются новые алгоритмы обработки сигнала, как процесса, развивающегося во времени [22-24].

Так в обычно применяемых методах время рассматривалось как детерминированный параметр, принимающий вполне конкретные фиксированные значения. Ограниченность информации здесь связана с представлением об интервалах времени t_i как о фиксированных величинах. В такой интерпретации разные по физической природе дефекты могут приводить к одинаковым изменениям интервалов времени t_i, и указать конкретную причину невозможно.

Представление об интервалах времени как о случайных величинах более полно и точно отражает их физические свойства и открывает возможности для увеличения информативности. Перспективные и глубокие результаты в этом направлении получены также в МГТУ им. Н.Э. Баумана [25-28], где разработаны фазо-хронометрические методы диагностики роторных систем.

При экспериментальных исследованиях различных механизмов циклового действия было установлено, что, при достаточно точных многократных измерениях интервалов времени t_i движения механизма из одного фиксированного положения в другое, обнаруживаются его случайные отклонения около некоторого среднего значения. В зависимости от динамических свойств механизма среднее значение периода движения также может претерпевать эволюцию. При этом оказывается, что в случайной составляющей времени t заключен значительный объем диагностической информации о текущем состоянии динамической системы механизма.

Таким образом, наряду с анализом конкретного физического процесса, например, координаты перемещения звена механизма $x(t)$, предлагается измерять и анализировать время достижения процессом $x(t)$ некоторой фиксированной величины. Это может быть время достижения исполнительным звеном механизма заданной точки в процессе движения.

Процесс формирования случайной составляющей интервала времени можно иллюстрировать следующей схемой. Силовой стол с гидроприводом многократно перемещается по направляющим из начального положения x_0 в заданную точку x_1 (Рис. 3.).

Давление p в полости нагнетания испытывает случайные колебания, вызванные как пульсацией насоса и динамическими процессами в гидросистеме, так и влиянием других узлов с гидроприводом, которые обслуживает гидростанция (Рис. 4.). Следовательно, движущая сила, действующая на массу силового стола, является случайным процессом. Ответная реакция механизма стола на случайные воздействия — это скорость $v(t)$ движения массы m стола, которая также испытывает случайные колебания и также является случайным процессом.

Тогда перемещение силового стола x, как интеграл от случайной функции– скорости $v(t)$ - тоже случайный процесс $x(t) = \int_0^t v(t)dt$. И можно говорить о времени достижения

процессом *x(t)* заданной координаты x_1, как о величине случайной, которая имеет свой характерный закон распределения вероятностей (Рис. 5).

Существует связь между характером изменения во времени физического процесса *x*(*t*) - координаты перемещения выходного звена механизма, как случайного процесса, и законом распределения вероятности времени достижения этим процессом постоянной заданной величины. Эта связь следует из уравнения Понтрягина для функции $f(p_i, t)$ плотности вероятности времени первого достижения случайным процессом заданной величины, как функции параметров ($i = 1, 2, 3, ..., N$) динамической системы [29]. Авторами указанной работы установлена детерминированная функциональная зависимость между характером изменения во времени физического процесса *x*(t), как случайного марковского процесса, и функцией $f(p_i, t)$ плотности вероятности распределения времени достижения процессом заданной величины.

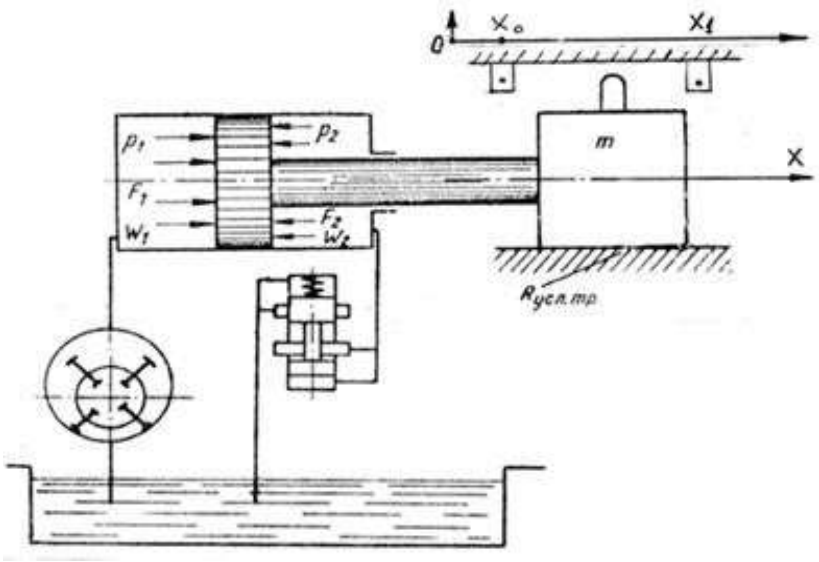


Рис. 3. Силовой стол с гидроприводом.

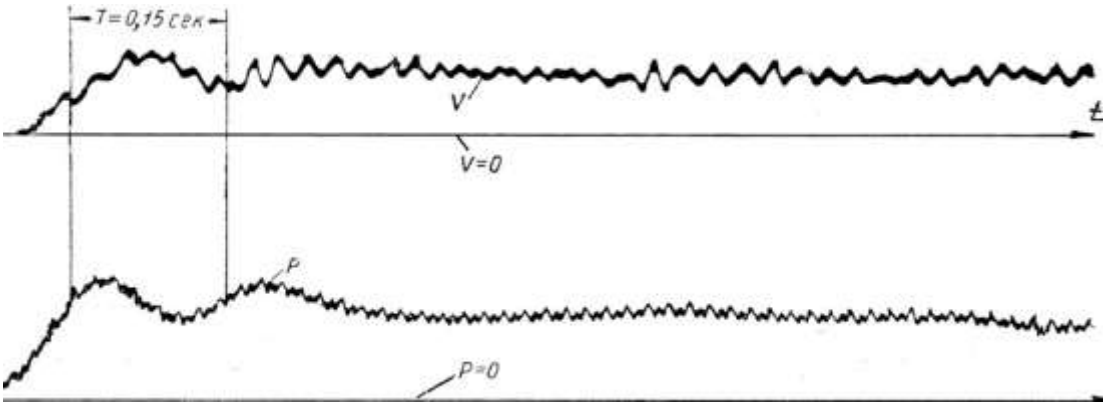


Рис. 4. Графики скорости и давления.

Рассмотренный в работе [24] метод оценки технического состояния и диагностирования механизма основан на зависимости свойств случайного процесса $x(p_i,t)$ от структурных

параметров p_i механизма. Математическая основа предлагаемого метода состоит в следующем.

Пусть уравнение движения динамической системы имеет вид:

$$\dot{x} = F(p_1, p_2, ..., p_n, x, t) + G\xi(t), \quad (1)$$

с начальным условием: $x(t_0) = x_0$ при $t = t_0$. Здесь $G\xi(t)$ – случайное внешнее воздействие типа белого шума; G – интенсивность белого шума; p_i – параметры системы, отклонения которых вызывают появление дефекта.

К дифференциальным уравнениям первого порядка всегда можно привести уравнение более высокого порядка за счет увеличения размерности пространства решений.

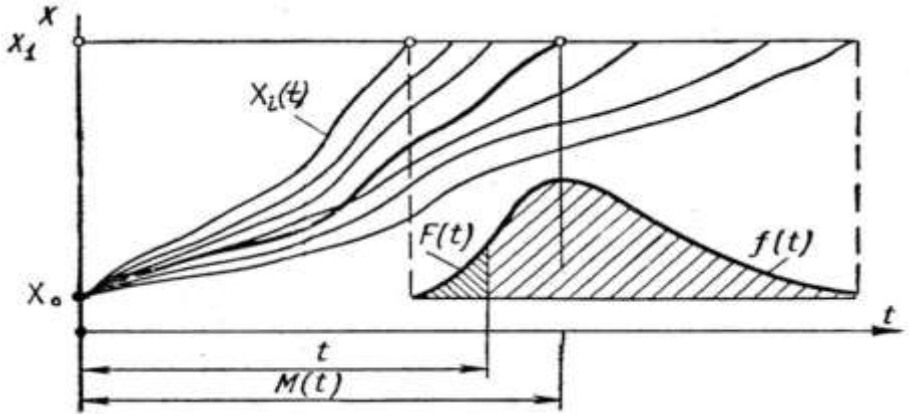


Рис. 5. Образование случайной составляющей интервала времени.

Вероятностным описанием случайного процесса $x(t)$, удовлетворяющего уравнению (1), будет функция условной плотности распределения вероятностей $\varphi(p_1, p_2, \ldots, p_n, x, t/x_0, t_0)$, которая является решением уравнения Колмогорова [30, 31]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t_0} + k_1(p_i, x_0, t_0)\frac{\partial \varphi}{\partial x_0} + \frac{1}{2}k_2(p_i, x_0, t_0)\frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 x_0} = 0, \quad (2)$$

где k_1 (p_i, x_0, t_0) и k_2 (p_i, x_0, t_0) - коэффициенты сноса и диффузии соответственно. Они определяются из уравнения движения (1) [30, 31]

$$k_1(p_i, x_0, t_0) = \lim_{\Delta t_0 \to 0} \frac{1}{\Delta t_0}[F(p_i, x, t)\Delta t_0 + m_\varepsilon(t)\Delta t_0],$$

$$k_2(p_i, x_0, t_0) = \lim_{\Delta t_0 \to 0} \frac{1}{\Delta t_0} \int_t^{t+\Delta t_0} \int K_\varepsilon(t_1, t_2) dt_1 dt_2,$$

где K_ε (t_1, t_2) - корреляционная функция случайного возмущения $G\xi(t)$. Для стационарного случайного возмущения типа белого шума с нулевым математическим ожиданием $m_e(t) = 0$ и дисперсией $\sigma^2 = G$ функция K_ε (t_1, t_2) - это дельта-функция $\delta(\tau)$, где $\tau = t_2 - t_1$.

Вероятностным описанием случайного процесса $x(p_i, t)$, удовлетворяющего уравнению (2), является функция $f(p_i, x_0, t)$ плотности вероятности распределения времени первого достижения случайным процессом заданной величины x_1, которая является решением уравнения Понтрягина

Из уравнения Колмогорова (2) можно получить уравнение для функции $f(p_i, x_0, t)$ - плотности вероятности распределения времени первого достижения случайным процессом $x(t)$ заданной величины x_i [31, 32]. Полагая процесс стационарным, уравнение для $f(p_i, x_0, t)$ имеет вид

$$\frac{\partial f}{\partial t} = k_1(p_i, x_0)\frac{\partial f}{\partial x_0} + \frac{1}{2}k_2(p_i, x_0)\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x_0} \quad (3)$$

с начальными и граничными условиями: $f(p_i, x, t_0) = \delta(t - t_0)$; $f(p_i, x_0, t) = \delta(x - x_0)$; $f(p_i, x_1, t) = \delta(x - x_1)$. В этом уравнении (3) коэффициенты сноса и диффузии не зависят от времени. Для задач диагностики и идентификации уравнение (3) дает важный результат. Его решение определяет закон распределения времени достижения обобщенной координатой $x(t)$ заданного значения x_1 как детерминированную функцию параметров p_i динамической системы. Зарождение дефекта (отклонение δp_k) влечет за собой изменения коэффициентов $k_1(p_i, x_0)$ и $k_2(p_i, x_0)$ в уравнении (3) и, как следствие, меняет функцию $f(p_i, x_0, t)$. Это будет признаком возникновения дефекта. Изменение функции – внешний признак зарождения дефекта. Каждое отклонение δp_k характерным образом влияет на функцию $f(p_i, x_0, t)$. Таким образом, каждому состоянию динамической системы (каждому дефекту) соответствует своя функция $f(p_i, t)$, что позволяет распознавать различные состояния. Поскольку каждая неисправность специфическим образом меняет функции $k_1(p_i, x_0)$ и $k_2(p_i, x_0)$, характерные изменения будут наблюдаться и у $f(p_i, x_0, t)$. Имея предварительно полученный набор распределений (гистограмм) для каждого дефекта и предъявляя к распознаванию экспериментально полученную гистограмму, по результатам сравнения можно определить конкретный дефект.

Математическую модель формирования случайной составляющей интервала времени $t_{сл}$ представим следующим образом $t = t_д + t_{сл}$, где $t_д$–математическое ожидание статистического массива величин интервалов времени движения от точки x_0 до x_1 при многократном воспроизведении эксперимента. В совокупном статистическом массиве экспериментальных данных $\{t–t_д\}$ содержится достаточная информация о текущем состоянии механизма. По массиву данных $\{t–t_д\}$ строится гистограмма распределения плотности вероятности времени достижения координатой $x(t)$ заданной точи x_1.

Диагностирование и локализация дефекта состоит в сравнении предъявленной к распознаванию гистограммы с полученными ранее гистограммами, которые соответствуют известным дефектным состояниям. Эти гистограммы являются результатом предварительного «обучения» диагностической системы.

Предлагаемый метод диагностики экспериментально проверялся на поворотном столе с червячным редуктором, который соединён с электродвигателем муфтой. В механизм целенаправленно «внедряли» заранее известные дефекты, которые были связаны с качеством изготовления и сборки механизма, а также дефекты, возникновение которых связано с процессом эксплуатации. Так гистограмма на рисунке 6.а соответствует исправному состоянию механизма, рисунок 6.б – соответствует увеличенной силе трения в червячном зацеплении, на рисунке 6.в – увеличен зазор в соединительной муфте между редуктором и двигателем, на рисунке 6.г – увеличен зазор вчервячном зацеплении.

Для каждого дефекта получены гистограммы характерной формы, которые легко идентифицировать.

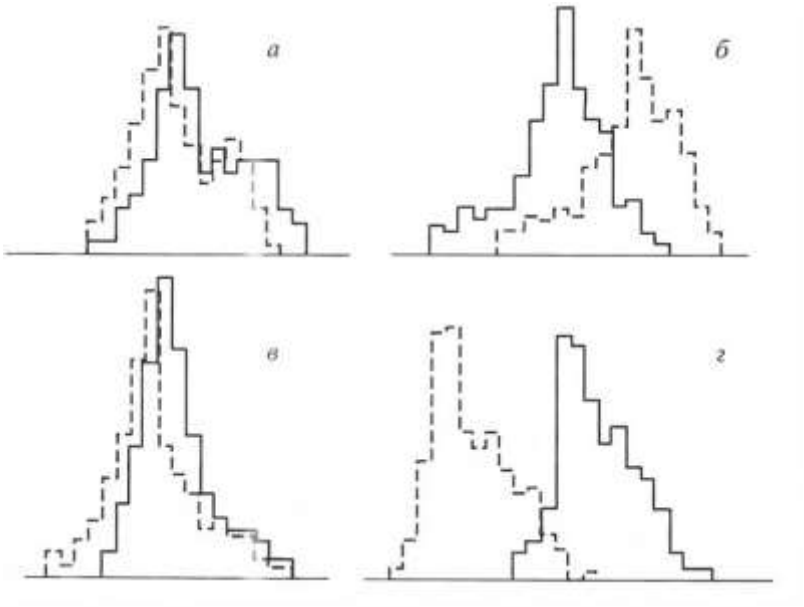


Рис. 6. Гистограммы, соответствующие состоянию механизма.

Для проверки устойчивого соответствия форм гистограмм соответствующим состояниям механизма, эксперименты повторяли. Для этого заново воспроизводился закон движения и процесс измерения *t*. Пунктиром на рисунке 6. показаны гистограммы, полученные при повторном воспроизведении экспериментов. Близкое совпадение соответствующих гистограмм свидетельствует об устойчивом взаимном соответствии динамических свойств механизма и законов распределения для времени *t*. Таким образом, интервал времени, принимая конкретные числовые значения, позволяет определять техническое состояние механизма и проводить мониторинг в процессе работы механизма. Полученный результат свидетельствует о возможности повышения информативности экспериментальных данных при соответствующей организации эксперимента и математической обработке результатов.

Данный метод диагностики имеет более широкое применение и может эффективно применяться для превентивного обнаружения дефектов, связанных с затуплением режущего инструмента, в частности, стержневого инструмента [33]. Здесь предлагается использовать в качестве источника информации низкочастотные крутильные колебания, например сверла, под действием силы резания. Источником информации являются интервалы времени Δt_i поворота инструмента на некоторый постоянный угол $\Delta\varphi$ (Рис.7).

В течение одного оборота инструмента интервалы Δt_i образуют упорядоченную последовательность – временной ряд. При многократных, последовательных измерениях значения этого многомерного вектора претерпевают случайные изменения, связанные с крутильными колебаниями сверла под действием крутящего момента от силы резания. Случайный характер времени *t* обусловлен тем, что крутящий момент от силы резания складывается из детерминированной $M_Д$ и случайной M_C составляющих силы резания [34]. Случайная составляющая является источником силового шума и генерирует виброакустические волны и акустические эмиссию. От состояния инструмента, его износа, микротрещин и затупления непосредственно зависит спектральная плотность $S(\omega)$ случайной компоненты M_C [35]. Поскольку кинематическая цепь привода вращения инструмента обладает угловой податливостью, сверло и сопряженные и ним детали образуют крутильную колебательную систему, которая под действием момента M_C совершает вынужденные

случайные колебания. В результате полная угловая скорость вращения сверла – это сумма детерминированной и случайной составляющих. Если Ω – детерминированная составляющая скорости вращения шпинделя, а $\omega_c(t)$ – случайная составляющая, то фактическая угловая скорость равна сумме $\Omega + \omega_c(t)$. Тогда время поворота Δt_i сверла на угол $\Delta\varphi$ – величина случайная.

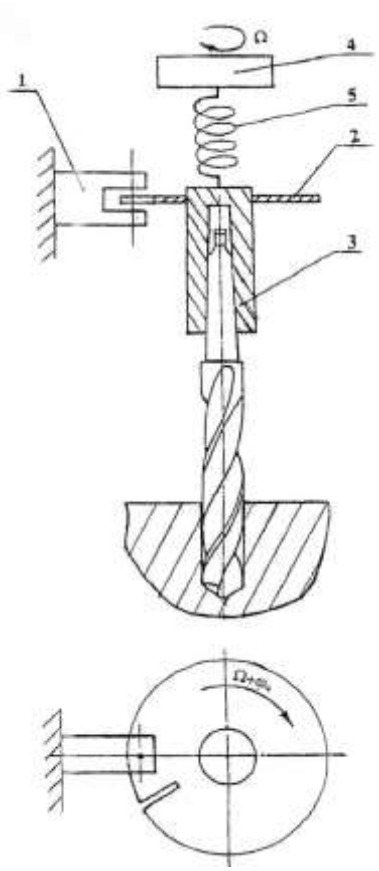


Рис. 7. Схема измерения времени фотоэлектрическим методом.

При наступлении этапа катастрофического износа сверла существенно меняется спектральный состав $S(\omega)$ компоненты M_C и резко возрастает колебательный характер силы резания. Если до этого этапа, в процессе равномерного износа инструмента, последовательно измеряемые случайные величины образовали стационарную случайную последовательность $\{\Delta t_i\}$ $(i = 1,2,3,...N)$, то начало катастрофического износа характеризуется нарушением стационарности. Применяя в реальном масштабе времени известные статистические методы обнаружения нарушения стационарного режима для последовательности $\{\Delta t_i\}$, можно определить наступление опасного момента катастрофического износа и разрушения режущей кромки по мере поступления экспериментальных данных о времени Δt_i [36]. В математической постановке задача обнаружения момента нарушения свойства стационарности случайным процессом была впервые поставлена А.Н. Колмогоровым и решена его учеником А.Н. Ширяевым [37, 38].
Точность постановки диагноза достигается за счет того, что измеряется параметр, непосредственно связанный с главным вращательным движением резания металла, а также

за счет установки измерительного устройства непосредственно на инструмент. Этим существенно уменьшается маскирующийфон, создаваемый вибрациями деталей станка.

Резервом повышения оперативности постановки диагноза является учет чувствительности диагностических признаков к отклонениям структурных параметров механизма, а также анализ и учет частоты возникновения дефектов.

Например, каждый из дефектов дросселя скорости СК 952 поворотного стола с червячным редуктором одновременно проявляется в изменении следующих диагностических признаков: увеличении ускорения $\varepsilon_ф$ планшайбы при фиксации; увеличении скорости $\omega_р$ реверса планшайбы; увеличении погрешности углового деления δ_ψ.

Для параметра δ_ψ техническими условиями на механизм установлено допустимое значение, равное 2 угловых секунды. Текущее значение величины погрешности δ_ψ определяется статистической обработкой результатов измерений. Для каждой позиции Z определяется среднее значение ψ_Z и среднеквадратичное отклонение σ_Z по формулам:

$$\bar{\Psi}_z = \frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N}\Psi_{z,l}, \quad \sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{N}(\Psi_{z,l} - \bar{\Psi}_z)^2}{N-1}},$$

где N – количество экспериментальных данных; $\Psi_{z,l}$ – результаты измерений. Закон распределения случайной составляющей координаты конечного положения планшайбы принимается нормальным. В этом случае зона рассеивания случайных величин около среднего значения $\bar{\Psi}_z$ составляет $\pm 3\sigma$, при доверительной вероятности 0,9986. По расчетным значениям $\bar{\Psi}_z$ и σ_Z определялись наибольшее Δ^{max} и Δ^{min} наименьшее значения величины Δ: $\Delta^{max} = \bar{\Psi}_{Zi_j} + 3\sigma_{Z_i}$, $\Delta^{min} = \bar{\Psi}_{Z_j} + 3\sigma_{Z_j}$, где Z_i и Z_j – номера позиций, в которых Δ принимает наибольшее и наименьшее значения. Тогда погрешность δ_ψ равна $\delta_\psi = \Delta^{max} - \Delta^{min}$. Однако трудоемкость измерения параметров $\varepsilon_ф$ и δ_ψ неодинакова. В условиях производства, когда на планшайбе поворотного стола установлены приспособления, измерение погрешности δ_ψ значительно осложнено и более простым, и менее трудоемким является измерение ускорения $\varepsilon_ф$,

Необходимо отметить, что параметры $\varepsilon_ф$, δ_ψ и $\omega_р$ не позволяют разделять дефекты дросселя СК 952, а могут свидетельствовать лишь об их наличии. Это связано с тем, что как дефект обратного клапана, так и дефекты резиновых уплотнений и диафрагмы, одинаково приводят к увеличению $\varepsilon_ф$, δ_ψ и $\omega_р$. Таким образом, эти дефекты не различимы по указанному комплексу признаков.

Однако указанные дефекты наблюдаются с разной частотой проявления. Наиболее распространенными и частыми их них является дефект обратного клапана, затем дефект резиновых уплотнений, и редко наблюдается дефект размера диаметров отверстий диафрагмы [4]. Указанные сведения позволяют организовать последовательность проверок для определенияконкретного дефекта дросселя СК 952 в тех случаях, если параметры $\varepsilon_ф$ или $\omega_р$ свидетельствуют о недостаточной его герметичности. Проверки начинаются с контроля технического состояния (или замены) обратного клапана, как наиболее вероятного элемента, подверженного дефекту. Такая организация диагностирования, основанная на учете частоты возникновения дефектов, позволила сократить трудоёмкость локализации дефекта и исключить ненужныеоперации разборки и сборки.

Дефекты дросселя СК 952 приводят также к возникновению аварийной ситуации - заклиниванию червячного зацепления. Однако, как показали исследования на

математической модели [39], причинами заклинивания являются наличие нерастворенного воздуха в рабочей жидкости *α,* повышенное давление $p_н$ в гидросистеме ($p_н$ выше 4 МПа), не соответствие жесткости C_3 узла фиксации допустимым значениям. Особенность перечисленных дефектов состоит в том, что они так же не различимы по параметрам $\varepsilon_ф$ и $\omega_р$, так как они одинаково сказываются на изменениях указанных параметров: приводят к их увеличению. Однако, давление $p_н$ в гидросистеме может непосредственно контролироваться по показаниям манометра, имеющегося на панели гидростанции. Жесткость C_3 может быть определена в результате статистических испытаний. Относительно оставшихся двух параметров, связанных с недостаточной герметичностью дросселя СК 952, а также с повышенным содержанием воздуха в рабочей жидкости, установлена неодинаковая частота их возникновения. Наиболее частой причиной заклинивания являются дефекты дросселя СК 952. Заклинивание редуктора является аварийной ситуации и задачей диагностики являлось не только определение причин ее возникновения, но и предупреждение самой аварии. Для этого необходим наиболее чувствительныйк данному дефекту диагностический признак.

Задача сводится к оценке чувствительности $\omega_р$ и $\varepsilon_ф$, к изменениям следующих структурных параметров:

- объема нерастворенного воздуха в рабочей жидкости α;
- коэффициента гидравлического сопротивления *K* дросселя СК 952.

Для этого определилась зависимость $\omega_р$ и $\varepsilon_ф$ от указанных структурных параметров в виде линейных форм:

$$\varepsilon_ф = H_{11}\,\alpha + H_{12}\,K + H_{13},\ \omega_р = H_{21}\,\alpha + H_{22}\,\omega_р = H_{21}\,\alpha + H_{22}\,\mathrm{K} + H_{23} + H_{23} \qquad (4)$$

Величины H_{ij} (i =1,2, j =1,2,3) – коэффициенты чувствительностидиагностических признаков, которые подлежат определению.

Задача решалась на основе математического моделирования. Для этого использовалась разработанная в [39] математическая модель, которая описывает движение планшайбы на этапах реверса и фиксации. Ее решениями являются, наряду с функциями $p_1(t)$, $p_2(t)$, $R(t)$ также и $\omega_i = \dot{\psi} i_1$ и $\varepsilon_i = \ddot{\psi} i_1$. Максимальная величина $\ddot{\psi}_{\max} i_1$ при фиксации равна ускорению $\varepsilon_ф$ а установившееся значение скорости $\dot{\psi}_y i_1$ равно $\omega_р$ (здесь i_1 – передаточное отношение редуктора).

Суть машинных экспериментов состояла в определении для каждой пары значений структурных параметров механизма *K* и α соответствующих величин $\omega_р$ и $\varepsilon_ф$ диагностических признаков. Затем результаты расчетов аппроксимировались линейными функциями (4). В процессе проведения вычислительных экспериментов кроме α и *K* варьировались еще шесть параметров: C_1, C_2, C_3, $p_н$, m_3, F. Сетка эксперимента определялась с помощью метода планируемого эксперимента [40] на основе ЛП последовательности Соболя [41].

Аппроксимация зависимостей $\omega_р$ и $\varepsilon_ф$ от α и K в виде линейных функций выполнена на основе метода наименьших квадратов. В табл. 1 приведены расчетные значения $\varepsilon_ф$ и $\omega_р$ для каждой пары значений α и *K*. Таким образом, образована система 46 уравнений с тремя неизвестными. Можно говорить только о приближенном ее решении.

Таблица 1

Расчетные значения $\varepsilon_ф$ и $\omega_р$ для каждой пары значений α и K

№ эксп.	K	α	$\varepsilon_ф(\bar{L}_1)$	$\omega_р(\bar{L}_2)$	№ эксп.	K	α	$\varepsilon_ф(\bar{L}_1)$	$\omega_р(\bar{L}_2)$
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0,406	0,144	91	0,31	24	0,581	0,056	114	0,36
2	0,756	0,094	12	0,09	25	0,231	0,069	110	0,36
3	0,231	0,119	69	0,30	26	0,581	0,119	101	0,35
4	0,581	0,069	19	0,05	27	0,406	0,094	24	0,20
5	0,144	0,131	65	0,32	28	0,756	0,144	59	0,31
6	0,494	0,081	19	0,05	29	0,669	0,106	13	0,05
7	0,319	0,106	52	0,31	30	0,319	0,056	23	0,10
8	0,669	0,056	17	0,06	31	0,494	0,131	109	0,35
9	0,581	0,081	19	0,09	32	0,144	0,081	42	0,23
10	0,231	0,131	77	0,30	33	0,494	0,056	20	0,07
11	0,756	0,406	17	0,05	34	0,144	0,106	45	0,24
12	0,406	0,056	18	0,07	35	0,319	0,081	37	0,20
13	0,144	0,119	78	0,32	36	0,669	0,131	124	0,30
14	0,494	0,069	19	0,07	37	0,756	0,069	13	0,04
15	0,319	0,094	39	0,20	38	0,406	0,119	63	0,28
16	0,669	0,144	140	0,34	39	0,231	0,094	57	0,30
17	0,494	0,144	113	0,32	40	0,581	0,144	80	0,31
18	0,144	0,094	51	0,28	41	0,144	0,081	80	0,31
19	0,319	0,069	32	0,13	42	0,494	0,131	101	0,30
20	0,669	0,119	26	0,25	43	0,669	0,106	6	0,03
21	0,756	0,081	10	0,04	44	0,319	0,056	24	0,09
22	0,406	0,131	126	0,32	45	0,581	0,119	47	0,28
23	0,231	0,106	47	0,34	46	0,231	0,069	31	0,20

В табл. 1 столбцы 2 и 3 образуют коэффициенты матрицы D системы, а столбцы 4 и 5 – векторы $\bar{L}_i$ правых частей системы (i = 1, 2). Решение системы относительно векторов коэффициентов имеет вид $\bar{H}_i = (D^T D)D^T \bar{L}_i$, где D^T – транспонированная матрица. Для того, чтобы иметь соизмеримые значения коэффициентов, не зависящие от абсолютных значений

компонент вектора, проводилось нормирование элементов d_{ij} матрицы D и векторов $\bar{L}_i$ (i = 1, 2, …, 46) по формулам $\bar{d}_{ji} = (d_{ji} - d_{ji}^{\min})/(d_{ji}^{\max} - d_{ji}^{\min}), \bar{l}_{ji} = (l_{ji} - l_{ji}^{\min})/(l_{ji}^{\max} - l_{ji}^{\min})$. В результате решения системы получены следующие зависимости $\varepsilon_ф = 0{,}724 \cdot \alpha + 0{,}029\ K + 0{,}035$, $\omega_р = 0{,}547\ \alpha + 0{,}0086\ K + 0{,}144$. Коэффициенты чувствительности равны $\left|\partial\varepsilon_ф/\partial\alpha\right| = 0{,}029$; $\left|\partial\varepsilon_ф/\partial K\right| = 0{,}724$; $\left|\partial\omega_р/\partial\alpha\right| = 0{,}0086$; $\left|\partial\omega_р/\partial K\right| = 0{,}547$. Таким образом установлено, что наиболее «чувствительным» признаком к изменениям структурных параметров K и α является максимальное ускорение $\varepsilon_ф$, планшайбы при фиксации. Следовательно, контроль дефектов дросселя СК 952, а так же контроль наличия нерастворенного воздуха следует проводить по параметру $\varepsilon_ф$, который принимается за диагностический признак.

Результаты моделирования позволили установить наибольшую величину диагностического признака $\varepsilon_ф$, при которой не происходит заклинивание червячного зацепления. Она составляет 22 рад/с^2. Однако, требованиями технических условий установлена меньшая допустимая величина $\varepsilon_ф$, равная 4 рад/с^2, которая и принимается за допустимое значение.

Таблица 2

Комплекс мероприятий по оценке технического состояния механизма

Этапы выполняемых работ	Применяемые методы
Оценка текущего технического состояния механизма методами оперативной диагностики	
1. Определение комплекса диагностических параметров	Математическое моделирование работы механизма, экспериментальные исследования механизма, анализ накопленного опыта экспериментальных исследований аналогичных конструкций механизмов.
2. Распознавание дефектов, возникших в процессе эксплуатации.	Сравнение реальных диагностических сигналов с «эталонными», фазохронометрический метод, методы анализа виброакустических сигналов.
3. Устранение неисправностей.	Модульная замена неисправных узлов и деталей, ремонт и регулировка.
Определение соответствия функциональных параметров механизма требованиям технологического процесса.	
1. Определение максимально допустимых нагрузок на детали механизма	Математическое моделирование динамических процессов, расчетные методы на прочность, экспериментальные исследования механизма
2. Определение инерционных характеристик деталей механизма	Хронометрический метод оценки масс,координат центра масс и моментов инерции деталей механизма.
3. Определение максимально допустимых скоростей и ускоренийдвижения механизма	Расчетные методы и методы математического моделирования.
4. Определение быстроходности механизма или длительности цикла работы механизма	Математическое моделирование, экспериментальные исследования.
5. Определение параметров точности механизма	Расчетные и экспериментальные методы.

Таким образом, диагностическими признаками для распознавания дефектов поворотных столов с червячным редуктором являются $T_ц$, $t_з$, $t_р$, $t_т$, $\omega_у$, $\varepsilon_т$, $\varepsilon_ф$, $p_н$, p_1, p_2, Δp, $p_{разг}$.
Допустимые значения диагностических признаков следующие: $t_з$ = 0.4 с. и регламентируется ТУ; $t_р$ определяется в зависимости от инертных масс, установленных на механизм, устанавливается по результатам натурных и вычислительных экспериментов; $t_т$ = 0.9 с. (величина регламентируется на основе опытных данных); $\omega_у$ определяется требованиями технологического процесса; $\varepsilon_т$ определяется расчетом в зависимости от инертных масс, установленных на механизм; $\varepsilon_ф$ не более 3 рад/с^2, и регламентируется нормами ТУ; $p_н$ = 3.5 ÷ 4 МПа, регламентируется нормами ТУ; $p_1 \leq 2$ МПа, регламентируется на основе опытных данных; $p_2 \leq 0.8$ МПа, устанавливается на основе опытных данных; $\Delta p \leq 1.2$ МПа, устанавливается на основе опытных данных; $\delta\psi \leq 13$ угловых секунд, регламентируется нормами ТУ.
Для определения текущих значений диагностических признаков необходимо измерять следующие параметры $\omega(t)$, $\varepsilon(t)$, $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_{разг,}$ Ψ.
Выполняя периодически диагностирование на этапе переналадки и настройки механизма на очередной технологический процесс проверяется:
- текущее техническое состояние механизма;
- соответствие функциональных характеристик механизма требованиям технологического процесса;
- возможность дальнейшей эксплуатации механизма или необходимо проведение ремонтных и регулировочных работ.
Так можно обеспечить поддержание работоспособного состояния переналаживаемого механизма, его функциональных параметров и увеличить ресурс его безаварийной эксплуатации. Мероприятия по оценке технического состояния и диагностики механизма представлены в табл. 2
Таким образом, в работе показано, что
1. Контроль регламентированных ТУ параметров, совместно сдополнительными диагностическими параметрами позволяет на ранних стадияхлокализовать развитие скрытых дефектов.
2. Периодическое диагностирование на этапах переналадки и настройки механизма на очередной технологический процесс позволяет исключить значительные экономические затраты на ремонт аварийных состояний механизмов.
3. Детальный анализ экспериментально измеряемых диагностическихсигналов, направленный на увеличение их информативности, позволяет:
- сократить количество измеряемых диагностических параметров;
- оценить текущее техническое состояние по комплексу диагностическихпризнаков;
- оперативно локализовать накопленные неисправности;
- определить комплекс влияющих на быстроходность устройств,воздействуя на которые можно регулировать быстроходность механизма.
4. Выявление структурно-следственных связей дает возможность установить соответствие между структурными параметрами и диагностическими признаками.

Список литературы

1. Aleshin A.K., Firsov G.I., Glazunov V.A., Kovaleva N.L. Analysis of Diagnostic Signs of Defective States of Mechatronic Mechanisms of Cyclic Action // Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics. Ed. by Zh. Hu, S. Petoukhov, M. He. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 218-227.

2. Царев А.М. Надежность и диагностика технологического оборудования. - Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 128 с.
3. Яхьяев Н.Я., Кораблин А.В. Основы теории надежности и диагностика. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 256 с.
4. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Статников И.Н., Фирсов Г.И. Анализ и исследование дефектных состояний узлов механизмов циклического действия машин // Вестник научно-технического развития. – 2023. - № 168. – С. 3-21.
5. Рязанов С.И., Псигин Ю.В., Веткасов Н.И. Автоматизация производственных процессов в машиностроении (робототехника, робототехнические комплексы). - Ульяновск: УлГТУ, 2018. – 162 с.
6. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологической системы «станок приспособление инструмент деталь». – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2016. - 144 с.
7. Нахапетян Е.Г. Контроль и диагностирование автоматического оборудования. - М.: Наука, 1990. – 272 с.
8. Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б., Ягьяев Э.Э. Эксплуатация, обслуживание и диагностика технологических машин. – М.: ИНФРА, 2020. - 356 с.
9. Некрасов Р.Ю., Путилова У.С., Некрасов Ю.И. Диагностика процессов нагружения и накопления повреждений инструмента при обработке на станках с ЧПУ. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. - 120 с.
10. Шишмарёв В.Ю. Диагностика и надежность автоматизированных систем. – М.: Изд-во Юрайт, 2021. - 341 с.
11. Клячкин В.Н., Крашенинников В.Р., Кувайскова Ю.Е. Прогнозирование и диагностика стабильности функционирования технических объектов. – М.: РУСАЙНС, 2020. - 200 с.
12. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования. - СПб.: Издательство «Лань», 2012. - 384 с.
13. Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г., Коротков И.А. Контроль и диагностика технологического оборудования. - Подольск: Сатурн-С, 2006. - 448 с.
14. Схиртладзе А.Г., Уколов М.С., Скворцов А.В. Надежность и диагностика технологических систем. – М.: Новое знание, 2008. - 518 с.
15. Бочкарев, С.В. Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем. - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 485 с.
16. Завистовский, В.Э. Надежность и диагностика технологического оборудования. - Минск: РИПО, 2019. – 257 с.
17. Козочкин М.П., Маслов А.Р., Сабиров Ф.С., Порватов А.Н. Диагностика и сертификация металлорежущего оборудования. – М.: Инновационное машиностроение, 2021. - 240 с.
18. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П., Кузовкин В.А., Мартинов Г.М., Сабиров Ф.С., Синопальников В.А., Филатов В.В. Диагностика автоматизированного производства. - М.: Машиностроение, 2011. - 600 с.
19. Левитский Н.И., Цуханова Е.А. Расчет управляющих устройств для торможения гидроприводов. - М.: Машиностроение, 1971. - 232 с.
20. Вейц В.Л., Кочура А.Е., Мартыненко А.Е. Динамические расчеты приводов машин. - Л.: Машиностроение, 1971. - 352 с.
21. Вейц В.Л. Динамика машинных агрегатов. - Л.: Машиностроение, 1972. - 324 с.
22. Cauffriez L., Grondel S. Real-time monitoring and diagnosis of a train door mechatronic system. // IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA 2014). Senigallia, Italy. 10–12 Sept 2014. - P. 1-6.
23. Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. - М.: Машиностроение, 1987. - 224 с.
24. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Фирсов Г.И. Оценка дискриминантно-прогностической способности статистических характеристик законов движения в задачах оперативной диагностики механизмов циклического действия // Вестник научно-технического развития. – 2014. - № 4(80). - С.3-11.
25. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов // Измерительная техника. – 2008. - № 10. – С.9-13.

26. Киселев М.И., Пронякин В.И. Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. – 2001. - № 9. – С.15-18.
27. Назолин А.Л. Обнаружение дефектов машин и механизмов циклического действия по временным и виброакустическим параметрам // Необратимые процессы в природе и технике. Часть II. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. - С.231-235.
28. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Динамические системы с флуктуирующим временем. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 197 с.
29. Понтрягин Л.С., Андронов А.А., Витт А.А. О статистическом рассмотрении динамических систем. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1933. - Т. 3, Вып. 3. - С. 165-180.
30. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. - М.: Наука, 1968. – 449 с.
31. Болотин В.В. Случайные колебания механических систем. - М.: Наука, 1986. – 335 с.
32. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. - М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.
33. Схиртладзе А.Г., Тимирязев В.А., Юркевич В.В. Управление точностью и производительностью процесса обработки отверстий лезвийным режущим инструментом. - Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2020. – 276 с.
34. Gegg B.C., Suh C.S., Luo A.C.J. Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics. - New York: Springer Science+Business Media, 2011. - 189 p.
35. Stone B. Chatter and Machine Tools. – Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2014. - 268 p.
36. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение нарушения изменения свойств временных рядов. - М.: Наука. 1983. - 199 с.
37. Ширяев А.Н. Задача скорейшего обнаружения нарушения стационарного режима. 1961. Т. 138. №5. С. 1039-1042.
38. Ширяев А.Н. К обнаружению разладки производственного процесса. // Теория вероятностей и ее применения. - 1963. - Т. 8, Вып. 4. - С. 264-281.
39. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Фирсов Г.И. Экспериментальное исследование и моделирование дефектных состояний мехатронных систем с механизмами циклического действия // Вестник научно-технического развития. - 2021. - № 1 (160). - С. 3-12.
40. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Проблемы алгоритмизации проведения и обработки результатов планируемого вычислительного эксперимента в механике машин // Вестник научно-технического развития. – 2022. - № 166. – С. 33-51.
41. Соболь И.М. Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. - М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1969. - 288 с.

Дата поступления: 25 сентября 2023 г.

DOI: 10.18411/vntr2023-170-2

УДК 621.891

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНОЙ СРЕДЫ И ЕЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ ДЕФОРМАЦИИ И КИНЕТИКУ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Лидия Ивановна Куксенова[1,2], Владислав Ильич Савенко[2]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

lkukc@mail.ru

[2] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. *Рассмотрена роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносного трения. Отмечается, что поверхностно-активная смазочная среда может оказывать пластифицирующее и упрочняющее влияние на реологическое поведение материала поверхностного слоя. На основе расчета эпюр компонент тензора остаточных напряжений в поверхностном слое при трении сформулированы представления о роли среды в процессе перераспределения дефектов кристаллической решетки при деформации и формировании износостойкого структурно-фазового состояния. Представлены характеристики структурного состояния поверхностных слоев латуней, алюминиевых и оловянных бронз при трении по* стали *в поверхностно-активных смазочных средах. Показано, что минимальные потери на трение и износ достигаются в сплавах с однофазной структурой α-твердого раствора с широким концентрационным интервалом растворимости легирующего элемента в твердом состоянии. Обнаружено, что такие граничные условия обеспечиваются наличием в зоне контактной деформации поликомпонентного трибоматериала стационарных макроскопических диффузионных потоков легирующих элементов. Выявлена роль локальных диффузионных явлений в квазиспинодальных фазовых переходах. Показано, что среди промышленных медных сплавов наибольшей износостойкостью в поверхностно-активных смазочных средах обладают латуни типа Л90, алюминиевые бронзы БрА5, БрА7, оловянные бронзы – БрОФ4-0,25, БрОФ6,5-0,15. Приведены примеры реализации явления избирательного переноса при трении в промышленных смазочных материалах.*

Ключевые слова: *антифрикционные медные сплавы, структура, контактная деформация, трение, кинетика изнашивания, поверхностно-активные смазочные материалы, явление избирательного переноса.*

THE INFLUENCE OF THE LUBRICATING MEDIUM AND ITS SURFACE-ACTIVE COMPONENTS ON THE FORMATION OF THE STRUCTURAL STATE OF THE DEFORMATION ZONE AND THE KINETICS OF DESTRUCTION DURING FRICTION OF METAL TRIBO-JOINTS

L. I. Kuksenova[1,2], V. I. Savenko[2]

[1] Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
lkukc@mail.ru
[2]Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry named after A.N. Frumkin Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract*. The role of the Rehbinder effect in the implementation of the wear-free friction regime is considered. It is noted that a surface-active lubricant medium can have a plasticizing and strengthening effect on the rheological behavior of the surface layer material. Based on the calculation of diagrams of the residual stress tensor components in the surface layer during friction, ideas about the role of the medium in the process of redistribution of crystal lattice defects during deformation and the formation of a wear-resistant structural-phase state are formulated. The characteristics of the structural state of the surface layers of brass, aluminum and tin bronzes during friction against steel in surface-active lubricating media are presented. It has been shown that minimal friction and wear losses are achieved in alloys with a single-phase α-solid solution structure with a wide concentration range of solubility of the alloying element in the solid state. It is shown that such boundary conditions are ensured by the presence of stationary macroscopic diffusion flows of alloying elements in the contact deformation zone of a multicomponent tribomaterial. The role of local diffusion phenomena in quasi-spinodal phase transitions has been revealed. It has been shown that among industrial copper alloys, brass type L90, aluminum bronzes BrA5, BrA7, tin bronzes - BrOF4-0.25, BrOF6.5-0.15 have the greatest wear resistance in surface-active lubricating media. Examples of the implementation of the phenomenon of selective transfer during friction in industrial lubricants are given.*
Key words: *antifriction copper alloys, structure, contact deformation, friction, wear kinetics, surfactant lubricants, selective transfer phenomenon.*

Введение. В условиях контактного взаимодействия поверхности деталей пары трения находятся в сложном взаимодействии. Это прежде всего статические и динамические силовые взаимодействия, тепловые и механо-физико-химические реакции. Частично поглощаемая поверхностным слоем энергия таких взаимодействий приводит к возникновению градиентов напряжений и температуры, упругих и пластических волн напряжений в зоне контакта, интенсификации химических и физико-химических реакций, структурным и фазовым переходам, формированию вторичных структур, переносу вещества. Условия для преобладающего развития тех или иных ведущих процессов в зоне контактного взаимодействия металлов определяются не только внешними механическими воздействиями и составом материалов трущихся пар, но и в существенной степени зависят от природы и свойств смазочной среды.

Экспериментальные исследования показывают, что характерным показателем установившегося режима трения является реализация периодических кинетических циклов накопления повреждений в зоне локализации деформации металла и разрушения, сопровождающихся динамическим равновесием между разрушением поверхностных структур и их восстановлением. Период этих циклов и их амплитуда являются кинетическими характеристиками накопления повреждаемости и разрушения тонкого поверхностного слоя и в макроскопическом масштабе определяют среднее значение интенсивности изнашивания материалов трибосопряжений для фиксированного пути трения.

Для описания элементарного акта разрушения используются представления кинетической термофлуктуационной теории прочности [1], в которой оценка времени существования единичной связи под нагрузкой (долговечность τ) проводится по формуле:

$$\tau = t_0 \exp((U_0 - \gamma\sigma)/kT),$$

где t_0 – частота колебаний атома в кристаллической решетке, $t_0 \approx 10^{-12}$с; U_0 – энергия активации разрушения единичной связи; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – действующее напряжение; *k* – постоянная Больцмана; *T* – температура.

Величину износа оценивают по формуле [2]:

$$I = (\sum \Delta A_r n_r h)/ K[t_0 \exp((U_0 - \gamma\psi\sigma)/RT)],$$

где $\sum \Delta A_r n_r$ – площадь фактического контакта; h – глубина зоны деформации; коэффициент К отражает исходную повреждаемость материала, характеристики релаксации повреждений, число одновременно разрушаемых связей; ψ – коэффициент энергетического поглощения в контакте (его диссипативность).

Таким образом, в кинетической модели изнашивания, отражающей усталостный механизм изнашивания, на работоспособность пары трения (долговечность материала поверхностного слоя) влияют активационные структурно-чувствительные параметры разрушения: энергия активации U_0 и коэффициент γ, имеющий смысл активационного объема. При этом эффективная энергия активации разрушения определяется как $U_\sigma = U_0 \pm \Delta G - \gamma\sigma$, где ΔG – изменение энергии активации процесса в результате физико-химического воздействия смазочной среды, т.е. параметр, влияющий на кинетику разрушения, связанный со свойствами среды.

Согласно представлениям физико-химической механики контактного взаимодействия [3] воздействие среды включает два ведущих процесса: экранирование контактирующих поверхностей и прямое физико-химическое воздействие активных компонентов на свойства взаимодействующих приповерхностных микрообъемов при взаимном перемещении нагруженных тел. Наибольший триботехнический эффект воздействия на структуру и структурно-чувствительные свойства поверхностного деформированного при трении слоя имеет место при наличии в смазочных материалах поверхностно-активных веществ (ПАВ), компоненты которых в процессе контактной деформации вызывают адсорбционное пластифицирование слоя (эффект Ребиндера) [4].

Эффектом Ребиндера называют явление адсорбционного понижения прочности твердых тел, облегчение их деформации и разрушения вследствие обратимого физико-химического воздействия окружающей среды. Термодинамически эффект Ребиндера обусловлен уменьшением работы образования новой поверхности при деформировании твердого тела в результате понижения его свободной поверхностной энергии под влиянием активной среды. Молекулярная природа эффекта Ребиндера состоит в облегчении разрыва и перестройки межатомных (или межмолекулярных) связей в твердом теле в присутствии инородных атомов, молекул или ионов.

В физико-химической механике твердых тел рассматривают две основные формы эффекта Ребиндера [4]. Первая форма – охрупчивающее действие среды, в результате которого многократно падает прочность твердого тела; вторая – пластифицирующее действие среды, которое проявляется в виде снижения макроскопического предела текучести, в уменьшении коэффициента упрочнения (при активном силовом нагружении образца) или в увеличении скорости деформации при испытаниях на ползучесть под действием постоянной нагрузки. В практике формирования износостойкого структурного состояния и, следовательно, повышения триботехнической эффективности смазочных материалов наиболее важна вторая форма эффекта – пластифицирование.

Вместе с тем известно, что поверхностно-активная среда может оказывать на реологическое поведение материала не только пластифицирующее, но и упрочняющее влияние [5]. Выражается это в повышении предела текучести и/или коэффициента упрочнения, в уменьшении скорости ползучести материала под постоянной нагрузкой. На молекулярном уровне упрочняющее действие среды обусловлено уменьшением подвижности приповерхностных дислокаций в результате их адсорбционной блокировки [6], тормозящего действия оксидных и пассивирующих пленок [7] и электрохимических явлений на поверхности твердых тел, протекающих в таких средах [8]. В реальных трибосопряжениях в качестве присадок к смазочным материалам используют активные вещества, которые в зависимости от величины и типа механических напряжений, скорости деформации могут оказывать как поверхностно-пластифицирующее, так и поверхностно-упрочняющее действие.

Элементарные процессы зарождения и роста плотности дефектов кристаллической решетки, конечным результатом которых является разрушение тонких поверхностных слоев трибоматериала, связаны прежде всего с развитием дислокационной структуры и перераспределением элементного состава в зоне контактной деформации. В деформированном слое формируется модифицированное структурно-фазовое состояние [5], которое в зависимости от природы среды обладает разными характеристиками механических свойств и разными структурно-чувствительными активационными параметрами разрушения [2].

В данном сообщении представлены результаты исследования структурных изменений и диффузионного перераспределения легирующих элементов в условиях контактной деформации чистых металлов, латуней и бронз при трении в паре со статью в разных смазочных средах и проанализировано их влияние на реализацию положительного градиента механических свойств по нормали к поверхности контактного взаимодействия – необходимого условия реализации режима внешнего трения. Работа представлена тремя частями: 1 - результаты численного моделирования с целью оценки распределения остаточных напряжений в условиях контактной деформации при трении; 2 – результаты рентгеновского исследования структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях металлических материалов в условиях контактной деформации в разных смазочных средах (в базовых маслах и средах с добавками ПАВ) и соответствующие им уровни поверхностного разрушения; 3 – примеры испытаний, иллюстрирующие влияние активных металлоплакирующих присадок к товарным смазочным материалам на работоспособность тяжелонагруженных пар трения.

Материалы и методики исследования. Основным объектом исследования служили антифрикционные пары трения «медный сплав – сталь» и пары трения «сталь – сталь». В качестве антифрикционного сплава испытывали медь, сплавы на основе Cu-Zn (латуни с разной концентрацией цинка), сплавы на основе Cu-Al (бронзы с разной концентрацией алюминия и легированные Mn, Fe, Ni), сплавы на основе Cu-Sn (бронзы с разным содержанием Sn). В качестве смазочного материала применяли медицинское вазелиновое масло, глицерин, минеральные масла, гидравлические жидкости на основе глицерина и промышленные смазочные материалы, в состав которых входили ПАВ: пластичная железнодорожная смазка Буксол (ТУ 0254-107-01124328-01), смазка ПУМА (ТУ32ЦТ2232-97) - полужидкая железнодорожная смазка, моторное масло М-14$В_2$ (ГОСТ 12337-84). Смазочные среды Буксол, Пума, М-14$В_2$ содержали активную медьсодержащую присадку Валена (ТУ 0257-001-17368431-05).

Триботехнические испытания проводили на машине реверсивного трения скольжения МТ-8 в диапазоне давлений 5-140 МПа и средней скорости 0,19 м/сек. Условия испытаний характеризуют тяжелонагруженные трибосопряжения: рабочие поверхности испытывают воздействие знакопеременных сдвиговых деформаций, что обусловливает повышенную концентрацию дефектов кристаллического строения материала зоны контактной деформации. При этом имеет место интенсификация механохимических процессов и эффекта адсорбционного пластифицирования на поверхностях реверсивного трения [9].

Обычно в практике триботехнических испытаний для оценки влияния смазочной среды используются следующие критерии: коэффициент трения в условиях граничного и полужидкостного трения; износ деталей; критическая температура разрушения смазочного слоя; нагрузка, при которой появляются задиры; нагрузка сваривания; отношение предельного значения нагрузки к диаметру пятна износа; краевой угол смачивания и др. Однако, указанные критерии лишь опосредованно указывают на факт влияния ПАВ, без отражения его физико-химической природы. Поэтому в данной работе роль свойств среды и ее поверхностно-активных компонент выявляли с использованием критериальных подходов [10,11], основанных на экспериментально получаемой совокупности данных разных масштабных уровней функционирования трибосистемы: макроскопического интегрального критерия (интенсивности изнашивания, характеризующего уровень поверхностного разрушения, оцениваемой по потере массы образца) и микроскопических критериев (характеризующих структурное состояние зоны контактной деформации и соответственно изменение механических свойств материала).

Для определения структурного состояния металлических материалов использовали два наиболее информационных фундаментальных параметра, отражающих свойства материала деформированного слоя: 1) - физическое уширение $\beta_{(hkl)}$ рентгеновских линий, которое отражает размер областей когерентного рассеяния (микроблоков) в кристалле и микродеформации кристаллической решетки (микронапряжения II рода), соответственно величина $\beta_{(hkl)}$ определяет плотность дислокаций деформированного металла, $\rho=A\beta_{(hkl)}^2$, здесь ρ - плотность дислокаций, $[\rho] = см^{-2}$; A - размерная постоянная, $[A] = (см \cdot рад)^{-2}$; и 2) - период кристаллической решетки a, оцениваемый по смещению дифракционных пиков на рентгенограмме, который определяет сумму главных напряжений I рода в материале - σ и, кроме того, зависит от элементного состава сплава и, следовательно, позволяет анализировать диффузионное перераспределение легирующих элементов в зоне деформации при трении ($\sigma = (E/\mu)ctg\Delta\vartheta$, $a = a_A + \alpha C$, где E – модуль упругости; μ - коэффициент Пуассона; $\Delta\vartheta$ – изменение угла Вульфа-Брэггов; a_A – период решетки растворителя, α – константа; C – атомные проценты растворенного элемента). Рентгеносъемки проводили методом неразрушающего послойного анализа зоны контактной деформации в диапазоне 0,5-10 мкм в Co-Kα излучении.

Результаты исследований и их обсуждение. Известно, что поверхность трения двух шероховатых твердых тел представляет собой набор дискретных контактов, периодически деформирующихся под действием сопряженных микровыступов. После каждого цикла деформации в поверхностном слое металла возникает упруго - пластическая деформация, и формируются остаточные напряжения первого рода, знак и величина которых зависит от соотношения механических характеристик приповерхностного деформируемого микрообъема и внутриобъемной зоны. Распределение и знак остаточных напряжений в зоне контактной деформации являются регулирующими факторами структурообразования (перераспределения дефектов кристаллической решетки, легирующих элементов сплавов,

фазового состава модифицированного слоя) и соответственно формирования совокупности структурно-чувствительных характеристики механических свойств, которые определяют уровень поверхностного разрушения.

Рассмотрим особенности напряженного состояния в условиях контактной деформации. Задача решалась в двумерном приближении методом численного моделирования, использованном для описания процесса прокатки поверхностно-модифицированных полос и тонких фольг [5,10]. Определяли распределение нагружающих и остаточных напряжений в полубесконечном идеально упругопластическом пространстве при вдавливании со сдвигом по его поверхности бесконечно длинного абсолютно жесткого цилиндра. На рис.1 приведены схематические эпюры остаточных напряжений, которые возникают в результате проскальзывания и упруго- пластического деформирования материала под влиянием контактного воздействия модельного цилиндрического микровыступа в случае поверхностно-пластифицирующего (а) и поверхностно-упрочняющего (б) смазочного материала (остальные компоненты тензора остаточных напряжений $\sigma_{rij} \approx 0$).

Расчеты свидетельствуют, что в поверхностно-пластифицированном слое остаточные напряжения после прохождения микровыступа носят сжимающий характер, а в поверхностно-упрочненном – растягивающий. Кроме того, наблюдаются осцилляции напряжений по глубине. На межслойной границе имеет место резкая смена знака остаточных напряжений.

Характер распределения остаточных деформаций, рис.1, дает основание полагать, что в результате деформации в активной смазочной среде формируется поверхностный слой с особыми, отличными от исходного состояния, свойствами, градиентным структурным состоянием. Рассмотрим его основные характеристики.

Наличие на межслойной границе резкой смены знака остаточных касательных напряжений I рода, рис.1, вызывает встречное движение дислокаций с однонаправленными векторами Бюргерса в соседних разнозначно напряженных слоях. Двигаясь в параллельных плоскостях скольжения, дислокации тормозятся на межслойной границе, формируя дислокационную стенку, которая представляет собой простую малоугловую дислокационную сетку. При этом равновесная плотность стеночных дислокаций будет определяться условием силового баланса:

$$\tau^{r}_{z\varphi} - \tau^{r}_{z\varphi} \cdot \tau_{st} / \left| \tau^{r}_{z\varphi} \right| = \tau^{in}_{z\varphi} + \tau^{a}_{z\varphi},$$

где $\tau^{a}_{z\varphi}$ – дальнодействующее упругое напряжение; $\tau^{in}_{z\varphi}$ - внутреннее напряжение в неметаллической решетке, обусловленное дислокациями фона, т.е. ростовыми и неподвижными деформационными дислокациями; $\tau^{r}_{z\varphi}$ – остаточные напряжения I рода; τ_{st} – напряжение старта дислокаций, определяемое трением дислокаций в решетке [5]. Оценка равновесной плотности дислокаций для реальных металлических систем показала, что она примерно на два порядка превышает плотность дислокаций фона (например, при плотности дислокаций фона ($\sim 10^6$ - 10^7) см$^{-2}$ равновесная плотность стеночных дислокаций составляет ($\rho \sim 10^8$ - 10^9) см$^{-2}$.

Процесс концентрации дислокаций на межслойной границе сопровождается очисткой от них приграничных областей металла. Расчеты показывают, что размер таких областей составляет $\delta \sim \rho^{-1/2}$ и по порядку величины совпадает с толщиной поверхностно-модифицированного слоя, достигающей нескольких микрон для типичных схем напряженно-деформированного состояния материала [5,10]. Напряжения II рода, возникающие в дислокационной стенке, стимулируют постепенное отщепление внешнего модифицированного слоя. Этот процесс в первую очередь начинается в тех местах границы, в которых ее упругая энергия становится близкой к значению свободной поверхностной энергии металла. Оценка критической плотности дислокаций в границе перед ее отщеплением для сплавов на медной основе дает

величину $\rho_{max} \approx 10^{14}$-$10^{15}$ см$^{-2}$. Для достижения такой плотности дислокаций необходимы длительные многоцикловые испытания, что подтверждается реальными триботехническими экспериментами [11,12].

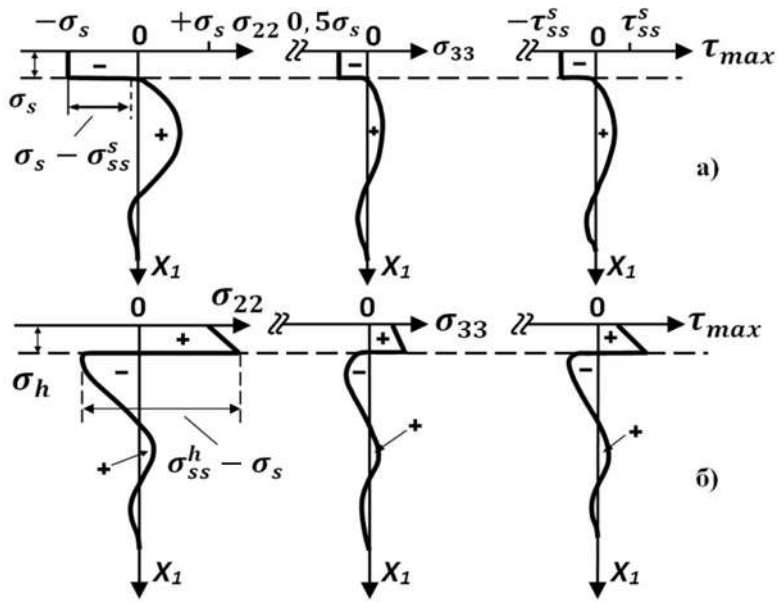


Рис.1. Распределение остаточных нормальных (σ_{22} и σ_{33}) и максимальных касательных ($\tau_{max} = 0,5\ \sigma_{22}$) напряжений в поверхностно-пластифицированном (а) и поверхностно-упрочненном (б) образцах после трибоконтактного воздействия на их поверхность жесткого цилиндрического ползуна.

На рис.2, рис.3 и в табл.1 и представлены экспериментальные данные, иллюстрирующие особенности изменения характеристик структуры в поверхностном деформированном слое при трении технически чистых металлов.

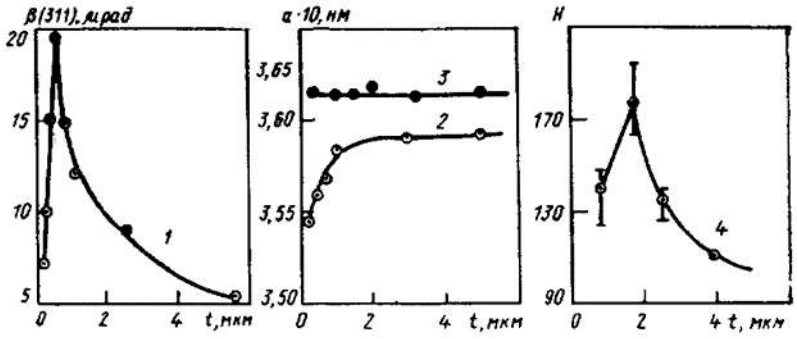


Рис.2. Изменение физического уширения $\beta_{(311)}$ (1), периода кристаллической решетки *a* после трения (2), в исходном состоянии (3) и микротвердости H (4) по глубине зоны контактной деформации меди при трении в глицерине.

Таблица 1

Физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(311)}$ меди после трения при разном количестве циклов испытаний

Число циклов	100	300	600	800	1000	5000	10000	50000	100000	120000	140000
$\beta_{(311)}.10^3$, рад.	31	29	27	27	26	20	17	10	7	5	5

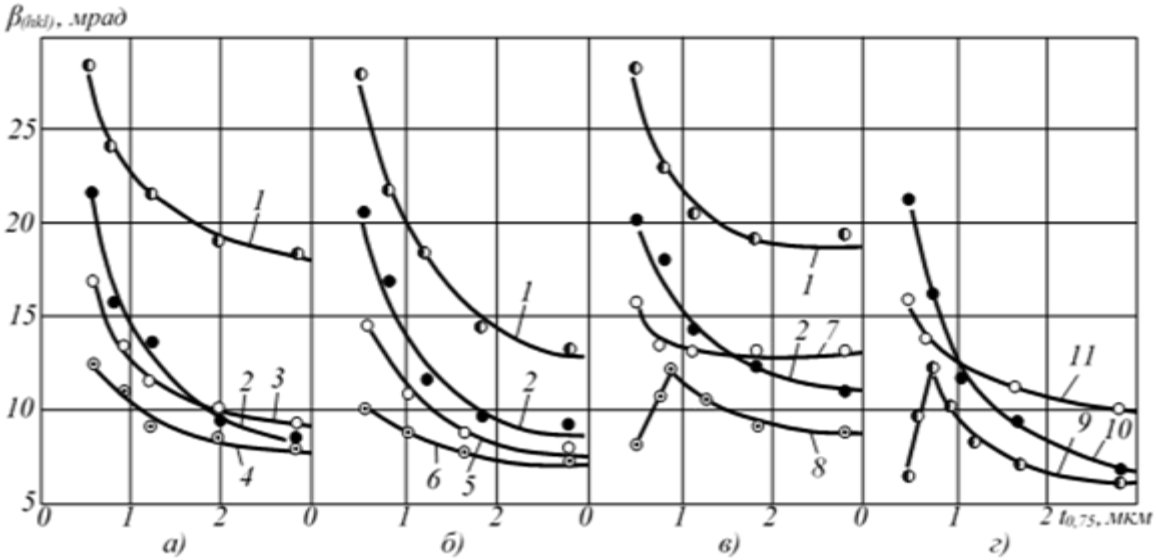


Рис.3. Распределение физического уширения рентгеновских линий по глубине зоны деформации меди (*а*), железа (*б*), никеля (в) при трении в вазелиновом масле с 1% активной добавки: 1- сухое трение; 2 –масло без добавки; 3 – добавка стеариновой кислоты; 4 – олеиновой кислоты; 5 –СЖК C_{17}-C_{20}; 6 –СЖК C_{10}-C_{16}; 7 – Э-2; 8 – Э-1; г – 9 –медь, 10 – железо, 11 – никель в глицерине; (Э-1,Э-2 – синтетические жидкости, применяемые в качестве дисперсионных сред, с разным содержанием хлора и фосфора).

Анализ представленных в табл.1 и на рис.2 и 3 данных с позиций взаимосвязей S = f (δ), δ = f(β), H = f(δ), H = f(β), $\gamma \sim U_0/H_\mu$ (где S - истинные напряжения течения, δ - остаточная деформация, H - твёрдость, H_μ - микротвердость), характеризующих структуру и структурно-чувствительные характеристики механических свойств, подтверждает, что введение активной добавки в состав смазочной композиции оказывает непосредственное влияние на развитие деформационных процессов и структурообразования в зоне контактного взаимодействия. Так как основа смазочного материала является трибохимически инертной, то именно поверхностно-активные вещества снижают величины $\beta_{(311)}$ и *а* в тонком поверхностном слое (и, соответственно, плотность дислокаций в нем и уровень остаточных внутренних напряжений) по сравнению с трением в среде без ПАВ. При этом следует отметить, (см. табл.1), что выход на режим, при котором в полной мере реализуется эффект Ребиндера (т.е. когда значение $\beta_{(hkl)}$ принимает минимальные значения, характерные для чистой меди при данных условиях эксперимента) достигается после достаточно большого числа циклов испытаний. Поэтому есть основания полагать, что для других смазочных материалов, см. рис.3, число циклов испытаний, равное 100000, не достаточно для реализации максимального триботехнического эффекта, когда уровень поверхностного разрушения становится минимальным. Следовательно, эффективность поверхностно-

активных добавок в смазочные материалы проявляется не сразу; требуется определенное значение длины пути трения для конкретных условий испытаний, что согласуется с работой [13], а по данным [14] она также зависит от сочетания давления, скорости скольжения и температуры.

В металлических парах трения один или оба контактирующих тела, как правило, представляют собой сплав. После первых циклов контактного взаимодействия и деформирования в активной среде любого модифицирующего типа в поверхностной деформированной зоне возникают диффузионные потоки вакансий, примесных и легирующих элементов, направленные на то, чтобы привести к релаксации возникшие остаточные напряжения. Имеет место «восходящая» диффузия, в результате которой в сжатых областях поверхностного слоя будет понижаться концентрация элементов, размеры атомов которых превосходят размеры атомов основного металла, а в растянутых областях – наоборот, концентрация этих элементов увеличивается [15].

Изменение концентрации легирующего элемента в напряженной области в результате восходящей диффузии описывается соотношением [5]:

$$(\Delta C)/C \approx \exp\{\delta\omega\,(\Delta\sigma^{r}_{zz} / 3kT)\} - 1,$$

где $\Delta\sigma^{r}_{zz}$ – скачок остаточных напряжений на межслойной границе; $\delta\omega = \omega_A - \omega_B$; ω_A, ω_B – атомные объемы.

В работе [10] показано, что для реальных экспериментов с поверхностно-модифицированными образцами $(\Delta C)/C = 10 - 100\%$ (при $\Delta\sigma^{r}_{zz} \approx \sigma_s = 100 - 1000$ МПа, $\delta\omega = 3\cdot10^{-24}$ см^3). Следовательно, при испытаниях в активных средах происходит существенное расслоение деформированного материала, которое закономерно влияет на структурно-чувствительные характеристики материала приповерхностного модифицированного слоя. Основываясь на экспериментально установленной зависимости предела текучести от концентрации примеси в виде $\sigma_s \approx C^{1/2}$ [16] и учитывая соотношение $\Delta C)/C \rightarrow 1$ получили, что в $\left|\Delta\sigma_s\right| / \sigma_s \approx 50\%$ (см. [5]). Таким образом, только за счет восходящей диффузии может быть достигнуто пятидесятипроцентное изменение предела текучести, что для случая поверхностно-пластифицирующей среды обеспечивает условия реализации правила положительного градиента механических свойств – необходимого условия устойчивого режима трения, высоких антифрикционных свойств и низкого уровня поверхностного разрушения. Иными словами, модифицирование приповерхностных микрообъемов в условиях контактного взаимодействия в активных средах является значимым механо-физико-химическим процессом при граничном трении. В связи с тем, что поверхностные модифицированные микрообъемы формируются в результате взаимодействия со смазочной средой, и они создают продукты износа, то и оценка влияния ее поверхностно-активных компонентов на кинетику разрушения при трении металлических трибосопряжений также должна включать критерии износостойкого структурного состояния зоны деформации.

Рассмотрим особенности процессов структурно-фазовых превращений и поверхностного разрушения латуней (α-сплавов Cu-Zn с широкой областью растворимости в твердом состоянии) при трении в глицерине, который формирует ПАВ-радикалы в процессе деструкции. Результаты соответствующих экспериментов приведены на рис.4.

В отличие от исходного состояния (линии 1), в результате множества циклов контактного воздействия первоначально однородный по составу приповерхностный слой приобретает двухслойную структуру, состоящую из сформировавшегося в результате трения мягкого приграничного слоя меди (линии 2) и субслоя α-твердого раствора цинка в меди с вариативно измененным периодом решетки по глубине (линии 3). Наличие пленки меди

подтверждено анализом с помощью оптической и электронной микроскопии, а ее состав – с помощью микрорентгеноспектрального анализа.

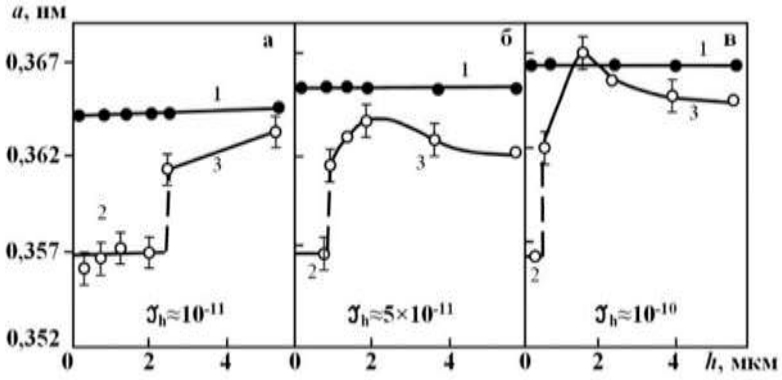


Рис.4. Изменение периода *a* кристаллической решетки α-твердого раствора латуней по глубине зоны деформации при трении в среде глицерина: а – Л90; б – Л80; в– Л63; 1 – α-твердый раствор до трения; 2 – пленка меди, 3 − α-твердый раствор после трения; I_h – интенсивность изнашивания.

Атомы цинка имеют на ~28% больший объем, чем атомы меди, поэтому под действием сжимающих напряжений, рис.1, они удаляются из поверхностного пластифицированного слоя. На поверхности образуется сжатая пленка чистой меди, период решетки которой оказывается заметно меньше равновесного, ср. с данными рис.2. В более глубоком слое толщиной до 5 мкм наблюдается положительный градиент периода решетки α-твердого раствора. Обеднение этого слоя цинком происходит вследствие его восходящей диффузии, стимулированной сжимающими напряжениями в материале. В макроскопическом масштабе этот случай соответствует режиму избирательного переноса, когда уровень поверхностного разрушения характеризуется предельно низкими значениями и существенным увеличением ресурса работы трибосопряжения [17].

При увеличении концентрации цинка в латунях Л80 и Л63 (рис. 4б и 4в) также создается двухслойная структура зоны деформации, однако толщина пластифицированной пленки меди существенно меньше (~ 1мкм в Л80 и ~ 0,5 мкм в Л63). В этих сплавах кривая изменения периода решетки твердого раствора имеет максимум в глубине зоны деформации, что указывает на формирование локальных неоднородностей сплава, являющихся причиной увеличения интенсивности изнашивания в пределах значений, характерных для явления избирательного переноса: для Л90 $I_h \sim 10^{-11}$; для Л80 $I_h \sim 5\cdot10^{-11}$; для Л63 $I_h \sim 10^{-9} - 10^{-10}$.

Алюминиевые бронзы имеют более узкий интервал α-твердого раствора (~9%Al), поэтому переход пары в режим высокой работоспособности (т.е. избирательного переноса при трении) сопровождается несколькими типами структур, рис.5.

В сплавах с низкой концентрацией алюминия (бронзы БрА5, БрА7, ≈5-7%Al), рис.5а, наблюдается характерный для явления избирательного переноса процесс диффузионного перераспределения элементов в зоне деформации в результате воздействия поверхностно-активной среды: при наличии сжимающих остаточных напряжений I рода в пластифицированном приповерхностном слое образца наблюдается омеднение и формировании новой фазы – сплошной медной пленки. Сформировавшаяся композиционная структура модифицированного слоя обеспечивает поддержание положительного градиента механических свойств, и уровень поверхностного разрушения достигает предельно низких значений ($I_h \sim 10^{-11}$).

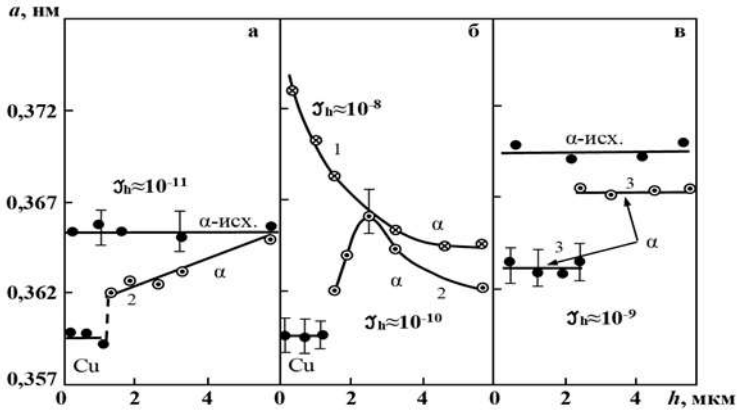


Рис.5. Изменение периода кристаллической решетки α–твердого раствора алюминиевых бронз по глубине зоны деформации при трении в разных смазочных средах: а – БрА7; б – БрАМц9-2; в–БрАЖМц10-3-1,5; 1– этиленгликоль (этандиол-1,2); 2 – жидкая смесь на основе глицерина (ПГВ); 3 – ЦИАТИМ-201; I_h – интенсивность изнашивания; Р=10МПа.

При трении в среде глицерина бронз БрАМц9-2 (концентрация алюминия ≈9%), рис.5б, пластифицированный слой соответствует не всей зоне контактной деформации: имеет место омеднение поверхности и обеднение атомами алюминия слоя лишь до глубины 2 мкм. На глубинах более 2 мкм, т.е. во внутриобъемной, не пластифицированной зоне, происходит обогащение легирующими элементами, создавая структурную неоднородность. В макромасштабе этот тип структуры хотя и соответствует режиму избирательного переноса (реализуется положительный градиент свойств и формируется пластифицированная пленка меди), но уровень поверхностного разрушения, вследствие структурной неоднородности материала в зоне контактной деформации, несколько выше, чем разрушение бронз с более низкой концентрацией алюминия.

При трении в этиленгликоле картина структурных изменений иная (кривая 1, рис. 5б). Марганец, оказываясь на межфазных границах и являясь сильным раскислителем, способствует образованию на поверхности бронзового образца плотной пассивирующей оксидной пленки. В этих условиях двухатомный спирт (этандиол-1,2) уже не может оказывать пластифицирующее действие на слой образца под оксидной пленкой. Наоборот, этот слой под влиянием оксидной пленки становится более упрочненным, чем внутриобъемная зона. В результате механического воздействия в приповерхностном микрообъеме трибоматериала возникают растягивающие напряжения, рис.1б, приводящие к увеличению концентрации алюминия в нем (период решетки α-твердого раствора увеличивается). В макромасштабе такие процессы приводят к повышенному разрушению поверхности трения при увеличении числа циклов испытаний.

При более высокой концентрации алюминия в бронзе типа БрАЖМц10-3-1,5 (≈ 10%Al) картина структурно-фазовых превращений при трении в поверхностно-активной смазочной среде изменяется. Концентрация алюминия в этой бронзе соответствует точке на фазовой диаграмме, находящейся вне области существования α-твердого раствора. Поэтому бронза является многофазной и обладает более высокими прочностными характеристиками, что обусловливает ее широкое применение в разнообразных антифрикционных парах трения. Рис.5в иллюстрирует фазовый состав зоны деформации и изменение периода

кристаллической решетки основных структурных составляющих, формирующихся при трении в смазочной среде ЦИАТИМ-201. Напомним, что ЦИАТИМ-201 - это смесь маловязкого нефтяного масла, загустителя (стеарата лития - литиевого мыла) и антиокислительной присадки, т.е смазочная среда содержит пластифицирующие ПАВ и компоненты, препятствующие образованию на поверхности трибоматериала упрочняющих оксидных пленок.

В зоне контактной деформации в бронзе БрАЖМц10-3-1,5 также, как и в бронзе БрА7, создается резкий положительный градиент параметра решетки, обусловленный перераспределением легирующих элементов, рис.5в. Таким образом, создаются условия для формирования износостойкого структурного состояния материала. Однако главным фактором, определяющим возможность устойчивого функционирования этого режима, является формирование в зоне контактной деформации двух метастабильных фаз – кристаллографически изоструктурных α-твердых растворов с ГЦК-решеткой, обладающих разной концентрацией легирующих элементов и различными периодами решетки 0,363 нм и 0,366 нм (по данным микрорентгеноспектрального анализа в этих фазах концентрация Al составляет 4%, Mn - 0,6% и Al - 7,5%, Mn - 0,7%, соответственно). Слой с более высокой концентрацией меди (с меньшим периодом решетки, рис.5в) преимущественно занимает микрообъем, прилегающий к свободной поверхности. Аналогичная картина структурно-фазовых превращений наблюдается и при контактной деформации бронз БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4. Заметим, что расслоение металлов и появление гетерофазности наблюдается также при облучении, после ударно-волновой обработки, механоактивации, поверхностной деформации. Отмечается, что по признаку резкого изменения свойств материала, включающего явление его пространственной самоорганизации, это структурное состояние идентифицируется как диссипативная структура, присущая открытой термодинамической системе, функционирующей в нелинейной области ее параметрических зависимостей.

Анализ состава фаз показывает, что в этих случаях на сопряженную стальную поверхность переносится не чистая медь, а сплав, обогащенный медью, характеристики которого соответствуют вторичной структуре на поверхности образца из медного сплава. Основываясь на структурных критериях [11,12], можно заключить, что при этом достигается лишь стадия формирования структурных предпосылок для реализации полноценного режима избирательного переноса, поэтому износ бронзы в данном случае оказывается выше. Как показали экспериментальные исследования, для реализации эффекта максимальной износостойкости высокопрочных комплекснолегированных (или высокоэнтропийных) бронз необходимо увеличение контактного давления и/или активности смазочной среды, приводящих к активизации процесса обеднения легирующими примесями α-твердого раствора на основе меди и формирование пластифицированной пленки меди [17], что подтверждают опытные данные [18].

На основании представленных результатов исследований можно сделать следующий вывод. При использовании алюминиевых бронз в качестве антифрикционного материала для узлов трения, эксплуатация которых осуществляется с применением поверхностно-активной смазочной среды, достаточно длительная работоспособность таких узлов может обеспечиваться трибоматериалом, представляющим собой однофазный сплав с большим запасом пластичности. Наиболее перспективной в этом случае проявила себя однофазная бронза с 5−7% Al.

С позиций влияния поверхностно-активных компонентов смазочной среды на формирование структурного состояния зоны деформации и кинетику разрушения при трении рассмотрим теперь группу оловянных бронз - сплавы на основе системы Cu-Sn, которая характеризуется ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. В промышленных бронзах

благодаря термической обработке концентрация олова в α-твердом растворе может быть более 6%, т.е. основная структурная составляющая является пересыщенным твердым раствором (напомним, что растворимость олова в меди в равновесном состоянии составляет не более 0,1%). Прочностные характеристики бронз тем выше, чем выше концентрация олова в сплаве. В инженерно-конструкторской практике при выборе бронзы для узла трения руководствуются чаще всего именно значением ее прочностных характеристик. Однако результаты реальной эксплуатации указывают, что если в составе смазочного материала присутствуют ПАВ, то износостойкость высокооловянистых бронз оказывается существенно ниже, чем низкооловянистых.

Рис.6 иллюстрирует кинетику разрушения оловянных бронз при трении в разных смазочных средах.

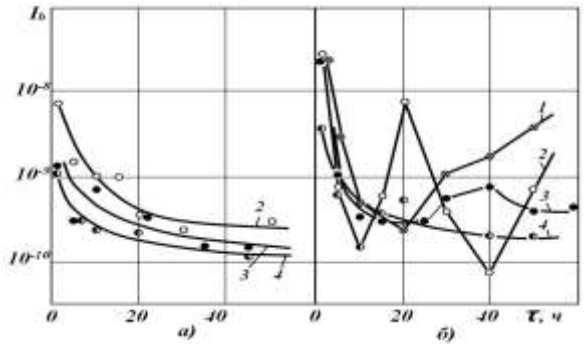


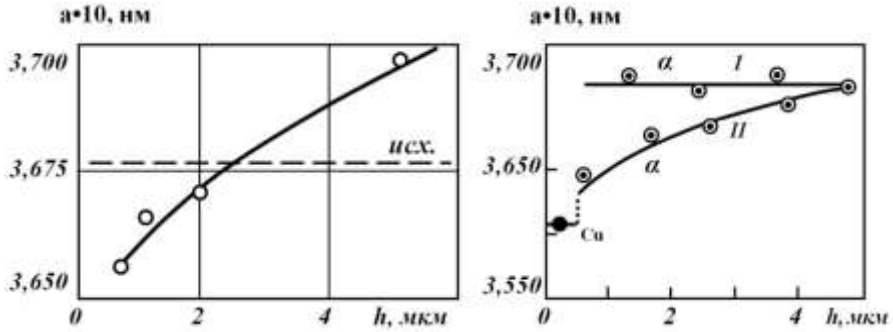
Рис.6. Зависимость интенсивности изнашивания I_h бронз от продолжительности испытаний τ в разных смазочных средах: а – веретенное масло АУ; б – жидкость на основе глицерина (ПГВ): 1-БрО12; 2-БрОФ10-1; 3-БрОФ6,5-0,15; 4-БрОФ4-0,25.

Проявляется разный характер поверхностного разрушения сплава при увеличении времени испытаний в зависимости от природы смазочной среды и количества олова в сплаве. В химически инертной смазочной среде трение подчиняется закону нормального изнашивания вне зависимости от концентрации олова в сплаве: приработка сменяется режимом установившегося трения, см. рис.6*а*. Сопоставление экспериментальных значений интенсивности изнашивания для разных временных интервалов трибоиспытаний τ позволяет четко отличить режим накопления повреждаемости и последующего разрушения приконтактного слоя материала (его приработки) от режима установившегося равновесного трения. В последнем случае темпоральные колебания величины износа относительно невелики и его среднее значение снижается до величины $\langle I_h \rangle \sim (1 - 2)\cdot 10^{-10}$.

Среда, содержащая ПАВ, создает другую картину кинетики изнашивания (рис. 6*б*). Поверхностные слои высокооловянистых бронз при увеличении числа циклов испытаний претерпевают периоды колебаний от низкого износа и до высокого более, чем на два порядка (установившийся режим не достигается даже после ~145000 циклов взаимодействий). Бронза с меньшим содержанием олова (4%Sn, БрОФ4-0,25) характеризуется выходом пары на установившийся уровень поверхностного разрушения и его существенным снижением. Следует также отметить, что сравнительные оценки механических потерь трибопар «медный сплав – сталь», где в качестве антифрикционного материалы были использованы медь М1, бронзы БрОФ6,5-0,15 и БрОФ1-1, показали, что присутствие в сплаве 6,5%Sn в два раза уменьшает значение коэффициента трения по сравнению с чистой медью, однако его величина на порядок выше, если в сплаве концентрация олова составляет 10%.

Результаты сопоставления эпюры компонент остаточных напряжений, рис.1а, и уровня разрушения, рис.6б, дают основания полагать, что кинетика разрушения поверхностного слоя бронзы в паре трения оловянная бронза – сталь связана с процессом диффузионного перераспределения олова в зоне контактной деформации под влиянием поверхностно-активной смазочной среды.

На рис. 7 приведены результаты рентгеноструктурного анализа поверхностного слоя бронз до и после трения. Трение в поверхностно-пластифицирующей среде вызывает формирование положительного градиента периода решетки в результате обеднения оловом приповерхностного слоя в условиях восходящей диффузии. В бронзе с малым содержанием олова (БрОФ4-0,25, рис.7б), формируется характерная для режима высокой работоспособности пары трения структура: создается положительный градиент периода решетки по глубине пластифицированного слоя антифрикционного сплава, а на поверхности формируется сплошная пленка чистой меди (аналогично результатам, наблюдающимся при трении сплавов Cu-Zn и Cu-Al), а износостойкость бронзы существенно повышается, рис.6*б* (кривая 4). В сплавах с высокой концентрацией олова (БрОФ10-1, рис.7*а*) также создается положительный градиент периода кристаллической решетки, и на поверхности трибоматериала формируется медная пластифицированная пленка. Однако при достаточно длительных испытаниях она периодически разрушается образующимися интерметаллидами (на рис. 7*а* зафиксировано состояние образца, когда пленка разрушена), и износ в эти временные отрезки резко повышается, рис.6*б* (кривая 2). Следовательно, хотя и создаются структурные предпосылки реализации формирования износостойкого структурного состояния, однако, вследствие того, что α-твердый раствор Cu-Sn является пересыщенным, пластифицированный поверхностный слой претерпевает существенные изменения в фазовом составе (см. табл.2), которые неблагоприятно сказываются на износостойкости.



а) *б)*

Рис.7. Изменение периода кристаллической решетки α-твердого раствора Cu-Sn бронзы БрОФ10-1(*а*) и БрОФ4-0,25 (*б*) по глубине зоны деформации при трении в среде на основе глицерина: I – до трения; II – после трения в установившемся режиме.

На рентгенограммах исходного образца выявлены две фазы: α-твердый раствор Cu-Sn и небольшое количество интерметаллида $Cu_{31}Sn_8$, входящего в состав эвтектоида (α+δ). После трибоиспытаний интенсивность рентгеновских линий (551) и (882), принадлежащих фазе $Cu_{31}Sn_8$, увеличивается в результате увеличения в поверхностном слое объемной доли интерметаллида. Вместе с тем, на рентгенограммах появляются соответствующие этой фазе дополнительные рефлексы, что подчеркивает существенное увеличении ее объема. Кроме того, в поверхностных слоях сплава появляется фаза Cu_3Sn. В процессе трения в неактивном смазочном материале подобные структурные изменения не выявлены.

Таблица 2

Изменение фазового состава поверхностного слоя бронзы БрОФ10-1 в результате трения в поверхностно-активной смазочной среде

Исходный образец			Образец после трения		
(HKL)	d/n, нм	Фаза	(HKL)	d/n, нм	Фаза
(551)	0,251	$Cu_{31}Sn_8$	(551)	0,251	$Cu_{31}Sn_8$
(882)	0,211	$Cu_{31}Sn_8$	(002)	0,216	Cu_3Sn
(111)	0,211	α	(882)	0,211	$Cu_{31}Sn_8$
(200)	0,184	α	(111)	0,210	α
(220)	0,130	α	(101)	0,208	Cu_3Sn
(311)	0,111	α	(200)	0,185	α
(222)	0,105	α	(884)	0,149	$Cu_{31}Sn_8$
-	-	-	(220)	0,129	α
-	-	-	(12.66)	0,122	$Cu_{31}Sn_8$
-	-	-	(16.22)	0,110	$Cu_{31}Sn_8$
-	-	-	(311)	0,109	α
-	-	-	(222)	0,105	α

Таким образом, под влиянием поверхностно-пластифицирующей смазочной среды при трении бронз с высокой концентрацией олова в поверхностном слое формируется не только направленный к поверхности диффузионный поток атомов олова с последующим их растворением в смазочной среде, создающий положительный градиент периода кристаллической решетки по толщине слоя и приводящий к формированию приграничной медной пленки. Одновременно в приповерхностном слое трибоматериала также происходят локальные диффузионные процессы, приводящие к образованию/росту в системе новых метастабильных фаз. Такие структурные фазовые переходы инициируются флуктуационным («спинодальным») изменением концентрации атомов олова в соседних микрообъемах деформированной зоны и последующей их структурной перестройкой с образованием кристаллической решетки новой фазы. Эти изменения фазового состава трибоматериала могут происходить в неблагоприятном для его механической стабильности направлении и зачастую являются причиной его повышенного износа.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что на создание износостойкого структурного состояния материала поверхностного деформированного при трении слоя определяющее действие оказывает смазочный материал, обладающий способностью к физико-химическому взаимодействию с металлом, обеспечивая существенное повышение работоспособности трибосопряжения. Поэтому в настоящее время для стальных пар трения особое место в проблеме создания высокоэффективных смазочных материалов занимают разработки активных металлоплакирующих присадок, принцип действия которых основан на реализации явления избирательного переноса. В качестве металлоплакирующих присадок применяют порошки металлов, сплавов и их оксидов, соли и комплексные соединения металлов, металлоорганические соединения. Среди отечественных наиболее известных и широко применяющихся присадок являются МКФ-18 (ТУ 38 1011127), КТЦМС-1 (ТУ 3830109-88), Гретерин-3 (ТУ 38102125-87) [17].

Ниже приведены примеры экспериментальных исследований влияния состава промышленных смазочных материалов Буксол, Пума и М-14В$_2$ с активной присадкой Валена (ТУ 0257-001-17368431-05), содержащей ионы меди, на уровень поверхностного разрушения сталей при трении [19].

На рис.8 представлены зависимости износа от давления *p* при трении пары «ШХ15-ШХ15» в смазке Буксол, в котором стандартный пакет антикоррозионной и противоизносной присадок заменен активной медьсодержащей присадкой известного состава.

Смазка, содержащая 2% присадки (кривая1) проявляет лучшие триботехнические характеристики, чем смазки с 3 и 4% (кривые 2 и 3 соответственно). При трении в среде с 2% металлоплакирующей присадки несущая способность пары в 1,3 раза выше (предельно допустимое давление $P_д$ составляет 40 МПа с 2% и 30 МПа в смазках с 3 и 4%). Коэффициенты трения при $P_д$ в смазке с 2% ниже в 1,7 раза. Средние значения интенсивности изнашивания пары в пределах допустимых давлений в смазке с 2% присадки также снижаются в 1,5-2 раза, табл.3.

В процессе испытаний в смазке с 2% присадки на поверхностях трения образуется тонкая защитная пленка на основе меди, обеспечивающая высокую несущую способность сопряжения и долговечность сопряжения. Следов коррозии на поверхности трения нет. При использовании смазок с 3 и 4% присадки формирующаяся пленка являются пористой, неравномерно распределенной по поверхности трения и приводит к снижению несущей способности сопряжения, что согласуется с известными законами трибологии

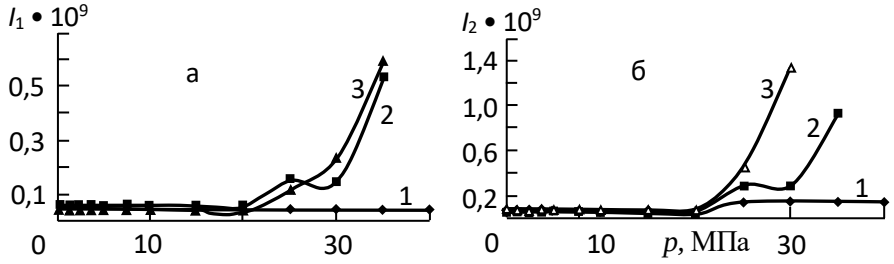


Рис.8. Зависимость интенсивности изнашивания основного образца I_1 - (*а*) и контртела I_2 - (*б*) от давления: 1 – концентрация присадки 2%; 2 – 3%; 3 – 4%.

Для защиты гребней колесных пар и рельсов от износа применяется полужидкая смазка Пума. На рис.9 приведены результаты испытаний пар трения колесная сталь-рельсовая сталь в смазочной среде Пума, в которой стандартный пакет антикоррозионной и противоизносной присадок заменен активной медьсодержащей присадкой. Видно, что лучшие триботехнические характеристики проявляются в среде с содержанием присадки 3%. Применение этой смазки приводит к двукратному увеличению предельно допустимого давления, к снижению суммарных интенсивностей изнашивания более чем в 10 раз, к снижению коэффициента трения в 2 раза по сравнению с товарной Пумой, табл.3.

Анализ морфологии поверхности с помощью светового микроскопа показал, что при испытаниях в товарном масле М-14В$_2$ на поверхности трения формируются участки, подверженные коррозии, их количество возрастает при увеличении внешнего давления. Наличие в смазочном масле медьсодержащей присадки в количестве 0,1% приводит к равномерному омеднению поверхности трения. Следов коррозии не обнаружено.

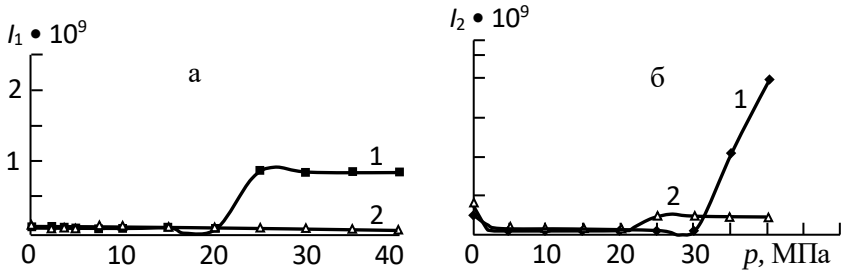


Рис.9. Зависимость интенсивности изнашивания пары трения от давления: *а* –основной образец; *б* –контртело; 1–концентрация присадки 1%; 2 – 3%.

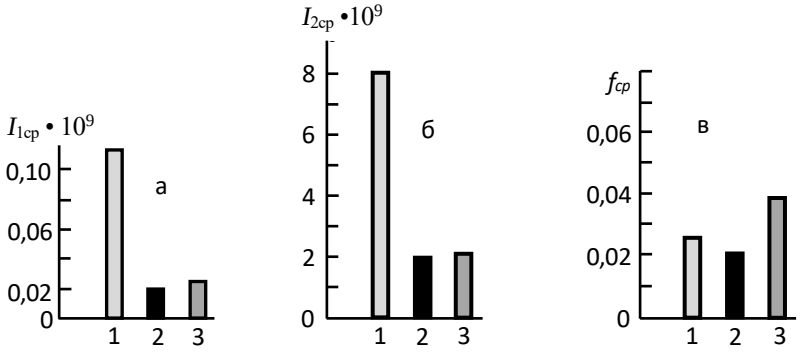


Рис.10. Интенсивность изнашивания образцов-колец (*а*) и образцов-гильз (*б*) за полный цикл испытаний при давлениях до 140 МПа и значения коэффициента трения (*в*) в моторном масле М-14В$_2$ с разной концентрацией присадки: 1 – без присадки; 2 –0,1% присадки; 3 – 0,25%.

В качестве обобщения экспериментальных данных, полученных при испытаниях промышленных смазочных материалов с вышеупомянутыми присадками, в табл.3 приведены средние численные значения триботехнических характеристик трибосопряжений, полученных при их работе в режиме установившегося трения.

Таблица 3

Триботехнические характеристики смазочных материалов

Смазочный материал	Предельно допустимое давление $P_д$, МПа	Коэффициент трения, *f*	Суммарная интенсивность изнашивания, $I_{сум} \cdot 10^9$
Буксол	10	0,040	0,504
Буксол без станд.присадок + 2% присадки	40	0,013	0,046
Пума	20	0,029	0,833
Пума без станд.присадок + 3% присадки	40	0,014	0,074
М-14В$_2$	140	0,063	8,860
М-14В$_2$ + 0,1% присадки	140	0,037	1,893

Положительный эффект применения активной присадки связан с тем, что на поверхности контактного взаимодействия при трении во всех испытанных смазочных композициях формируется вторичная структура в виде защитной медной пленки, обеспечивающей реализацию положительного градиента механических свойств и явление избирательного переноса при трении. Металлическая пленка, благодаря высокой пластичности, дополняет функции смазочного материала при трении в режиме граничной смазки.

Заключение. Для обеспечения высокой износостойкости материалов трибопары, включающей медный сплав, и повышения работоспособности сопряжения определяющим фактором является оптимизация реологических свойств поверхностного слоя, формирующегося в условиях контактной деформации под действием поверхностно-пластифицирующей смазочной среды. Подбирать сочетания конструкционных и смазочных материалов необходимо так, чтобы создавались условия для реализации правила положительного градиента механических свойств по нормали к поверхностям трения. В этом случае сдвиговые упругопластические деформации концентрируются в тонком приповерхностном объеме материала, что и обеспечивает минимальный уровень разрушения поверхности трибосопряжения.

Расчеты распределения остаточных нормальных напряжений по глубине поверхностного деформированного при трении слое свидетельствуют, что в поверхностно-пластифицированном слое они носят сжимающий характер, а в поверхностно-упрочненном – растягивающий. При деформационном нагружении материала в активной среде в сжатых областях материала снижается концентрация легирующих элементов, в растянутых областях имеет место обратная картина. Вследствие восходящей диффузии происходит расслоение материала по составу, и кроме того, наличие на межслойной границе резкой смены знака остаточных напряжений I рода приводит к встречному движению дислокаций с однонаправленными векторами Бюргерса в соседних разнозначных напряженных слоях. Двигаясь в параллельных плоскостях скольжения, дислокации тормозятся на межслойной границе, формируя дислокационную стенку. При этом в процессе увеличения числа циклов взаимодействий процесс концентрации дислокаций на межслойной границе сопровождается очисткой от них приграничных областей металла. В результате на поверхности трибоматериала образуется сплошная пластифицированная медная пленка, обладающая уникальными реологическими свойствами и обеспечивающая положительный градиент механических свойств в трибообразце.

Наибольший ресурс работы трибопары в смазочной среде с ПАВ достигается в результате роста износостойкости медного сплава при относительном снижении твердости и повышении пластичности его приповерхностного слоя. При этом снижение твердости, обусловленное пластифицирующим действием поверхностно-активных веществ, происходит только в поверхностном деформированном микрообъеме; во внутриобъемной зоне, не пластифицированной действием смазочной среды, механические характеристики антифрикционного сплава остаются на требуемом уровне.

Установлены следующие правила выбора составов медных сплавов, реализующих устойчивый режим избирательного переноса, когда достигается наиболее высокая износостойкость:

- предпочтительны сплавы с широким температурным и концентрационным интервалом α-твердого раствора;
- при выборе состава алюминиевой бронзы следует руководствоваться тем, что для этих материалов существует несколько вариантов достижения режима избирательного переноса:

1 – при малой концентрации алюминия (БрА5,БрА7) возможность реализации высокой износостойкости наиболее вероятна;
2 – для бронз типа БрАМц9-2, БрАЖ9-4 в зависимости от свойств среды возможны три типа структуры зоны трибодеформации: а) неоднородный α-твердый раствор, когда условия организации износостойкого структурного состояния нарушаются; б) два кристаллографически изоструктурных α-твердых раствора, обеспечивающие создание предпосылок износостойкой структуры; в) пленка меди и подповерхностный неоднородный α-твердый раствор, что создает условия нестабильного режима избирательного переноса;
3 – для высокопрочных бронз типа БрАЖМц10-3-1,5 и БрАЖН10-4-4 создание износостойкого состояния поверхностного слоя осуществляется в две стадии: а) образования двух изоструктурных α-твердых растворов и б) вытеснения на поверхность обогащенной медью фазы с последующим созданием пластифицированной медной пленки;
- для оловянных бронз необходимо исключить возможность фазовых переходов, связанных с локальными изменениями концентрации атомов олова в соседних микрообъемах деформированной зоны и последующей структурной перестройкой этих микрообъемов с образованием кристаллической решетки новой фазы (эта задача может быть решена за счет направленного легирования и/или применения низкооловянистых бронз типа БрОФ4-0,25).
Представленные материалы не содержат исчерпывающего описания многочисленных механо-физико-химических процессов, протекающих в трибосопряжениях и связанных с влиянием смазочной среды и ее поверхностно-активных компонентов на формирование структурного состояния зоны деформации и кинетику разрушения антифрикционных материалов. Отмечены лишь основные внутренние связи и взаимозависимости, которые устанавливаются в сложной самоорганизующейся, иерархически многоуровневой системе – в зоне контактной деформации при трении. При этом для пар трения, реализующих режим избирательного переноса, ключевая роль принадлежит эффекту Ребиндера.

Список литературы

1. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // ФТТ. - 1980. - Т.22, Вып.2. - С.3344-3349.
2. Громаковский Д.Г. Разрушение поверхностей при трении и разработка кинетической модели изнашивания //Вестник машиностроения. - 2000. - №1. - С.3-9.
3. Щукин Е.Д., Амелина Е.А., Качанова Л.А., Савенко В.И. Физико-химическая механика контактного взаимодействия // Трение и износ. - 1980. - №2. - С.247-262.
4. Щукин Е.Д., Савенко В.И., Малкин А.И. Лекции по физико-химической механике. - М.: NOBEL PRESS, 2015. - 679 с.
5. Савенко В.И. Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике //Эффект безызносности и триботехнологии. - 1994. - №3-4. - С.26-38.
6. A.R.C. Westwood, J.S. Ahern, J.J. Mills. Development in the theory and applications of chemomechanical effects //Colloids and Surfaces. - 1981. - V.2, №1. - P. 1 – 35.
7. Shchukin E.D., Kochanova L.A., Savenko V.I. On mechanism of environment-induced plasticizing under contact interaction // Advances in mechanics and physics of surfaces. Eds. R.M. Latanision, R.J. Courtel. - London: Harwood academic publishers, 1981. - V.1. - P.111-152.
8. Щукин Е.Д., Савенко В.И., Качанова Л.А. Роль поверхности и среды в переходах упругость-пластичность-хрупкость в металлических кристаллах // Поверхность. - 1982. - №2. - С.25-41.

9. Евдокимов В.Д. Реверсивность трения и качество машин. - Киев: Техника, 1977. - 146 с.
10. Савенко В.И., Щукин Е.Д. О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. - 1987. - Т.8, №4. - С. 581-589.
11. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Physical criteria of wear resistance of metal materials in surface-active lubricating media. Proc. The Conference on Tribology «Friction, Lubrication and Wear – 50 years on». - London: IME, 1987. - P. 419-426.
12. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
13. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Избирательный перенос: мифы и реалии // Вестник РГУПС. - 2011. - №4. - С.43-51.
14. Кужаров А.С., Бурлакова В.Э., Задошенко Е.Г., Кужаров А.А., Бурлов А.С., Ураев А.И., Кравчик К., Гарновский А.Д. Триботехнические возможности координационных соединений меди при трении бронзы по стали // Трение и износ. - 2005. - Т26, №6. - С. 628-637.
15. Гегузин Я.Е. Восходящая диффузия и диффузионное последействие. // Успехи физических наук. – 1986. - Т.149, №1. - С.149–159. DOI:https://doi.org/10.3367/UFNr.0149.198605f.0149
16. Флейшер Р., Хиббард У. Упрочнение при образовании твердого раствора // Структура и механические свойства металлов. - М.: Металлургия, 1967. - С.85-111.
17. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 237 с.
18. Куксенова Л.И., Дякин С.И., Титов В.В., Громаковский С.Д., Вячеславова Л.А., Рыбакова Л.М. Влияние структурных изменений и свойств поверхностных слоев материалов на несущую способность и долговечность шарнирно-болтовых соединений // Трение и износ. - 1988. - Т.9, № 3. - С. 422-423.
19. Мамыкин С.М., Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. Исследование триботехнической эффективности металлоплакирующей присадки «Валена» в смазочных материалах // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2007. - №2. - С.56-64.

Дата поступления: 25 сентября 2023 г.

DOI: 10.18411/vntr2023-170-3

УДК 621.9.06

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОРРЕКЦИИ ОТКЛОНЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ С ЧПУ ПРИ НАЛИЧИИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ЗАЗОРА В СРЕДЕ MATLAB – SIMULINK

© Николай Алексеевич Серков[1], Олег Викторович Пась[2]
[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
Serkov1943@mail.ru
[2]АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева», Москва, Россия

Аннотация. *Приведены результаты исследование процессов коррекции отклонения траектории движения исполнительного органа многокоординатной машины с ЧПУ при наличии кинематического зазора в среде Matlab – Simulink. Исследованы два метода коррекции: 1 - коррекция по возмущению и 2 – коррекция методом самонастройки.*
Ключевые слова: *кинематический зазор, отклонение от заданной траектории, коррекция по возмущению, коррекция методом самонастройки, Matlab – Simulink.*

Работа выполнена в ИМАШ РАН в рамках бюджетного финансирования по теме: «Получение концептуальных и теоретических основ активных пространственных модульных структур с адаптивной кинематикой для создания роботизированных комплексов». 2022 – 2026 гг.

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF CORRECTION OF THE DEVIATION OF THE TRAJECTORY OF THE EXECUTIVE BODY OF A MULTI–AXIS CNC MACHINE IN THE PRESENCE OF A KINEMATIC GAP IN THE MATLAB - SIMULINK ENVIRONMENT

© N.A. Serkov[1], O.V. Pas[2]
[1] Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Serkov1943@mail.ru
[2] FSUE "NPO "Technomash", Moscow, Russia

Abstract. *The results of the study of the processes of correcting the deviation of the trajectory of the executive body of a multi–axis CNC machine in the presence of a kinematic gap in the Matlab - Simulink environment are presented. Two correction methods are investigated: 1 - correction by perturbation and 2 – correction by self-adjustment.*
Keywords: *kinematic gap, deviation from a given trajectory, perturbation correction, self–adjustment correction, Matlab - Simulink.*

Acknowledgements. *The work was carried out at IMASH RAS within the framework of budget financing on the topic: "Obtaining conceptual and theoretical foundations of active spatial modular structures with adaptive kinematics for the creation of robotic complexes". 2022 – 2026.*

Введение. Развитие машиностроения тесно связано с совершенствованием технологического оборудования, а именно, с повышением быстродействия и точности выполняемых на нем операций. В связи с этим постоянно возрастают требования к повышению точности движения исполнительных органов технологического оборудования с ЧПУ.

Среди многочисленных факторов, вызывающих искажения заданной траектории движения рабочих органов многокоординатного станка с ЧПУ, следует особенно выделить динамические факторы, проявляющиеся в процессе движения одних деталей и узлов относительно других. К таким факторам, в первую очередь, относятся: зазоры в подвижных соединениях, силы трения, силы инерции, силы рабочих процессов и деформации.

Вредное влияние указанных факторов на точность воспроизведения пространственной траектории рабочих органов пытаются уменьшить совершенствованием конструкции и методами цифровой коррекции через систему ЧПУ.

В качестве удачных решений совершенствования конструкции многоцелевых станков с ЧПУ можно отметить [1]:

1) переход от конструкций с зазорами к конструкциям с натягом (направляющие качения, ШВП),

2) уменьшение количества звеньев в приводах – переход к приводам «прямого» действия (direct drive) с современными датчиками обратной связи,

3) применение механизмов с параллельной кинематикой,

4) применение встроенных в системы ЧПУ высокоскоростных компьютеров и др.

Конструктивными методами удаётся существенно уменьшить вредное влияние зазоров, сил трения и гистерезиса в деформируемых элементах несущей системы на точность воспроизведения заданной траектории, но, только, до определенного предела. Вредное влияние указанных факторов особенно сильно начинает сказываться в работе прецизионных машин с допусками на точность воспроизведения траектории в пределах 0,1 – 10 мкм [2-5].

В работах [6,8] рассмотрено влияние «геометрического» (кинематического) зазора на точность воспроизводства траектории на многокоординатных машинах с ЧПУ. На рис. 1 представлена модель механизма перемещения массы М2 под действием массы М1 при наличии зазора [6], а на рис. 2 показано, как трансформируется в квазистатическом режиме перемещение X1 = sin (ωt) массы М1 (входной сигнал) в перемещение М2 (выходной сигнал) при наличии зазора. Здесь: Синяя кривая – входной сигнал без коррекции (б.к.), красная кривая – выходной сигнал без коррекции (б.к.), жёлтая кривая – входной сигнал с коррекцией (с к.), зелёный сигнал – выходной с коррекцией (с к.).

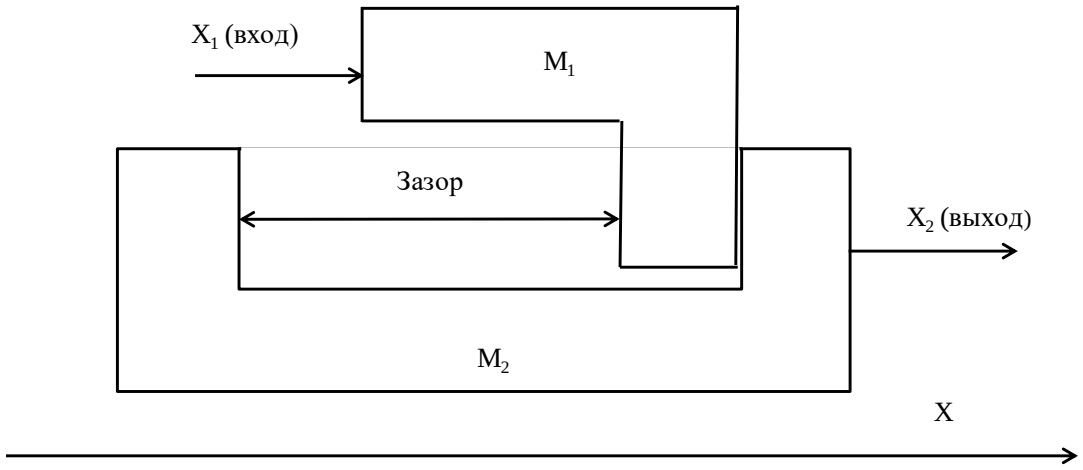


Рис. 1. Модель «геометрического» (кинематического) зазора в механической системе.

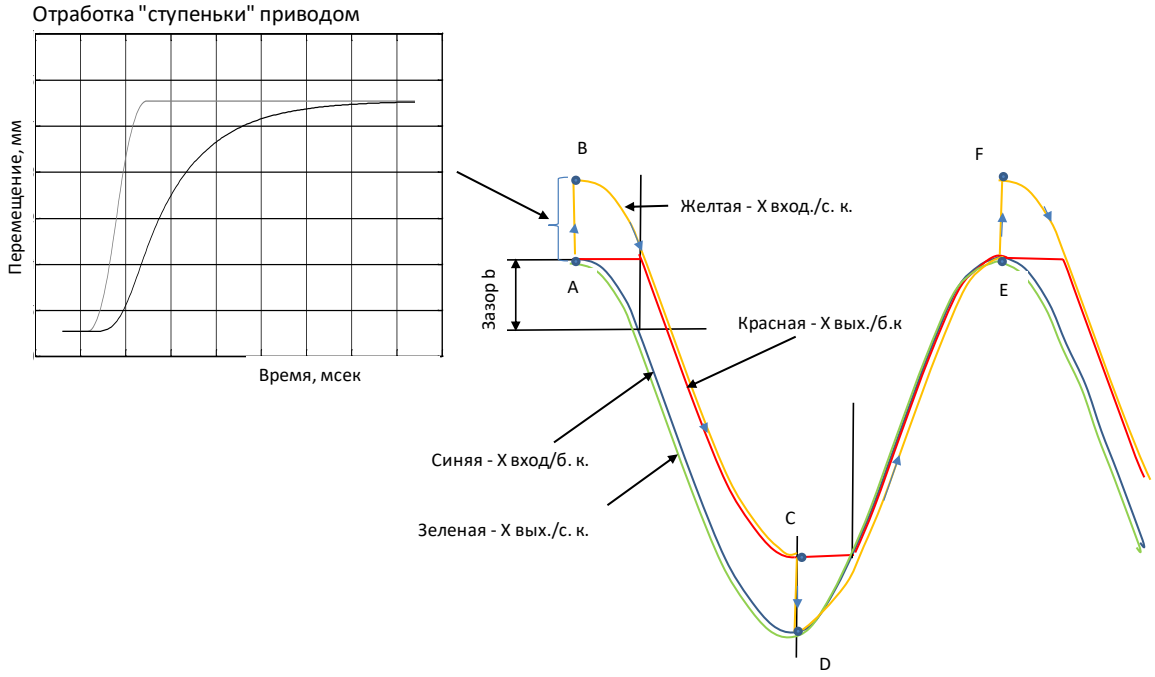
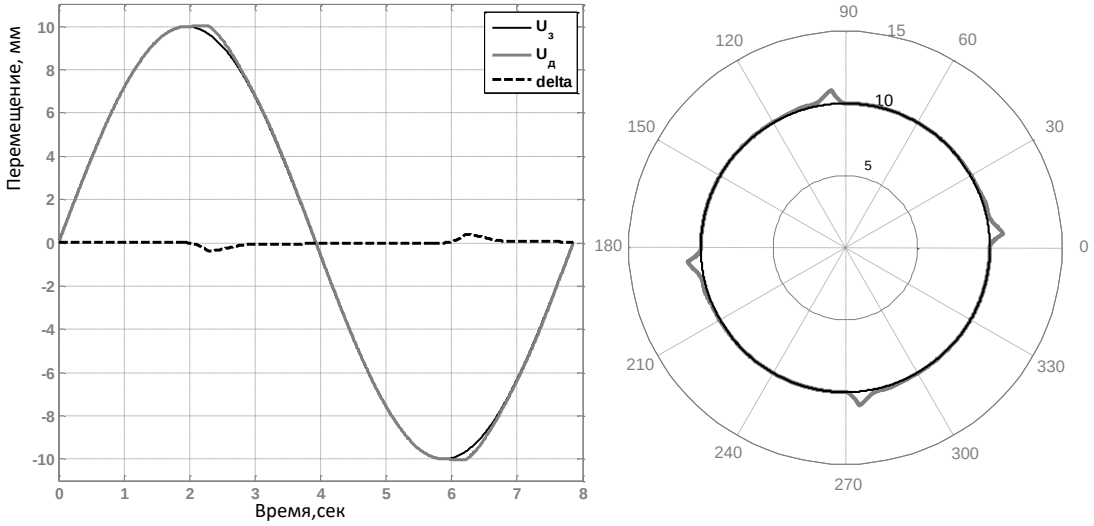


Рис. 2. Влияние зазора на «отработку» входного перемещения $X_1 = \sin(\omega t)$ в квазистатическом режиме.

Поведение системы с зазором, охваченным обратной связью рассмотрено в работе [6]. При отработке зазора наблюдается характерный всплеск, показанный на рис. 3.

Здесь: Радиус эталонной окружности – 10 мм, зазор – 0,4 мм, обход против часовой стрелки. Для построения указанных отклонений в полярной системе координат используются блоки U_zad и U_delta передачи данных из Simulink в Matlab.



а) б)

Рис. 3: а) Отклонения при воспроизведения эталонного движения - синусоиды (амплитуда – время) при наличии зазора в механической части, охваченной обратной связью. б) Отклонения от воспроизведения эталонной окружности в полярной системе координат.

На рис. 4 представлена схема прохождения сигнала задания движения по одной управляемой координате в типовой схеме станка с ЧПУ в случае, когда в НС станка имеется зазор (погрешность обратного хода), не охваченный обратной связью следящего привода.



Рис. 4. Схема «прохождения сигнала» в станке с ЧПУ с зазором в НС, не охваченном обратной связью.

Прохождение сигнала в системе по рис. 4 можно исследовать с помощью модели в среде Matlab - Simulink, представленной на рис. 5. На графиках по оси абсциссы отложено время, сек, а по оси ординаты – перемещение в условных единицах, задаваемых в блоках: Sine Wave, Backlash.

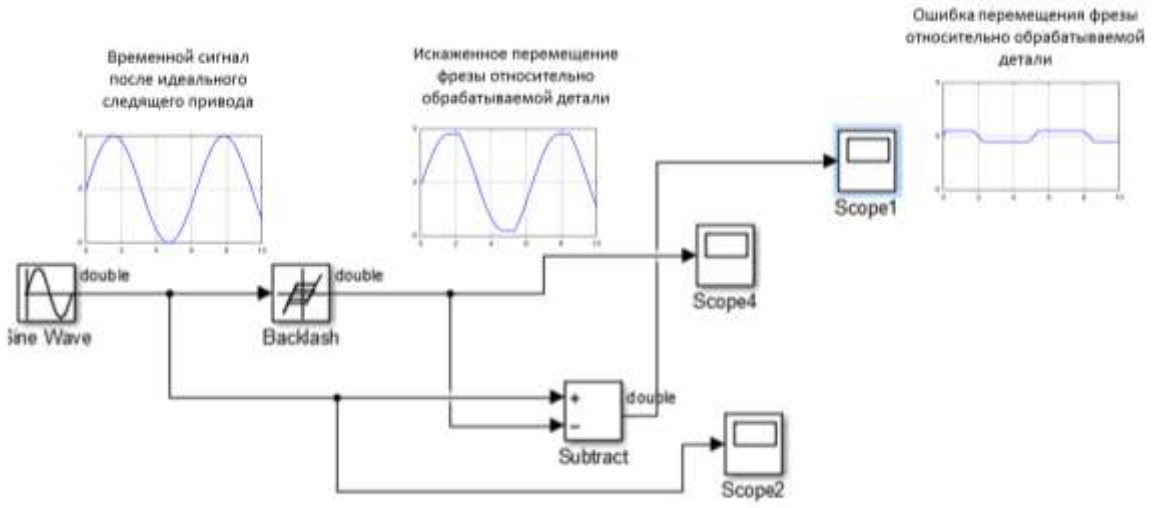


Рис. 5. Модель «прохождения сигнала» в станке с ЧПУ с зазором в НС, не охваченном обратной связью (среда матлаб (Simulink)).

Кинематический (геометрический) зазор моделируется блоком blacklash.
Ошибка перемещения фрезы относительно обрабатываемой детали, вызванная зазором в НС станка, неохваченным следящей системой привода, может быть устранена следующими способами:

1. Конструкторскими и технологическими приёмами (в настоящей работе не рассматривается).

2. Изменением сигнала на входе следящего привода «коррекцией по возмущению» с использованием априорной информации о величине зазора и направлении скорости движения):

2.1. Предыскажением сигнала на входе следящего привода в системе ЧПУ (коррекция с помощью команды «коррекция зазора»).

2.2. Предыскажение управляющей программы.

3. Коррекцией методом самонастройки: измерение ошибки движения на выходе системы и коррекция управляющей программы [7].

Ниже последовательно рассмотрены способы: 2.2 и 3.

«Коррекция по возмущению» (априорная информация о величине зазора и направлении скорости движения) (коррекция на входе следящего привода)

На рис. 6 показано прохождение сигнала в модели Matlab – Simulink, реализующей схему по рис. 2 и рис. 4 при запаздывании откорректированного сигнала на величину 0 сек. (Transport Delay) (имитация отработки «ступеньки» приводом).

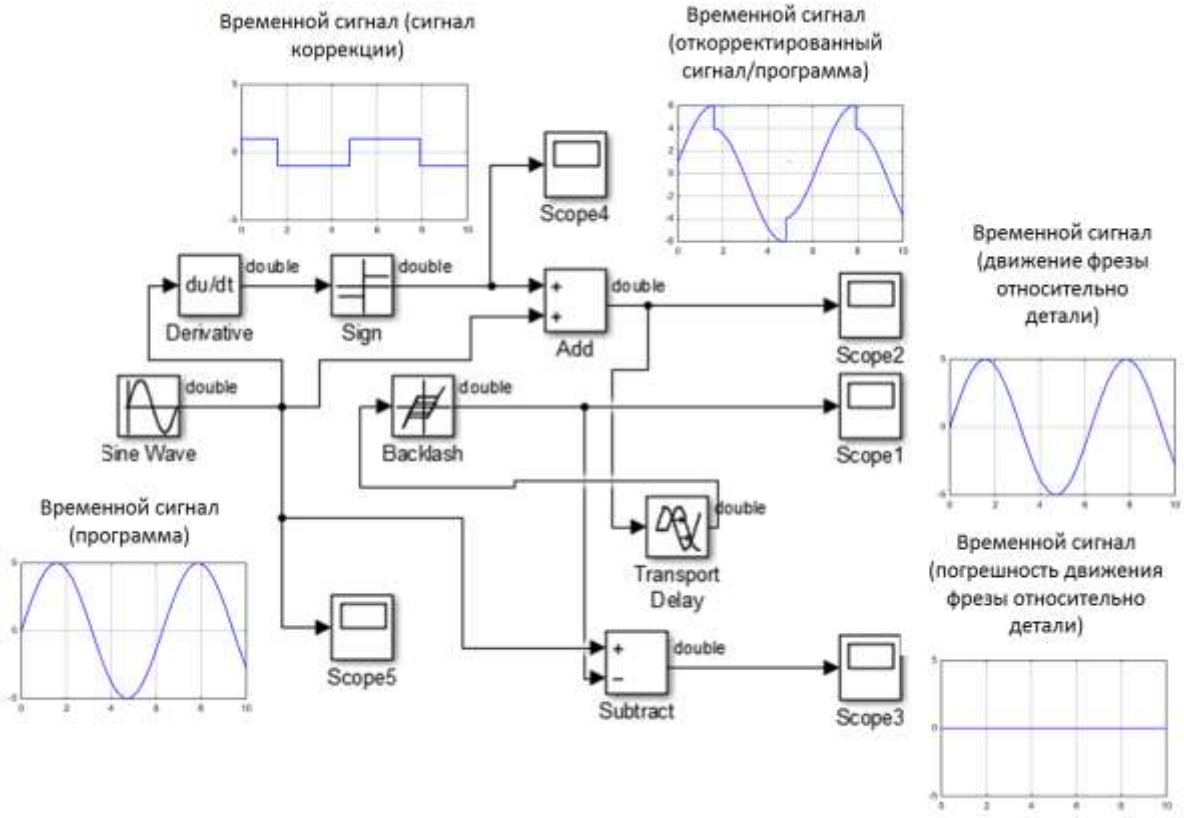


Рис. 6. Модель Simulink для исследования влияния неточности отработки корректирующего сигнала при коррекции зазора по возмущению.

Результаты моделирования показывают, что при запаздывании откорректированного сигнала на величину 0 сек погрешность движения фрезы относительно детали «нулевая». При запаздывании на величину Transport Delay 0,3 сек погрешность движения фрезы существенно возрастает (рис. 7).

На рис. 7 показано прохождение сигнала в модели при запаздывании откорректированного сигнала на величину 0,3 сек.

Следует отметить, что способ коррекции по возмущению зазора, не охваченного обратной связью, имеет как достоинства, так и недостатки.

Достоинство:

1) **Простота реализации,**
2) Эффект коррекции с «первого раза».

Недостатки:

1) В сигнале коррекции всегда есть «ступенька», равная зазору,

2) Высокая чувствительность к быстродействию привода, отрабатывающего откорректированный сигнал.

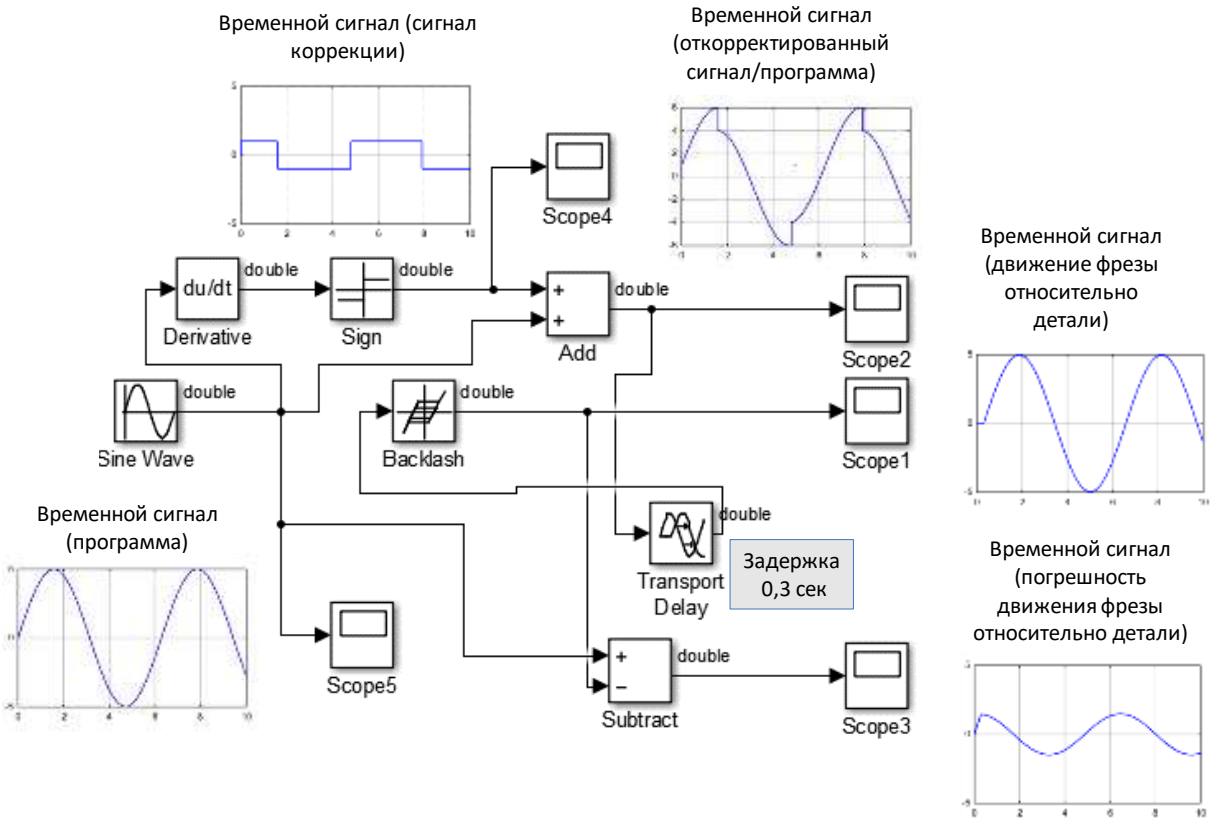


Рис. 7. Модель Simulink процесса коррекции зазора при Transport Delay 0,3 сек.

Влияние указанных недостатков можно уменьшить применением дополнительных отдельных приводов коррекции с высоким быстродействием и точностью, но это требует дополнительных затрат.

Таким образом, при «идеальном» приводе на выходе получается «идеальная» траектория. В действительности привод отрабатывает сигнал коррекции с запаздыванием в соответствии с ФЧХ привода и, в результате, при отработке траектории, в частности окружности, в точках реверса наблюдаются всплески отклонений от контура. Однако, при выполнении операции позиционирования по одной координате сигнал коррекции отрабатывается «идеально» (рис. 6)

Коррекция методом самонастройки

На рис. 8 представлена схема прохождения сигнала в станке с ЧПУ с использованием метода самонастройки по одной управляемой координате в случае, когда имеется в НС станка зазор (погрешность обратного хода), не охваченный обратной связью следящего привода.

На рис. 9 показаны результаты проведения самонастройки при одноразовой коррекции.

На рис. 10 показана модель в среде Matlab – Simulink, позволяющая моделировать процесс самонастройки при двукратной коррекции

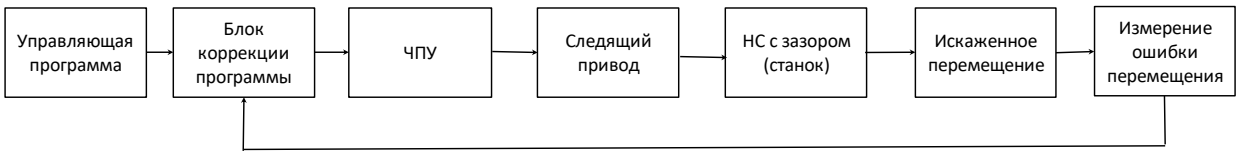


Рис. 8. Схема прохождения сигнала в станке с ЧПУ с использованием метода самонастройки.

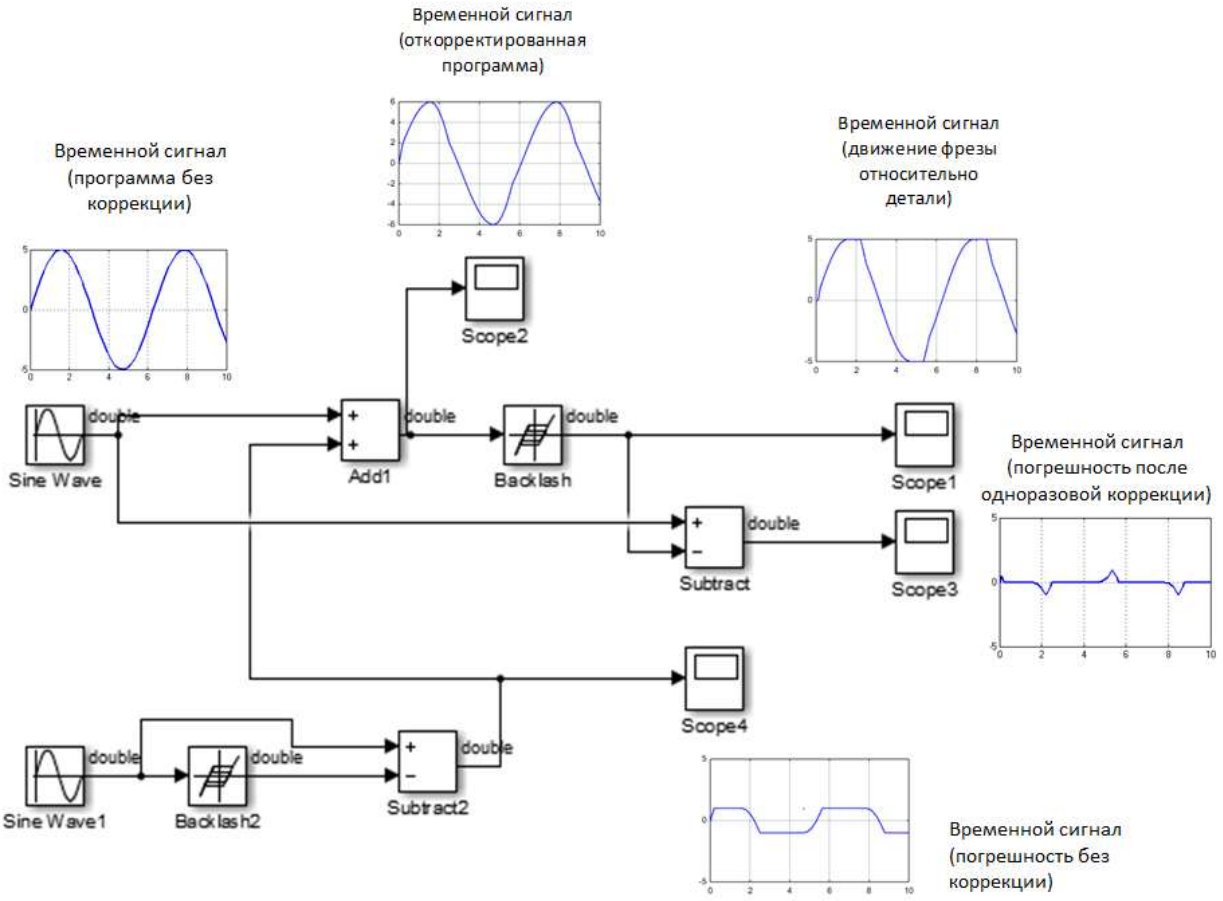


Рис. 9. Модель процесса самонастройки при одноразовой коррекции.

На рис. 11 представлены результаты моделирования процесса самонастройки в среде Matlab – Simulink. На графиках по оси абсциссы отложено время, сек, а по оси ординаты – перемещение в условных единицах, задаваемых в блоке Backlash.

В работе [9] показано, что при большом числе воспроизведений (коррекций) управляющей программы динамическая ошибка стремится к нулю.

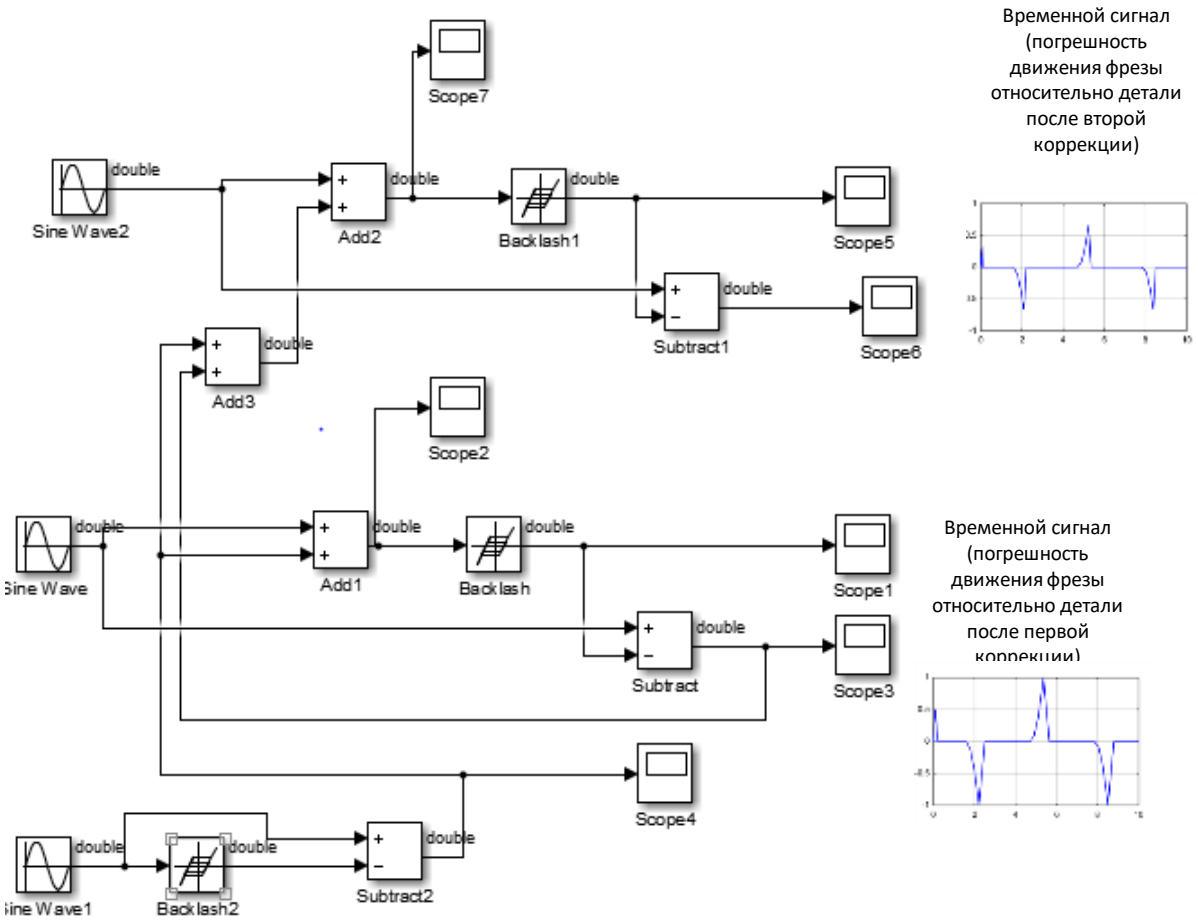
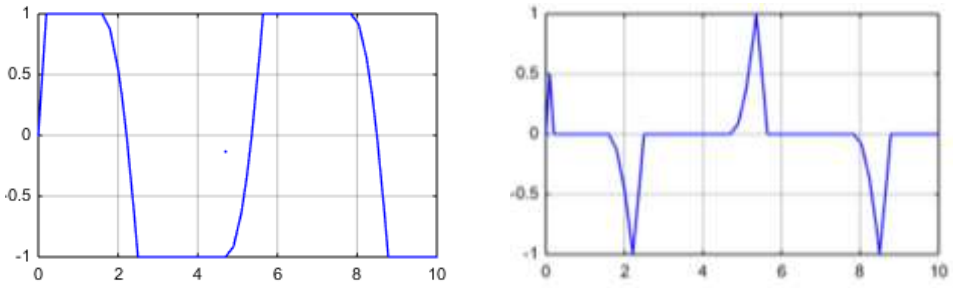
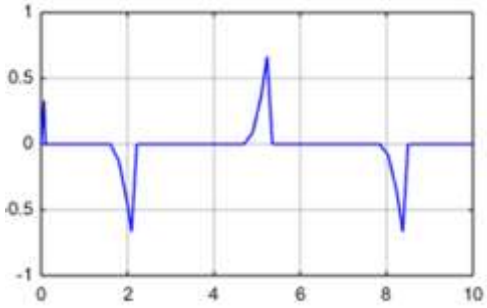


Рис. 10. Модель Simulink процесса самонастройки при двукратной коррекции



а) без коррекции, *б) после первой коррекции*



в) после второй коррекции

Рис. 11. Результаты моделирования процесса самонастройки в среде матлаб – Simulink (временной сигнал погрешности движения фрезы) при двукратной коррекции.

Заключение. Проведенные исследования по моделированию процессов коррекции погрешности воспроизведения (отработки) траектории движения рабочего органа многокоординатной машины с ЧПУ методом моделирования в среде Matlab - Simulink показали:

1. Среда Matlab - Simulink является эффективным средством моделирования процесса коррекции погрешности воспроизведения траектории движения рабочего органа многоцелевого станка с ЧПУ.
2. Коррекция по возмущению приводит к полному устранению погрешности воспроизведения траектории, вызванной геометрическим (кинематическим) зазором, при априорном знании о величине зазора и «идеальном» приводе, отрабатывающем коррекцию.
3. Коррекция, осуществляемая по принципу самонастройки, устраняет погрешности воспроизведения траектории, вызванные как геометрическим (кинематическим) зазором, так и другими вредными факторами (это преимущество метода самонастройки). Однако, для удовлетворительного устранения погрешности воспроизведения траектории требуется сравнительно большое число итераций (коррекций) (3-5) и при этом возрастает случайная составляющая погрешности из-за многократных измерений отклонений.
4. Необходимо продолжить исследования по моделированию процессов коррекции погрешности воспроизведения (отработки) траектории движения, вызванной «упругим» зазором, образующимся за счет действия внутреннего трения и наличия упругости в конструкционных материалах, используемых в НС прецизионного технологического оборудования.

Список литературы

1. Серков Н.А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. - М.: ЛЕНАНД, 2015. - 304 с.
2. Gu G. Y., Zhu L. M, Su Ch. Y., Ding H., and Fatikow S., Modeling and control of piezo-actuated nano positioning stages: A survey / IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, VOL. 13, NO. 1, JANUARY 2016 P. 313-332.
3. Kim J. D. and SOO-RYONG NAMAN S. R. IMPROVEMENT OF POSITIONING ACCURACY BY USE OF PIEZOELECTRIC VOLTAGE IN PIEZOELECTRIC DRIVEN MICROPOSITIONING SYSTEM SIMULATION / Mech. Mach. Theory Vol. 30, No. 6, P. 819-827, 1995.
4. Zhanga D., Chetwyndb D.G., Liub X., Tiana Y. Investigation of a 3-DOF micro-positioning table for surface grinding / International Journal of Mechanical Sciences. 48 (2006). P.1401–1408.
5. Tian Y., Zhang D., Shirinzadeh B. Dynamic modelling of a flexure-based mechanism for ultra-precision grinding operation / Precision Engineering. Vol. 35. Issue 4, October 2011, P. 554-565.
6. Серков Н.А., Пась О.В. Влияние зазора в приводах на точность воспроизведения траектории в многокоординатной машине с ЧПУ// Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2015. - № 5. - С.3-10.
7. Кобринский А.Е. Числа управляют станком. 2-е доп. изд. - М.: Наука, 1967. - 263 с.
8. Serkov N.A., Pas’ O.V. Influence of the Gap and the Friction on Trajectory Reproduction Accuracy in a Multiaxis Machine with CNC / JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. Oct. 2016, Vol. 8. P. 483-488.
9. Андрейчиков Б.И., Методы коррекции динамических ошибок в станках с программным управлением / Автомат. и телемех., 23:9 (1962), С.1165–1178
10. URL: https://www.mathnet.ru/links/ea1c296be45393478c1763f99578721d/at12071.pdf (дата обращения: 07.07.2023).

Дата поступления: 19 июля 2023 г.

DOI: 10.18411/vntr2023-170-4

УДК 531.662/.7/.61+62-97/-98

ОБРАЗЦОВЫЕ УДАРЫ. ЗАКОНОМЕРНОСТИ. ПОГРЕШНОСТИ. ПРИМЕРЫ

© Дмитрий Зиновьевич Ямпольский
Общество с ограниченной ответственностью «УДАРМАШ», Москва, Россия
udarmash@mail.ru

Аннотация. *В статье рассматривается применение образцовых ударов для измерения энергии ударного импульса в рабочем инструменте машин ударного действия. Предложены методы измерений с использованием закона сохранения количества движения при ударе. Представлен анализ измерительных сигналов на градуировочном стенде по ГОСТ Р 55162. Проведены расчеты образцовых ударов пневматических отбойных молотков и бетоноломов в зависимости от скорости соударения с измерительной пикой. Даны оценки погрешностей измерения энергии ударного импульса предложенными методами.*
Ключевые слова*: образцовый удар, градуировочный стенд, отбойный молоток, бетонолом, энергия ударного импульса, метод измерения, погрешность измерения.*

EXEMPLARY STRIKES. PATTERNS. ERRORS. EXAMPLES OF TASKS

© D.Z. Yampolsky
The limited liability company «UDARMASH», Moscow, Russia
udarmash@mail.ru

Abstract. *The article discusses the use of exemplary impacts for measuring the energy of a shock impulse in a working tool of percussion machines. Measurement methods are proposed using the law of conservation of momentum upon impact. The analysis of measuring signals on a calibration stand according to GOST R 55162 is presented. Model impacts of pneumatic jackhammers and concrete breakers are calculated depending on the speed of impact with the measuring peak. Estimates are given for the errors in measuring the shock pulse energy by the proposed methods.*
Keywords: *exemplary impact, calibration stand, jackhammer, concrete breaker, impact pulse energy, measurement method, measurement error.*

Введение. В последнее время вырос интерес к методам и средствам определения энергетических параметров машин ударного действия. Он связан с массовым применением в промышленности электрических, пневматических и гидравлических отбойных молотков, бетоноломов, перфораторов, а также с появлением современной тензометрической аппаратуры и методов испытаний, позволяющих с высокой точностью регистрировать ударные деформации в рабочем инструменте: пиках, зубилах, штангах [1-6].

Ранее для этих машин традиционно определялась энергия единичного удара (ISO 2787, ГОСТ Р 55162) – кинетическая энергия бойка-ударника перед его соударением с рабочим инструментом.

Сегодня развиваются методы измерения энергии ударного импульса – энергии первой волны сжатия, возникающей в инструменте при ударе и распространяющейся по нему со скоростью звука [4-9].

Вопрос перехода к измерению энергии ударного импульса актуален, поскольку именно эта энергия передается объекту разрушения, и потому она более полно характеризует эффективность ударной машины[1].

В данной публикации пойдет речь об образцовых ударах, применяемых для определения коэффициента чувствительности измерительной системы [7-8], для ее проверки [4] или градуировки [1, 3, 5]. В ней рассмотрены закономерности формирования и регистрации ударных импульсов пневматических отбойных молотков и бетоноломов, выпускаемых отечественной промышленностью, а также определены погрешности измерений.

Согласно литературным данным, на сегодняшний день погрешность измерения энергии ударного импульса составляет 10 % для электрических ручных ударных машин [4] и 4 % для мощных бурильных установок с пневмо и гидроприводом [5][2].

С целью повышения точности измерений могут быть применены образцовые удары, обладающие высокой стабильностью и воспроизводимостью. С использованием образцовых ударов возможны следующие методы измерений энергии ударного импульса:

- регистрация среднего импульса[3] (в условных единицах) при работе машины, а затем воспроизведение этого импульса образцовым ударом на градуировочном стенде. При образцовом ударе используются тот же ударник и та же измерительная пика, что и при работе машины. Метод аналогичен измерению энергии удара пневмомолотков по ГОСТ Р 55162 [1, 8];
- выполнение образцового удара и определение коэффициента чувствительности измерительной системы, а затем проведение испытаний машины с той же пикой и теми же настройками измерений. При образцовом ударе возможно применить ударник, близкий по массе и геометрии к ударнику машины.

Величину энергии ударного импульса устанавливают расчетом согласно работам [7-8].

При анализе образцовых ударов мы будем ссылаться на Методику Европейской Ассоциации Производителей Электроинструмента (Методика EPTA) [4] как на единственный в настоящее время нормативный документ (корпоративный стандарт) по измерению энергии ударного импульса машин ударного действия.

Образцовые удары. Образцовые удары выполняются на специальных стендах [11]. В статье рассматривается градуировочный стенд по ГОСТ Р 55162, схема которого показана на рис. 1, *а*.

Удары выполняют следующим образом.

Рассмотрим эти процессы подробнее на рис. 1.

---

[1] При этом не вся энергия ударного импульса расходуется на разрушение, но, в силу разнообразия условий применения ударной машины, определить ее долю в общем случае не представляется возможным.

[2] В работе представлена измерительная аппаратура и оригинальный метод ее тарировки свободно падающими ударниками большой длины (> 300 мм). К сожалению, такой метод неприменим к большинству ударных машин, т.к. не учитывает энергию отскока, уносящего до 10 % исходной кинетической энергии ударника.

[3] В установившемся режиме работы машины средний ударный импульс совпадает с аналогичным импульсом при образцовом ударе при равенстве их амплитуд. Эта закономерность выявлена В.А. Кашаевым [1, 10].

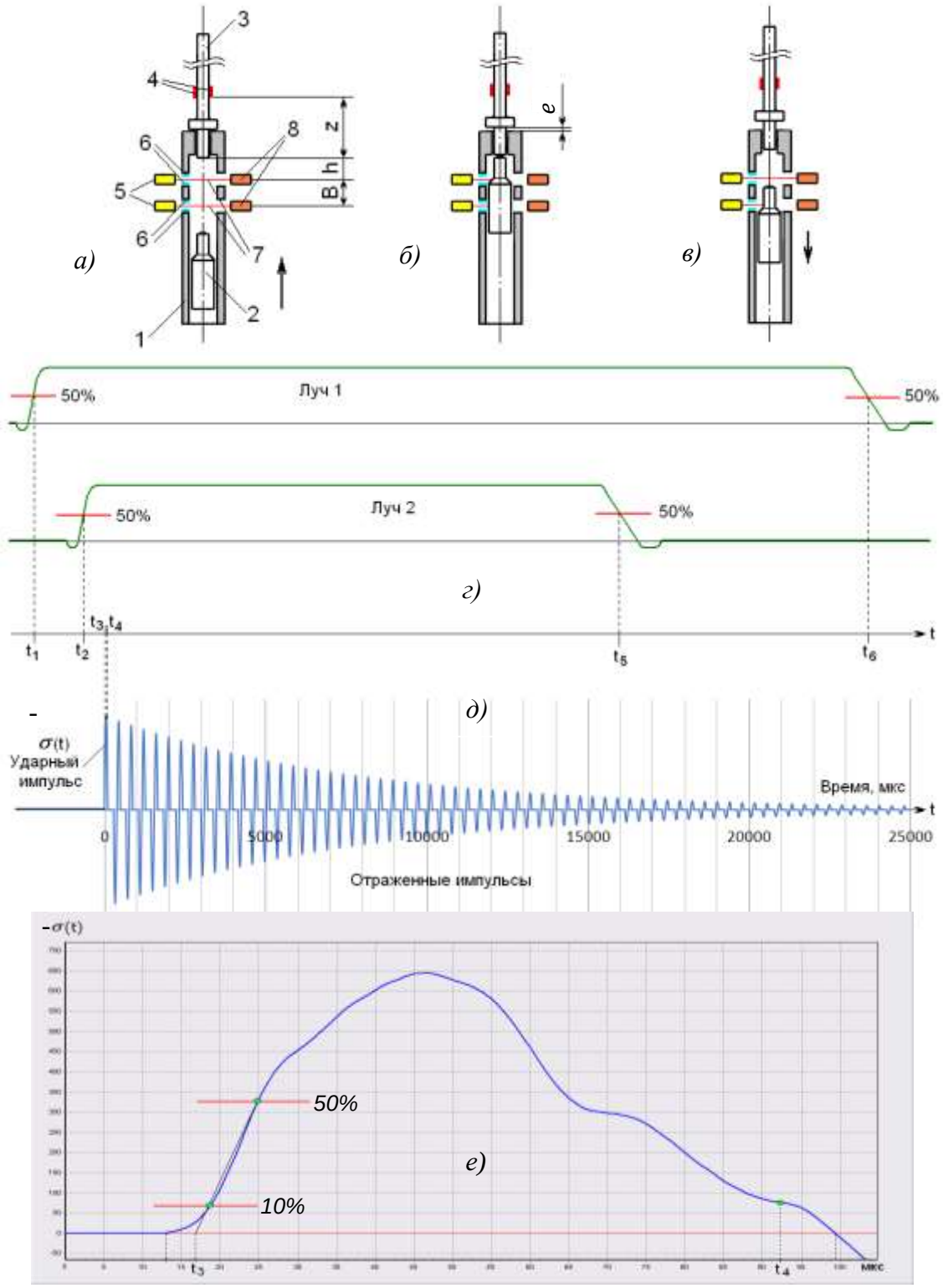


Рис. 1 – Схема градуировочного стенда и измерительные сигналы

а) измерение скорости удара; *б*) перемещение ударника за время контакта с пикой; *в*) измерение скорости отскока ударника; *г)* сигналы фотодетекторов и тензодатчиков; *е*) ударный импульс молотка МО-2Б

1 – вертикальная направляющая; *2* – ударник; *3* – измерительная пика; *4* – тензодатчики; *5* – световые излучатели; *6* – диафрагмы; *7* – световые лучи: 1 – нижний, 2 – верхний; *8* – фотодетекторы; стрелками показано направление движения ударника; t_1, t_2, t_5, t_6 – моменты времени пересечения лучей; t_3 – начало ударного импульса; t_4 – момент разрыва контакта ударника с пикой; $\sigma(t)$ – напряжения в измерительной пике (условные деления) в момент времени t, ноль времени соответствует моменту касания ударником торца пики; z – расстояние от торца пики до тензодатчиков; e – перемещение пики и ударника до отскока

В вертикальную направляющую стенда *1* устанавливают ударник *2* и измерительную пику *3* с тензодатчиками *4*. Ударник разгоняется сжатым воздухом и при свободном полете соударяемым торцом перекрывает световые лучи *7*, проходящие через диафрагмы *6* и отверстия в направляющей, формируя сигналы на фотодетекторах *8*, по которым определяют время прохода контрольного участка пути B – базы измерения скорости.

После ускорения ударник, двигаясь вверх под действием силы тяжести, последовательно пересекает лучи 1 и 2 в моменты времени t_1 и t_2 (рис. 1, *а* и *г*). Пересечением луча считается 50 %-е снижение сигнала фотодетектора.

Достигая торца измерительной пики, ударник формирует в ней волну деформации – ударный импульс, распространяющийся со скоростью звука c. Тензодатчики начинают регистрировать ударные деформации в момент t_3 с задержкой $\Delta t_* = z/c$, равной времени прохождения волны от соударяемого торца пики до места расположения тензорезисторов на ее боковой поверхности (рис. 1, *а* и *д*).

Сформированный ударный импульс показан на рис. 1, *е*. Для примера взят импульс пневматического отбойного молотка МО-2Б производства АО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева» (ТЭМЗ), полученный на установке «УИПУ-4М» [1] (давление сжатого воздуха 0,5 МПа, измерительная пика диаметром 24 мм и длиной 340 мм).

В процессе удара – от момента касания торцов t_3 до момента разрыва контакта t_4 – ударник и пика перемещаются вверх на некоторое расстояние e (рис. 1, *б*), после чего ударник отскакивает и далее продолжает движение вниз под действием силы тяжести. При этом он последовательно пересекает лучи 2 и 1 в моменты времени t_5 и t_6 (рис. 1, *в* и *г*).

Предударную скорость ударника v_y и скорость его отскока v_o получают расчетом:

$$v_y = \sqrt{\left\{\frac{B}{\Delta t_\uparrow} - \frac{g\Delta t_\uparrow}{2}\right\}^2 - 2gh}\,, \quad v_o = \sqrt{\left\{\frac{B}{\Delta t_\downarrow} - \frac{g\Delta t_\downarrow}{2}\right\}^2 - 2g(h+e)}, \qquad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; h – расстояние от верхнего луча до соударяемого торца пики; $\Delta t_\uparrow = t_2 - t_1$, $\Delta t_\downarrow = t_6 - t_5$.

Перемещение центра масс ударника за время контакта с пикой определяется по деформации тензодатчика $\varepsilon(t)$ соотношением: $e = c\int_{t_3}^{t_4}\varepsilon(t)dt$.

Если сигналы с фотодетекторов и измерительной пики регистрировать синхронно, например, используя три высокочастотных канала АЦП (~1 МГц), то расстояние h можно вычислить и оценить длительность контакта соударяемых деталей $\Delta t_к$:

$$h = \left(\frac{B}{\Delta t_\uparrow} - \frac{g\Delta t_\uparrow}{2}\right)\Delta t - \frac{g(\Delta t)^2}{2}, \quad \Delta t = t_3 - t_2 - \Delta t_*, \qquad (2)$$

$$\Delta t_к = t_5 - t_3 - \Delta v/g, \quad \Delta v = \frac{B}{\Delta t_\downarrow} - \frac{g\Delta t_\downarrow}{2} - v_o.$$

В работах [7-8] предложено использовать образцовые удары для проведения сквозной калибровки измерительного тракта и аттестации измерительного преобразователя (пики, штанги) путем определения коэффициента пропорциональности μ между измеряемым электрическим напряжением $u(t)$ и деформацией тензодатчика: $\varepsilon(t) = \mu u(t)$.

Преимущество этого способа по сравнению с методами классической тензометрии [4, 12] состоит в применении закона сохранения количества движения при ударе, что позволяет упростить расчеты энергии ударного импульса[4] и увеличить их точность.
Количество движения ударного импульса P, скорости удара и отскока ударника связаны соотношением:

$$P \equiv ES\int_0^T \xi(x,t)dt = m\left(v_\text{у} + v_\text{о}\right) \cong ES\int_0^{T'} \varepsilon(t)dt\,,\ \ \varepsilon(t) = \frac{1}{l}\int_0^l \xi(x,t)dt, \qquad (3)$$

где E – модуль Юнга измерительной пики; S – площадь ее поперечного сечения в месте расположения тензодатчика; $\xi(x,t)$ – мгновенная деформация сечения тензодатчика с координатой x; m – масса ударника; T – длительность импульса; $T' = T + l/c$ – длительность импульса по тензодатчику, l – длина решетки тензодатчика; скорости удара и отскока берутся по модулю (без знака).
Из (3) получаем:

$$\mu = \frac{m(v_\text{у} + v_\text{о})}{ES\int_0^{T'} u(t)\,dt}. \qquad (4)$$

Энергия ударного импульса W, соответственно, равна:

$$W \equiv cES\int_0^T \xi^2(x,t)dt = \frac{m}{2}\left(v_\text{у}^2 - v_\text{о}^2\right) - U_\text{у} - Q \cong cES\int_0^{T'} \varepsilon^2(t)dt = \mu^2 cES\int_0^{T'} u^2(t)dt, \qquad (5)$$

здесь $U_\text{у}$ – потенциальная энергия ударника в момент отскока от пики; Q – потери энергии на различные процессы, сопровождающие удар: трение, магнитострикцию, излучение звука.
Чем меньше длина решетки тензодатчика, тем ближе величина $\varepsilon(t)$ к мгновенной деформации измерительной пики, и тем точнее выполняются равенства (3) и (5).
Методика ЕРТА [4] регламентирует применение тензорезисторов с решеткой не более 6 мм. Для датчика длиной 5 мм в работе [8] выполнено сравнение ударных импульсов $\varepsilon(t)$ и $\xi(t)$ молотка МО-2Б ТЭМЗ при скорости соударения $v_\text{у}$ = 14,1 м/с: погрешность амплитуды ударного импульса составила 0,02 %, погрешность энергии импульса – 0,00 %.
Поскольку потери Q малы по сравнению с энергией удара [8], из (5) получаем:

$$W = A_\text{у}(1 - \lambda^2) - U_\text{у} \qquad (6)$$

и КПД ударной системы η при образцовом ударе:

$$\eta = \frac{W}{A_\text{у}} = 1 - \lambda^2 - \frac{U_\text{у}}{A_\text{у}},$$

где $A_\text{у} = mv_\text{у}^2/2$ – кинетическая энергия ударника; $\lambda = v_\text{о}/v_\text{у}$ – коэффициент отскока.

[4] Для расчета энергии импульса по Методике ЕРТА необходимо знать коэффициент усиления тензоусилителя, напряжение питания тензодатчиков, коэффициент тензочувствительности тензорезисторов и коэффициент Пуассона. В предлагаемом способе измерений эти данные не используются.

Остановимся подробнее на потенциальной энергии ударника и кинетической энергии отскока. После разрыва контакта с пикой ударник оказывается возбужденным, в нем возникает стоячая волна деформаций: скорость сечений ударника по его длине оказывается неодинаковой и колеблется в противофазе с напряжением.

При образцовом ударе регистрируется средняя скорость ударника, т.е. скорость его центра масс. Таким образом, потенциальная энергия U_y, входящая в формулу (6), есть разность между полной энергией ударника при отскоке и кинетической энергией, соответствующей скорости движения его центра масс. Из (5) и (6) следует:

$$U_y = A_y - W - mv_o^2/2 = A_y(1 - \lambda^2) - W. \quad (7)$$

Параметры ударных импульсов. Используя соотношения (5) - (7), рассмотрим, как изменяются параметры ударных импульсов современных пневматических отбойных молотков и бетоноломов при различных скоростях соударения.

Воспользуемся моделью продольного удара [13], которая показала хорошее соответствие с результатами экспериментов.

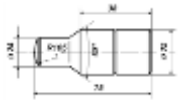
Методика EPTA [4] рекомендует применение измерительных пик без буртов (“steps” – ступенек), поэтому будем рассматривать в сравнении два варианта ударных взаимодействий: удар по пике постоянного поперечного сечения и удар по пике с буртом, который присутствует у инструмента большинства ударных машин.

Примем, что измерительная пика постоянного поперечного сечения имеет диаметр d = 24 мм и длину L = 1000 мм (длина пики выбрана так, чтобы отраженная волна не накладывалась на ударный импульс). Будем считать, что ударники и пика изготовлены из стали марки У8А[5]: модуль упругости стали E = 209 ГПа, плотность ρ = 7839 кг/м^3, коэффициент Пуассона 0,29, стержневая скорость звука c = 5164 м/с [14]. Соударяемый торец ударника (согласно чертежам) имеет радиус 105 мм, а торец пики плоский.

Выберем скорости удара 5 м/с, 10 м/с и 15 м/с, охватывающие весь диапазон упругих соударений, встречающийся на практике[6].

Таблица 1

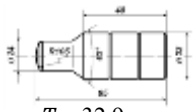
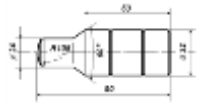
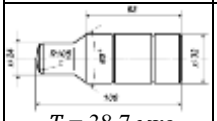
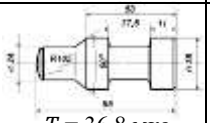
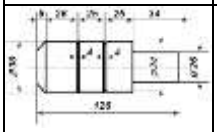
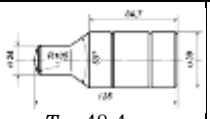
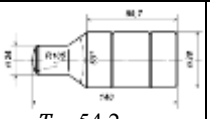
Параметры ударных импульсов отбойных молотков и бетоноломов

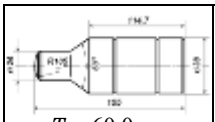
Модель ударной машины, чертеж и параметры ударника		v_y, **м/с**	λ	t_m, **мкс**	T, **мкс**	$-\sigma_{max}$, **МПа**	A_y, **Дж**	W, **Дж**	U_y, **Дж**	η, **%**
 T_c= 29,1 мкс	МО-1Б[7] m = 379 г d_y = 28,65 мм L_y = 75 мм	5	0,299	37,5	109,2	96,0	4,74	4,31	0,006	90,9
		10	0,257	34,3	99,1	207,5	18,95	17,66	0,038	93,2
		15	0,233	32,9	95,3	324,0	42,64	40,22	0,105	94,3

[5] Ударники и измерительные пики для испытаний пневматических отбойных молотков традиционно изготавливаются из стали У8А.

[6] При скоростях соударения более 20 м/с в деталях из стали возникают пластические деформации [15].

[7] Пневматические молотки МО-1Б … МО-4Б, МО-9К и бетоноломы Б-1 ... Б-3 производства ТЭМЗ, молоток МО-2К производства КНР (ранее выпускался в СССР под маркой ОМСП).

 T_c= 32,9 мкс	МО-2Б m =439 г d_y = 28,96 мм L_y = 85 мм	5	0,269	40,2	119,1	100,9	5,49	5,09	0,003	92,7
		10	0,229	37,2	109,0	217,0	21,95	20,79	0,009	94,7
		15	0,206	36,0	104,9	337,3	49,39	47,24	0,054	95,7
 T_c= 35,6 мкс	МО-3Б m = 471 г d_y = 29,16 мм L_y = 90 мм	5	0,255	41,6	123,9	103,2	5,89	5,49	0,017	93,3
		10	0,215	38,8	114,0	221,2	23,55	22,42	0,041	95,2
		15	0,193	37,7	110,0	343,1	52,99	50,89	0,126	96,1
 T_c= 38,7 мкс	МО-4Б m = 534 г d_y = 29,45 мм L_y = 100 мм	5	0,231	44,6	133,6	107,4	6,68	6,31	0,014	94,5
		10	0,192	42,1	124,2	228,6	26,70	25,66	0,056	96,1
		15	0,171	41,0	120,2		60,08	58,18	0,143	96,9
 T_c= 36,8 мкс	МО-9К m = 469 г d_y = 28,32 мм L_y = 95 мм	5	0,257	45,7	126,0	102,5	5,86	5,46	0,013	93,2
		10	0,217	43,3	113,9	214,4	23,45	22,28	0,066	95,0
		15	0,195	42,3	108,8	327,4	52,76	50,58	0,174	95,9
 T_c= 48,8 мкс	МО-2К m = 929 г d_y =34,61 мм L_y = 126 мм	5	0,105	51,85	196,8	127,1	11,61	11,48	0,002	98,9
		10	0,072	47,56	192,4	265,1	46,45	46,17	0,039	99,4
		15	0,056	43,80	191,6	405,5	104,51	104,07	0,112	99,6
 T_c= 48,4 мкс	Б-1 m = 919 г d_y = 34,56 мм L_y = 125 мм	5	0,126	53,9	194,2	124,6	11,49	11,30	0,008	98,4
		10	0,095	51,4	185,6	262,6	45,95	45,51	0,025	99,0
		15	0,079	50,5	183,0	403,5	103,39	102,66	0,084	99,3
 T_c= 54,2 мкс	Б-2 m = 1053 г d_y = 34,95 мм L_y = 140 мм	5	0,105	58,6	217,6	129,0	13,16	13,01	0,005	98,8
		10	0,076	56,5	211,1	270,0	52,65	52,27	0,076	99,3
		15	0,061	55,7	208,6	413,1	118,46	117,82	0,199	99,5

 T_c= 60,0 мкс	Б-3 m = 1186 г d_y = 35,25 мм L_y = 155 мм	5	0,087	63,6	239,8	132,5	14,83	14,70	0,018	99,2
		10	0,061	61,7	236,0	275,2	59,30	59,01	0,069	99,5
		15	0,048	61,1	234,8	419,2	133,43	132,93	0,186	99,6

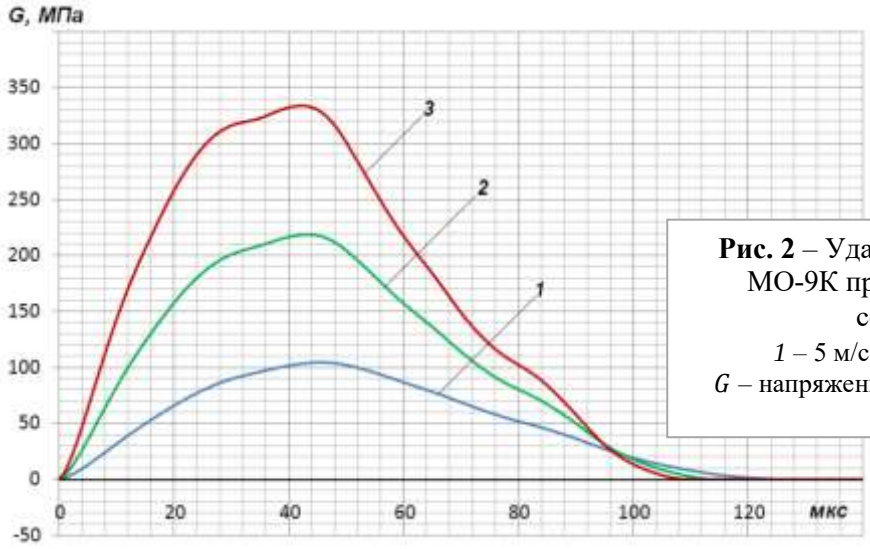


Рис. 2 – Ударные импульсы молотка МО-9К при различной скорости соударения v_y:
1 – 5 м/с; *2* – 10 м/с; *3* – 15 м/с;
G – напряжения сжатия в штанге ($G < 0$)

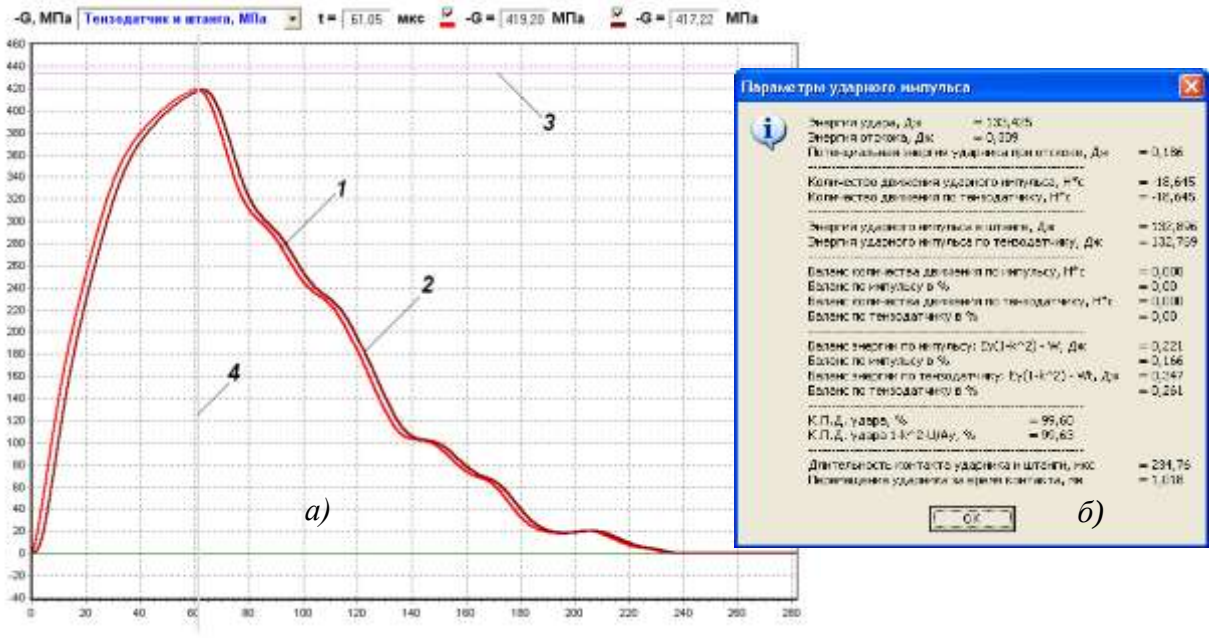


Рис. 3 – Ударный импульс бетонолома Б-3 (ТЭМЗ) при скорости соударения 15 м/с
а) зависимость напряжений от времени; *б*) расчетные параметры импульса
1 – напряжения в штанге; *2* – напряжения в штанге по тензодатчику с решеткой 25 мм; *3* – теоретический уровень напряжений при плоском ударе [2]; *4* – визир указывает значения времени и напряжений (вверху)

В таблице 1 приведены результаты расчетов (сетка 0,01 мкс × 0,1 мм).

Для справки в таблице указаны: L_y, d_y – длина и средний по длине диаметр ударника; $T_c = 2L_y/a$ – длительность удара по Сен-Венану, a – скорость звука в ударнике; t_m – время достижения максимума импульса; σ_{max} – максимальные напряжения в пике ($\sigma_{max} < 0$).

Из полученных данных следует, что с увеличением скорости соударения происходят следующие изменения:

- уменьшается длительность ударного импульса T и длительность переднего фронта t_m;
- амплитуда напряжения σ_{max} растет быстрее, чем скорость соударения (на 5...10 %);
- уменьшается коэффициент отскока ударника λ;
- возрастает КПД передачи энергии η.

На рис. 2 показано, как в зависимости от скорости соударения v_y меняются импульсы молотка МО-9К с «катушечным» ударником.

На рис. 3 представлен ударный импульс бетонолома Б-3 при скорости v_y = 15 м/с.

Справа даны значения параметров, которые позволяют оценить погрешности усреднения (длина решетки тензодатчика 25 мм):

- погрешность амплитуды ударного импульса – (1-418,32/419,20)·100 = 0,21 %;
- погрешность количества движения импульса – 0,00%;
- погрешность энергии ударного импульса – (1-132,77/132,90)·100 = 0,10 %.

До сих пор рассматривался удар по пике постоянного поперечного сечения.

Рассмотрим теперь образцовые удары по пике с буртом и проанализируем его влияние на ударный импульс.

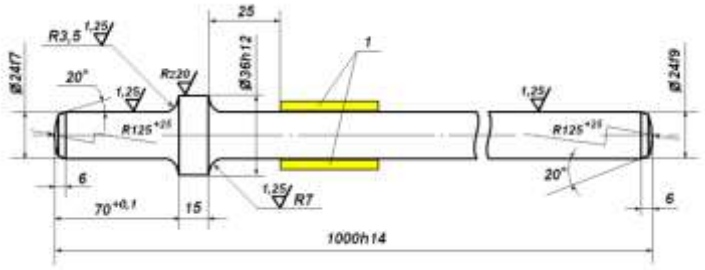


Рис. 4 – Измерительная пика с буртом
1 – тензорезисторы

Для расчетов выберем пику, аналогичную ГОСТ Р 55162, которая показана на рис. 4. Соударяемый торец пики также будем считать плоским.

Таблица 2

Параметры ударных импульсов при соударении с пикой, имеющей бурт

Модель ударной машины	v_y, **м/с**	λ	T, **мкс**	T_0, **мкс***)	t_m, **мкс**	σ_{max}, **МПа**	A_y, **Дж**	W, **Дж**	U_y, **Дж**	η, **%**
МО-1Б	5	0,336	102,5	183,7	39,4	89,3	4,73	4,19	0,006	88,5
	10	0,300	94,2	159,8	32,3	191,2	18,95	17,20	0,045	90,8
	15	0,279	90,2	121,0	30,9	300,8	42,64	39,17	0,151	91,9
МО-2Б	5	0,300	111,0	190,0	43,2	95,1	5,49	4,99	0,006	91,0

	10	0,263	102,5	167,6	39,2	202,2	21,95	20,40	0,032	92,9
	15	0,242	98,2	164,0	37,7	313,2	49,39	46,37	0,128	93,9
МО-3Б	5	0,282	115,4	196,6	44,5	98,0	5,89	5,41	0,012	91,9
	10	0,246	106,7	170,1	41,5	208,4	23,55	22,07	0,055	93,7
	15	0,225	102,5	135,0	39,7	322,1	52,99	50,13	0,177	94,6
МО-4Б	5	0,251	124,4	172,8	47,5	103,5	6,68	6,25	0,009	93,6
	10	0,214	115,2	216,6	44,4	220,0	26,70	25,41	0,067	95,2
	15	0,193	111,1	172,4	43,2	340,3	60,08	57,63	0,212	95,9
МО-9К	5	0,283	116,4	185,4	48,1	99,0	5,86	5,38	0,011	91,8
	10	0,248	104,8	142,4	45,6	207,8	23,45	21,95	0,058	93,6
	15	0,230	98,9	139,8	44,5	318,7	52,76	49,82	0,117	94,5
МО-2К	5	0,093	182,1	266,9	57,5	128,7	11,61	11,51	0,003	99,1
	10	0,055	175,8	231,1	51,9	268,7	46,45	46,29	0,020	99,7
	15	0,035	177,1	227,0	50,2	412,3	104,51	104,33	0,057	99,8
Б-1	5	0,119	181,7	227,2	57,7	124,9	11,49	11,33	0,001	98,6
	10	0,083	174,6	224,5	53,3	262,9	45,95	45,62	0,015	99,3
	15	0,064	171,4	222,5	51,8	405,7	103,39	102,91	0,057	99,5
Б-2	5	0,092	204,0	248,1	60,5	131,6	13,16	13,04	0,009	99,1
	10	0,058	198,6	245,5	58,7	277,0	52,65	52,41	0,063	99,5
	15	0,041	197,6	243,8	57,6	425,3	118,46	118,10	0,161	99,7
Б-3	5	0,071	232,9	267,6	63,6	135,4	14,83	14,74	0,015	99,4
	10	0,041	233,0	264,7	61,4	285,0	59,30	59,14	0,060	99,7
	15	0,027	234,7	264,9	60,8	437,3	133,43	133,16	0,173	99,8

В таблице 2 представлены результаты расчетов образцовых ударов вышеуказанных молотков и бетоноломов с такой пикой. Здесь T – длительность контакта ударника с пикой, T_0 – время достижения первого нуля напряжений.

Из сравнения Таблицы 2 с Таблицей 1 следует, что наличие бурта у измерительной пики приводит к следующим изменениям:

- сокращается длительность контакта ударника с пикой;

- для ударников отбойных молотков МО-1Б … МО-4Б и МО-9К (d_y~ 28…30 мм) увеличивается коэффициент отскока и уменьшается КПД удара;
- для бетоноломных ударников Б-1…Б-3 с массивной поршневой частью (d_y >34 мм) коэффициент отскока, наоборот, снижается, а КПД удара растет (но весьма незначительно).

Общая закономерность такова: чем длиннее ударник и массивнее его поршневая часть, тем менее длительность контакта деталей зависит от скорости соударения v_y. Так для ударника бетонолома Б-3 (L_y= 155 мм) при скоростях 5 м/с и 15 м/с она отличается всего на 0,8 %, а для ударника молотка МО-1Б (L_y= 75 мм) – на 12,0 %.

Наличие у пики бурта снижает амплитуду напряжений отбойных молотков и уменьшает энергию ударного импульса: у молотка МО-1Б при v_y= 15 м/с напряжения ниже на 7,2 %, а энергия – на 2,6 %, у МО-4Б снижение амплитуды составляет 3,5 %, а энергии – 0,9 %.

У бетоноломных ударников, наоборот, амплитуда напряжений увеличивается. Объяснить этот эффект можно так: волна, отраженная от бурта, претерпевает повторное отражение от массивной поршневой части бетоноломного ударника, поднимая уровень напряжений сжатия: так у бетонолома Б-3 при v_y= 15 м/с он даже на 3,1 % превосходит теоретический максимум, определяемый скоростью соударения и ударной жесткостью деталей [2]. У более коротких ударников такой эффект не наблюдается, т.к. волна разгрузки «гасит» нарастание напряжений. При этом бурт практически не влияет на величину энергии импульса бетоноломных ударников[8].

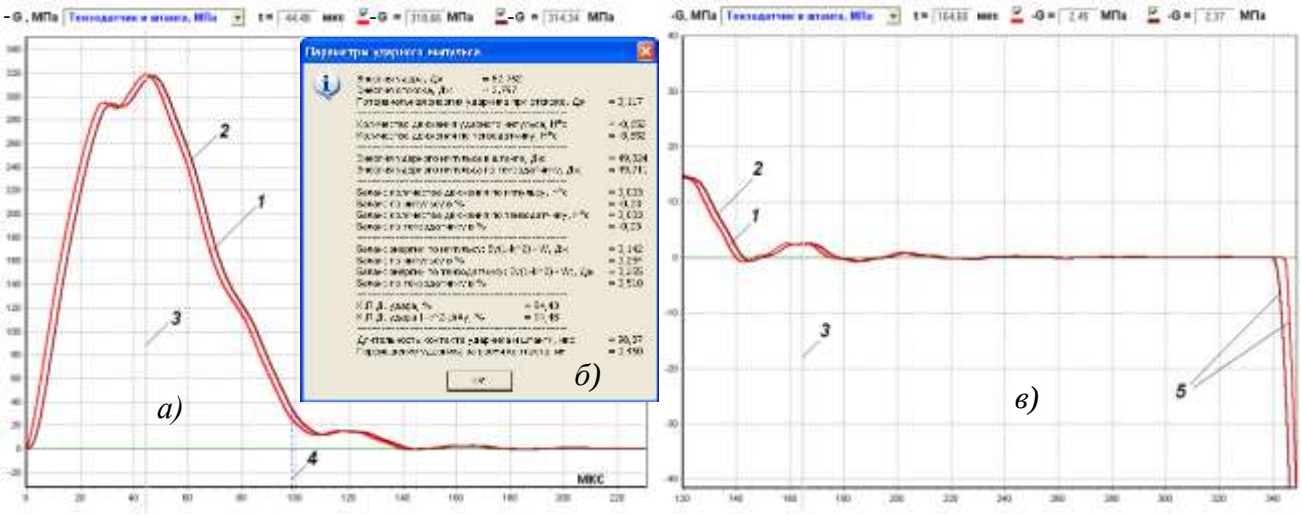


Рис. 5 – Ударный импульс молотка МО-9К при скорости соударения 15 м/с: удар по пике с буртом

а) зависимость напряжений от времени; *б)* – расчетные параметры; *в)* «хвостовая» часть импульса
1 – напряжения в измерительной пике; *2* – напряжения в пике по тензодатчику (решетка 25 мм);
3 – визир: значения времени и напряжений даны вверху; *4* – момент разрыва контакта ударника с пикой;
5 – фронт отраженного импульса

Низкий уровень потенциальной энергии ударника при отскоке от пики, полученный расчетом во всем диапазоне реальных скоростей соударения для ударников различной массы

[8] Аналогичный вывод получен экспериментально в работе [5] для цилиндрических ударников длиной более 300 мм и сечением в 1,5…2,0 раза большим площади сечения буровой штанги. В таких системах ударник практически не отскакивает от пики [2], и вся его кинетическая энергия переходит в энергию ударного импульса.

и геометрической формы, показывает, что в правой части соотношения (6) можно пренебречь последним слагаемым.
Тогда:

$$W = A_y(1-\lambda^2) \text{ и } \eta = 1-\lambda^2, \text{ погрешность не превышает 0,5 \%.} \quad (8)$$

Для пики постоянного поперечного сечения длительность контакта соударяемых деталей совпадает с длительностью ударного импульса.
Для пики с буртом ударный импульс не завершается при разрыве контакта ударника с пикой. За счет отражения волны от бурта, вслед за основной («головной») частью ударного импульса появляется длинный знакочередующийся волновой процесс с убывающей амплитудой («хвост» импульса), показанный на рис. 5 на примере молотка МО-9К. При этом длительность контакта соударяемых деталей оказывается даже меньше длительности головной части ударного импульса: $T < T_0$ (рис. 5, поз. *4*).
Соответственно, при обработке образцовых ударов с пикой, имеющей бурт, возникает вопрос: как выбирать время интегрирования для расчета количества движения и энергии ударного импульса?
Постараемся ответить на этот вопрос.
При разрыве контакта с ударником, часть пики – от места расположения тензодатчика до торца хвостовика – оказывается возбужденной. А поскольку законы сохранения импульса и энергии в системе «ударник–пика» выполняются для всей протяженности тел соударяемых деталей, для правильного расчета необходимо «дождаться», когда весь ударный импульс пройдет через тензодатчик. Теоретически этот процесс занимает бесконечное время. Но для задачи калибровки измерительной системы важно установить, какой частью ударного процесса можно пренебречь, и какова при этом будет погрешность ограничения.
Методика ЕРТА предлагает интегрировать сигнал тензодатчика вплоть до прихода отраженной волны. Такой подход оправдан при расчете количества движения, переданного ударником пике. Следует только отметить, что время от начала импульса до фронта отраженной волны должно быть не менее $2T_0$, чтобы регистрируемые напряжения существенно снизились (по сравнению с амплитудой импульса).
При расчете энергии ударного импульса подход, предлагаемый Методикой ЕРТА, некорректен: интегрирование следует проводить только до первого нуля напряжений.
Такое решение вытекает из следующих соображений:
- ударная машина предназначена для разрушения прочных материалов, а напряжения за головной частью импульса находятся в зоне упругости большинства материалов и не разрушают их (в примере, показанном на рис. 5, напряжения при $t > T_0$ не превышают 1 % от амплитуды импульса, а энергия – 0,05 % от энергии головной части);
- напряжения растяжения «не способны» выполнять полезную работу разрушения, и включение в расчет таких участков, расположенных в «хвосте» волнового процесса, неоправданно завышает величину энергии ударного импульса[9].

Погрешности измерений. Дадим оценку погрешности коэффициента чувствительности измерительного тракта μ и энергии ударного импульса W при образцовом ударе молотка МО-9К на градуировочном стенде установки «УИПУ-4М» при скорости соударения v_y = 15 м/с.

[9] Мы рассматриваем одиночные удары. При работе ряда машин возникают или специально создаются повторные соударения ударника с пикой; в этом случае они также должны учитываться при интегрировании.

Технические характеристики стенда и измерительной аппаратуры [1]:
- база измерения скорости B = 45,00 мм;
- расстояние от верхнего луча до торца пики h = 10 мм;
- ширина диафрагмы (см. рис. 1) b = 0,06 мм (по уровню фотосигнала 30%...70%);
- электрическое сопротивление тензодатчика r = 800 Ом (2 тензорезистора с длиной решетки 25 мм, соединенных последовательно);
- электрическое сопротивление шунта R = 300 кОм.

При калибровке измерительного тракта Установки «УИПУ-4М» используется прецизионный шунт ($R \gg r$), что позволяет исключить погрешности, связанные с нестабильностью коэффициента усиления тензоусилителя и источника тока, погрешности от нестабильности напряжения питания и изменения сопротивлений тензодатчиков от температуры.
Достигнутая нестабильность измерительной пики $\delta_{\text{п}}$ составляет менее 0,15 % [1].
Погрешности величин, входящих в формулы (1)-(5), внесены в Таблицу 3.

Таблица 3

Погрешности исходных данных

Наименование погрешности	**Обозначение**	**Формула**	**Значение, %**
Погрешность модуля Юнга E	δ_E	$100\cdot(0{,}5\cdot10^9/E)$	0,24
Погрешность скорости звука c	δ_c	$0{,}5\cdot\delta_E$	0,12
Погрешность площади пики S	δ_S	$100\cdot2\cdot(10^{-5}/d)$	0,07
Погрешность базы измерения базы B	δ_B	$100\cdot(2\cdot10^{-5}/B)$	0,04
Погрешность измерения времени $\Delta t_{\uparrow}$= 3,00 мс	$\delta_{\Delta t_{\uparrow}}$	$100\cdot(10^{-6}/3\cdot10^{-3})$	0,03
Погрешность измерения времени $\Delta t_{\downarrow}= B/(\lambda\nu_{\text{y}})$ = 13,04 мс	$\delta_{\Delta t_{\downarrow}}$	$100\cdot(10^{-6}/(\lambda\nu_{\text{y}}))$	0,01
Погрешность измерения расстояния z=110 мм	δ_z	$100\cdot(0{,}5\cdot10^{-3}/z)$	0,45

Вычислим интервал времени Δt от момента пересечения ударником верхнего луча до момента начала регистрации ударного импульса тензодатчиком (см. рис. 1, *г*):

$$\Delta t \cong h/v_{\text{y}} + z/c = 10^{-2}/15+110\cdot10^{-3}/5164 = 6{,}88\cdot10^{-4}\ \text{с}.$$

Примем неопределенность нахождения начала ударного импульса по предложенной методике 10% – 50% от амплитуды импульса $\sim 3\cdot10^{-6}$ с (см. рис. 1, *е*). Тогда погрешность измерения интервала времени $[\,t_2,\ t_3]$ составит $\delta_{t_2t_3}= 100\cdot(2+3)\cdot10^{-6}/\Delta t$ = 0,73 %.
Погрешность расчета времени Δt:

$$\delta_{\Delta t} = \sqrt{\delta_{t_2t_3}^2 + \delta_z^2 + \left[\frac{z}{c\Delta t}\right]^2 \delta_c^2} = 0{,}86\ \%.$$

Соответственно, погрешность определения расстояния h по формуле (1) составит:

$$\delta_h = \frac{v_y \Delta t}{h}\sqrt{{\delta_B}^2 + \delta^2_{\Delta t_\uparrow} + \delta^2_{\Delta t}} = 0{,}89\ \%.$$

Погрешность измерения предударной скорости v_y будет:

$$\delta_{v_y} = \sqrt{\delta_B^2 + \delta^2_{\Delta t_\uparrow} + \left(\frac{gh}{v_y^2}\right)^2 \delta_h^2} = 0{,}05\ \%.$$

Перемещение ударника за время контакта с пикой e = 0,460 мм (рис. 5, *б*), скорость отскока $v_o = \lambda v_y$ = 0,23·15 = 3,45 м/с. Поскольку $v_o^2 \gg 2ge$, перемещением ударника можно пренебречь. Тогда для погрешности скорости отскока получаем:

$$\delta_{v_o} = \sqrt{\delta_B^2 + \delta^2_{\Delta t_\downarrow} + \left(\frac{gh}{v_o^2}\right)^2 \delta_h^2} = 0{,}04\ \%.$$

Скорости удара и отскока измеряются практически с одинаковой погрешностью, поэтому можно считать, что $\delta_{v_o} = \delta_{v_y} = 0{,}05\ \%$.

Для регистрации ударного импульса и сигналов с фотодатчиков будем использовать аналого-цифровой преобразователь напряжения L-Card L-502, внесенный в государственный реестр измерений[10]. Предельная погрешность преобразователя $\delta_{\text{АЦП}}$, % при одноканальном режиме работы с частотой ввода данных 1 МГц в диапазоне частот сигнала свыше 100 кГц нормируется в виде:

$$\delta_{\text{АЦП}} = \pm\left[\alpha + \beta\left(\frac{X_{\text{оп}}}{\sqrt{2}X} - 1\right)\right],$$

где $X_{\text{оп}}$ – значение установленного предела измерений напряжения электрического тока; X – величина измеряемого напряжения электрического тока; α = 1,00 % и β = 0,03 % – соответственно, мультипликативная и аддитивная погрешности преобразователя.

Будем полагать, что амплитуда ударного импульса u_{max} находится в верхней трети шкалы установленного предела измерений преобразователя L-502, и она равна $X_{\text{оп}}/\sqrt{2}$.

Тогда погрешность интегрирования ударного импульса молотка МО-9К с помощью этого преобразователя составит:

$$\delta_1 = 100\frac{\int_0^{T_\leftrightarrow}[(\alpha-\beta)\psi(t)+\beta]dt}{\int_0^{T_\leftrightarrow}\psi(t)\,dt} = 1{,}03\ \%^{11},$$

[10] L-502 – 16-разрядный 16-ти канальный АЦП и ЦАП с частотой преобразования 2 МГц и входным диапазоном напряжений от ±0,2 до ±10,0 В. Метрологические характеристики преобразователя подтверждены Свидетельством об утверждении типа измерений RU.C.34.390.A № 68764 от 15.01.2018 г.

[11] Значение получено расчетом на модели удара [12].

где $T_{\leftrightarrow}$ – время от начала импульса до прихода отраженной волны, $T_{\leftrightarrow}$ = 343 мкс (см. рис. 5, *в*); $\bar{u}(t) = u(t)/u_{max}$ – безразмерный ударный импульс; $\psi(t)$ = [1+($\sqrt{2}$-1)$\bar{u}(t)$]/2 – импульс, приведенный к шкале [-1...+1].
Погрешность коэффициента чувствительности измерительного тракта δ_μ согласно (6) будет равна:

$$\delta_\mu = \sqrt{\delta_1^2 + \frac{1+\lambda^2}{(1+\lambda)^2}\delta_{v_y}^2 + \delta_E^2 + \delta_S^2 + \delta_п^2} = 1{,}04\ \%^{12},$$

а для погрешности интегрирования квадрата ударного импульса с помощью преобразователя L-502 получим:

$$\delta_2 = 100\,\frac{\int_0^{T_0}[(\alpha-\beta)\psi(t)\ +\beta)][(2+\alpha-\beta)\psi(t)\ +\beta]dt}{\int_0^{T_0}[\psi(t)]^2 dt} = 2{,}05\ \%.$$

Энергия ударного импульса – от начала импульса до первого нуля напряжения – вычисляется по формуле (5). Соответственно, ее погрешность δ_W оценим как:

$$\delta_W = \sqrt{\delta_2^2 + 4\delta_\mu^2 + \delta_c^2 + \delta_E^2 + \delta_S^2 + 4\delta_п^2} = 2{,}95\ \%.$$

На основе формулы (8) можно предложить другой метод определения энергии ударного импульса: регистрировать средний импульс при работе ударной машины и затем воспроизводить его на градуировочном стенде с расчетом кинетической энергии ударника и энергии его отскока. Критерием воспроизведения может служить амплитуда импульса или его площадь, которая пропорциональна количеству движения (см. формулу 3).
Тогда получается меньшая погрешность [16]:

$$\delta_W = \sqrt{\delta_1^2 + 4\delta_п^2 + 4(1+\lambda^2)\delta_{v_y}^2} + 0{,}5 = 1{,}58\ \%.$$

Достоинство этого метода состоит в одновременном получении и энергии ударного импульса, и энергии удара машины. Но зависимость (8) следует подтвердить экспериментально, и подтвердить ее для более широкого класса машин ударного действия, чем были рассмотрены в данном исследовании.

Заключение. Подведем итоги. Для оценки эффективности машин ударного действия целесообразен переход от измерения кинетической энергии ударника к измерению энергии ударного импульса в рабочем инструменте.
Задача повышения точности таких измерений может быть решена с помощью образцовых ударов, выполняемых на специальных стендах с оптической системой регистрации скорости ударника.
Для решения этой задачи в настоящей работе предложены:

[12] Погрешность длительности ударного импульса δ_T не учитываем, т.к. $\frac{\partial}{\partial T}\int_0^{T_0} u(t)dt = u(T_0) = 0$. Погрешности измерения массы ударника m и плотности ρ пренебрежимо малы – порядка 0,01 %.

- методы определения энергии ударного импульса с использованием закона сохранения количества движения;
- гипотеза и основанный на ней метод определения энергии ударного импульса как разности между кинетической энергией ударника перед ударом и его кинетической энергией при отскоке;
- вариант регистрации образцовых ударов с синхронной записью во времени сигналов оптической системы и измерительной пики, позволяющий более точно определять скорость ударника перед ударом и скорость его отскока, а также оценивать время контакта с пикой.

На примере образцового удара пневматического отбойного молотка МО-9К показано:
- применение закона сохранения количества позволяет аттестовать измерительный преобразователь (пику, штангу) и откалибровать измерительный тракт с погрешностью 1 %;
- с использованием аттестованного измерительного преобразователя возможно измерять энергию ударного импульса с погрешностью 3 % (без учета разброса экспериментальных данных, определяемого работой самой ударной машины);
- метод измерения, основанный на предложенной гипотезе, позволит измерять энергию ударного импульса с погрешностью порядка 2 %;
- снижение погрешности измерений возможно за счет более точных преобразователей напряжения электрического тока, применяемых для регистрации ударных деформаций.

На основании численного исследования ударных импульсов пневматических отбойных молотков и бетоноломов при скоростях соударения 5…15 м/с, охватывающих весь диапазон упругих соударений, установлены закономерности:
- с увеличением скорости соударения уменьшается длительность ударного импульса и скорость отскока ударника, увеличивается КПД передачи удара;
- при соударении с пикой постоянного сечения длительность контакта деталей совпадает с длительностью ударного импульса, а при соударении с пикой, имеющей бурт, длительность контакта оказывается меньше длительности импульса, а также меньше времени достижения нулевых напряжений;
- наличие бурта у измерительной пики, за счет отражения от него, приводит к возникновению низкоамплитудного знакопеременного волнового процесса, следующего за головной частью импульса;
- при отскоке от пики потенциальная энергия ударников современных отбойных молотков и бетоноломов во всем диапазоне скоростей упругого соударения не превосходит 0,5 % от энергии удара;
- при расчете количества движения ударного импульса следует интегрировать волновой процесс от его начала до прихода отраженной волны, а при расчете энергии импульса – только до первого нулевого значения регистрируемых напряжений.

Предложенные методы и проведенные исследования позволяют утверждать, что задача, поставленная Европейской Ассоциацией Производителей Электроинструмента по достижению 5 %-ой точности измерения энергии ударного импульса, является реальной, а применение образцовых ударов и приведенный анализ погрешностей измерений демонстрируют пути ее достижения.

Список литературы

1. Кашаев В.А., Ямпольский Д.З. Тензометрический метод измерения удара. Российский опыт. Достижения и перспективы. // Вестник научно-технического развития. - 2017. - № 2 (114). http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=1011 (дата обращения: 06.12.2016).

2. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. - М.: Наука, 1969.–201 с.
3. Кашаев В.А. Специальная аппаратура для исследования рабочих процессов во взрывоимпульсных горных машинах / Разрушение горного массива машинами взрыво-импульсного действия. Коллективная монография. - М.: Наука, 1974. – С. 127-134.
4. EPTA – The European Power Tools Association. Procedure 05 “Measurement of the single impact energy of rotary hammers and breakers”. Version 2.0– 23 p., 2016 / Европейская Ассоциация Производителей Электроинструмента. Методика измерения единичной энергии удара перфораторов и отбойных молотков. Версия 2.0 - 2016. – 23 с.
5. Рындин В.П. Определение энергетических параметров и совершенствование динамики ударных систем бурильных машин: дис. … докт. техн. наук: 05.05.06. – Кузбасский государственный технический университет, Кемерово, 2005. – 330 с.
6. Городилов Л. В., Ефимов В. П. Экспериментальное исследование ударных импульсов в системе «боек-инструмент» ударного устройства при взаимодействии с массивом. / Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - Том 6, № 2. – С. 46-51.
7. Ямпольский Д.З., Ванаев В.С. Анализ методики испытаний электрических машин с целью определения энергии удара. // Вестник машиностроения. – 2018. - № 7. – С. 47-54.
8. Ямпольский Д.З. Энергия удара или энергия ударного импульса: что и как измерять? // Вестник научно-технического развития. - 2021. - № 160. - С. 65-86. https://www.vntr.ru/vols/ 2021-160/vntr2021-160-6.pdf (дата обращения 25.02.2021).
9. Will Didier. Development and Validation of a Mathematical Model for Predicting the Performance of Rotary Hammer Drills (2013). Theses and Dissertations. 88. University of Wisconsin-Milwaukee. https://dc.uwm.edu/etd/88.
10. Ямпольский Д.З. Некоторые особенности ударных импульсов машин ударного действия. // Вестник научно-технического развития. - 2020. - № 4 (152). - С. 26- 42. http://www.vntr.ru/ vols/ 2020-04/vntr2020-152-4.pdf (дата обращения: 11.05.2020).
11. Стихановский Б.Н., Стихановская Л.М. Определение коэффициентов восстановления скоростей при ударе бойка по инструменту в узлах строительных и горных машин. // Вестник СибАДИ. - 2017, выпуск 6 (58). – С. 8-16.
12. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
13. Ямпольский Д.З. Численное моделирование продольного удара. Сравнение с экспериментом. // Вестник научно-технического развития. - 2019. - № 9 (145). - С. 30-51. http://www. vntr.ru/vols/2019-09/vntr2019-145-4.pdf (дата обращения: 04.09.2019).
14. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В.Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г.Драгунова и А.С.Зубченко. – М.: 2014. - 1216 с.
15. Пути улучшения эксплуатационных показателей машин ударного действия. Краткий научный отчет / Александров Е.В., Соколинский В.Б. и др. – М.: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1968. – 55 с.
16. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. –262 с.

Дата поступления: 29 июля 2023 г.