

М126751

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

П. С. ОКСЕНЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРИВОДНЫХ МОЛОТОВ
С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

(05.165 — Оборудование и машины кузнечно-прессового
производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Экспериментальном научно-исследовательском институте кузнечно-прессового машиностроения — ЭНИКМАШе.

Научный руководитель — заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор
Зимин А. И.

Официальные оппоненты:

д. т. н., проф. Власов В. И.

к. т. н. Шеглов В. Ф.

Ведущий

ного Совета.

Авто

. . . 1971 г.

Защита

. . . 1971 г.

на заседании

Н. Э. Бай-

мана по

5.

С дн

теке МВТУ.

M126751

А. Степанов



1126751

Оксененко П.С. Исследова-

В в е д е н и е

Технологические возможности пневматических приводных молотов как оборудования свободнойковки ограничены постоянной частотой ударов и как оборудования горячей штамповки - включением одиночного удара как частного случая автоматических.

Крановые и золотниковые системы воздухораспределения пневматических молотов были разработаны еще в 1905 - 1908 гг. и сохранились до наших дней без существенных изменений. Известные теоретические исследования определили возможности их усовершенствования на принципиально новой основе, пока скрытой рядом неясностей, противоречиями между теорией и экспериментами.

Работа посвящена исследованию процесса передачи энергии электропривода падающим частям через динамическую систему с пневматическими пружинами.

Диссертация состоит из шести глав: состояние вопроса (гл. I), цели и задачи исследований (гл. II), теоретических исследований (гл. III), методики экспериментальных исследований (гл. IV), экспериментальных исследований (гл. V), технико-экономических исследований эффективности применения клапанных систем воздухораспределения пневматических приводных молотов (гл. VI).

Экспериментальная часть работы выполнена в лабораториях и на опытном заводе Экспериментального научно-исследовательского института кузнечно-прессового машиностроения - ЭНИКМАШ, а также в лаборатории динамической металлокерамики Новочеркасского политехнического института и в кузнечном цехе Воронежского завода им. М.И.Калинина.

Глава I

Состояние вопроса

Известными теоретическими исследованиями уравнение движения падающих частей пневматического приводного молота приведено к виду:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \lambda_i^2(x - a) = -b_i(\cos \alpha + \frac{k}{4} \cos 2\alpha);$$

где x — перемещение падающих частей, считая от линии поковки в см;

λ — частота собственных колебаний системы молота;

k — коэффициент шатуна;

a и b — постоянные коэффициенты линейного дифференциального уравнения колебательного движения второго порядка;

$\alpha = \omega t$ — фазовый угол;

ω — угловая скорость кривошипного вала молота в сек⁻¹;

t — время.

Закон движения падающих частей пневматического приводного молота определяется частным видом линейного дифференциального уравнения колебательного движения второго порядка с постоянными коэффициентами и правой частью. Дифференцированием уравнения движения Е.П.Унсов в 1938 г. обосновал возможность повышения энергетических и технико-экономических показателей пневматических молотов за счет ввода их динамических систем в резонанс.

Исследованию явлений резонанса динамической системы пневматического молота посвящены работы П.А.Дунаева, Sakai Sehei. По методам энергетических расчетов этих молотов получили широкое распространение работы проф. А.И.Зимина.

Экспериментально основной резонанс не выявлялся, а дробный избирательный вызвал аварийные ситуации при резком включении ударов с верхнего положения падающих частей.

Дроссельное регулирование энергии ударов и постоянная их частота, обеспечиваемые крановым и золотниковым управлением, завышают приводную мощность, исключают возможности использования одиночных ударов в штамповочном режиме и затрудняют автоматизацию управления.

Известные исследования пневматических молотов остались незаконченными и не дали положительных решений для практического использования.

Глава II

Цели и задачи исследования

Изученные литературные источники свидетельствуют о том, что проведенные исследования по динамике системы: масса падающих частей – упругость пневматических звеньев являются недостаточными как в области теоретических решений, так и в области постановки эксперимента.

Теоретические исследования не затрагивают вопросов объемного управления энергией, частотой автоматических ударов, причин аварийных ситуаций, автоматизации управления.

В соответствии с изложенным определяются задачи настоящего исследования:

- а) дать качественную оценку причинам разрушения верхней крышки рабочего цилиндра;
- б) дать качественную оценку явлениям резонанса и определить возможности их использования;
- в) определить характер раскрытия динамической системы молота на удар;
- г) провести поиск возможностей изменения частоты автоматических ударов в зависимости от их энергии;
- д) провести теоретический анализ уравнения движения падающих частей и представить расчетные схемы и формулы для проектирования молотов с клапанным автоматическим воздухораспределением.

Поисковая тема: "Разработка и изготовление установки для управления пневматическим молотом М415А" – зарегистрирована в Комитете по делам изобретений и открытий при СМ СССР за № 40288 от 5.X.1963 г.

Основными методами теоретических исследований являются преобразование и приведение уравнения движения к тригонометрическому ряду, гармонический анализ, представление некоторых решений на фазовую плоскость, моделирование энергетических параметров удара и процессов в полостях молота на аналоговой вычислительной машине МН-7.

Экспериментальные исследования проводились с использованием современных средств измерительной аппаратуры, датчиков и приборов, в том числе измерительной киносъемки и специального самописца.

В качестве целевых установок при экспериментальном исследовании принято:

а) установить характер движения падающих частей при ударах переменной энергии;

б) экспериментальная проверка возможностей измерительной кинокамеры АК-16 при исследовании молота;

в) экспериментальная проверка характера изменения энергии одиночных ударов, включаемых со сдвигом конечной и начальной фаз;

г) запись текущих жесткостей пневматических пружин динамической системы при ударах переменной энергии;

д) экспериментальное исследование "толчка" динамической системы, включаемого сдвигом начальной фазы кинематического возбуждения;

е) экспериментальная проверка зависания падающих частей в зоне "застоя";

ж) осциллографирование временных характеристик аппаратуры и устройств автоматического привода клапанов молота;

з) определение разброса характеристик аппаратуры в системе управления, оценка их влияния на стабильность ударов, корректирование расчетной фазовой диаграммы для ударов переменной энергии;

к) экспериментальная оценка оптимальности выбора встречного пропорционального сдвига начальной и конечной фаз при управлении энергией удара.

Теоретические исследования пневматических приводных
МОЛОТОВ

Теоретические исследования в работе представлены тремя разделами. В первом разделе определены условия потери устойчивости динамической системы: масса падающих частей - упругость пневматических звеньев и характер ее раскрытия на удар.

Исследование проведено путем преобразования уравнения движения после дифференцирования на основных углах фазовой диаграммы и приведения его к 24-членному тригонометрическому ряду. Один член тригонометрического ряда является постоянным числом и пять - близки или равны нулю:

$$\begin{aligned}
 x_2 = & \Omega_2 + \\
 & + \frac{K}{4} \left(2 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \cos(\lambda_2 t - \omega t_1 + \lambda_1 t_1 - \lambda_1 t - \lambda_2 t_2) + \\
 & + \frac{L}{4} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cos(\lambda_2 t + \omega t_1 - \lambda_1 t_1 + \lambda_1 t + \lambda_2 t_2) + \\
 & + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{M+N}{4} \right) \cos(\lambda_2 t - 2\omega t_1 + \lambda_1 t_1 - \lambda_1 t + \lambda_2 t_2) + \\
 & + \frac{M+N}{2} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \cos(\lambda_1 t + 2\omega t_1 - \lambda_1 t_1 + \lambda_2 t - \lambda_2 t_2) + \\
 & + \frac{M+N}{2} \cos(\lambda_2 t - 2\omega t_1 + \lambda_1 t_1 - \lambda_1 t - \lambda_2 t_2) + \\
 & + \frac{M+N}{2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cos(\lambda_2 t + 2\omega t_1 - \lambda_1 t_1 - \lambda_1 t + \lambda_2 t_2) + \\
 & + \frac{Q_2}{2} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \cos(\lambda_2 t - \lambda_1 t_1 + \lambda_1 t - \lambda_2 t_2) + \\
 & + \frac{Q_1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \cos(\lambda_2 t - \lambda_2 t_1 + \lambda_1 t - \lambda_2 t_2) - \\
 & - \frac{\omega}{\lambda_2} \frac{b_2}{2(\lambda_2^2 - \omega^2)} \cos(\lambda_2 t - \omega t + \lambda_2 t_2) + \\
 & + \frac{b_2}{4(\lambda_2^2 - \omega^2)} \left(1 + \frac{\omega}{\lambda_2} \right) \cos(\lambda_2 t + \omega t - \lambda_2 t_2) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - (\alpha_1 + \alpha_2) \cos(\lambda_2 t - \lambda_1 t_2) + \\
& + (\alpha_1 + \alpha_2) \cos(\lambda_2 t + \lambda_1 t_2) + \\
& + \frac{L}{4} \left(1 + \frac{\lambda_1}{2\lambda_2}\right) \cos(\lambda_2 t - \omega t - \lambda_1 t_1 + \lambda_1 t + \lambda_2 t_2) + \\
& + \frac{L}{4} \left(3 - \frac{\lambda_1}{2\lambda_2}\right) \cos(\lambda_2 t + \omega t + \lambda_1 t_1 - \lambda_1 t - \lambda_2 t_2) + \\
& + \frac{L}{4} \left(3 - \frac{\lambda_1}{2\lambda_2}\right) \cos(\lambda_2 t - \omega t - \lambda_1 t_1 + \lambda_1 t - \lambda_2 t_2) + \\
& + \frac{L}{2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cos(\lambda_2 t + \omega t + \lambda_1 t_1 - \lambda_1 t + \lambda_2 t_2) + \\
& + \frac{3L}{4} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cos(\lambda_2 t + \lambda_1 t_1 + \omega t_1 + \lambda_1 t + \lambda_2 t_2) - \\
& - \frac{L}{4} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cos(\lambda_2 t + \lambda_2 t_2 - \omega t_1 + \lambda_1 t_1 - \lambda_1 t) + \\
& + \frac{L}{4} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cos(\lambda_2 t + \lambda_1 t + \omega t_1 + \lambda_1 t_1 - \lambda_2 t_2) + \\
& + \frac{K}{4} \cos(\lambda_2 t - \lambda_2 t_2 + \omega t_1 - \lambda_1 t_1 + \lambda_1 t) + \\
& + \frac{b_2}{2(\lambda_2^2 - \omega^2)} \cos(\lambda_2 t - \omega t_2 + \lambda_2 t_2) - \\
& - \frac{b_2}{2(\lambda_2^2 - \omega^2)} \cos(\lambda_2 t + \omega t_2 - \lambda_2 t_2) - \\
& - \frac{b_2}{\lambda_2^2 - \omega^2} \cos \omega t
\end{aligned}$$

где

$$K = 0,5 \frac{b_1}{\lambda^2 - \omega^2} \left(1 + \frac{\omega}{\lambda_1}\right); \quad M = 0,5 \frac{b_1 k}{4(\lambda^2 - 4\omega^2)} \left(1 + \frac{2\omega}{\lambda_1}\right);$$

$$L = 0,5 \frac{b_1}{\lambda^2 - \omega^2} \left(1 - \frac{\omega}{\lambda_1}\right); \quad N = 0,5 \frac{b k}{4(\lambda^2 - 4\omega^2)} \left(1 - \frac{2\omega}{\lambda_1}\right).$$

Использование приведенного тригонометрического ряда позволило определить амплитудно-частотную характеристику динамической системы пневматического приводного молота, исследовать

законы движения падающих частей при различных глубинах отстройки системы от резонанса, определить причины ударов падающих частей в верхнюю крышку рабочего цилиндра при аварийных ситуациях.

Второй раздел теоретических исследований посвящен параметрическому резонансу системы: масса падающих частей — упругость пневматических звеньев.

Неустойчивость системы при различных отстройках от резонанса определена алгебраическими критериями. Причины потери устойчивости определены гармоническим анализом по методу Эйлера-Фурье. Пределы интегрирования уравнения движения установлены по основным углам фазовой циклограммы кинематического возбуждения

$$\begin{aligned} \alpha'_0 = & \alpha_{\frac{4}{\pi}}^4 \int_0^{\frac{\pi}{4}} dt_1 + C_1 \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_1 t_1 dt_1 + C_2 \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_1 t_1 dt_1 - \\ & - \frac{b}{\lambda^2 - \omega^2} \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_1 dt_1 - \frac{b, k}{4(\lambda^2 - 4\omega^2)} \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_1 dt_1 + \\ & + \alpha_{\frac{2}{\pi}}^2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} dt_2 + C_3 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_2 t_2 dt_2 + C_4 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_2 t_2 dt_2 - \\ & - \frac{b_2}{\lambda_2^2 - \omega^2} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_2 dt_2 - \frac{b_2 k}{4(\lambda_2^2 - 4\omega^2)} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_2 dt_2 + \\ & + \alpha_{\frac{2}{\pi}}^2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} dt_4 + C_7 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_4 t_4 dt_4 + C_8 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_4 t_4 dt_4 - \\ & - \frac{b_4}{\lambda_4^2 - \omega^2} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_4 dt_4 - \frac{b_4 k}{4(\lambda_4^2 - 4\omega^2)} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_4 dt_4 ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha'_n = & \alpha_{\frac{4}{\pi}}^4 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos t_1 dt_1 + C_1 \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_1 t_1 \cos t_1 dt_1 + C_2 \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_1 t_1 \cos t_1 dt_1 - \\ & - \frac{b_1}{\lambda^2 - \omega^2} \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_1 \cos t_1 dt_1 - \frac{b, k}{4(\lambda_1^2 - 4\omega^2)} \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_1 \cos t_1 dt_1 + \\ & + \alpha_{\frac{2}{\pi}}^2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos t_2 dt_2 + C_3 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_2 t_2 \cos t_2 dt_2 + C_4 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_2 t_2 \cos t_2 dt_2 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{b_2}{\lambda_2^2 - \omega^2} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_2 \cos t_2 dt_2 - \frac{b_2 k}{4(\lambda_2^2 - 4\omega^2)} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_2 \cos t_2 dt_2 + \\
& + a_4 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos t_4 dt_4 + C_7 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_4 t_4 \cos t_4 dt_4 + C_8 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_4 t_4 \cos t_4 dt_4 - \\
& - \frac{b_4}{\lambda_4^2 - \omega^2} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_4 \cos t_4 dt_4 - \frac{b_4 k}{4(\lambda_4^2 - 4\omega^2)} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_4 \cos t_4 dt_4;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_n = & a_1 \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin t_1 dt_1 + C_1 \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_1 t_1 \sin t_1 dt_1 + C_2 \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_1 t_1 \sin t_1 dt_1 - \\
& - \frac{b_1}{\lambda_1^2 - \omega^2} \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_1 \sin t_1 dt_1 - \frac{b_1 k}{4(\lambda_1^2 - 4\omega^2)} \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_1 \sin t_1 dt_1 + \\
& + a_2 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin t_2 dt_2 + C_3 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_2 t_2 \sin t_2 dt_2 + C_4 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_2 t_2 \sin t_2 dt_2 - \\
& - \frac{b_2}{\lambda_2^2 - \omega^2} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_2 \sin t_2 dt_2 - \frac{b_2 k}{4(\lambda_2^2 - 4\omega^2)} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_2 \sin t_2 dt_2 + \\
& + a_4 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin t_4 dt_4 + C_7 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \lambda_4 t_4 \sin t_4 dt_4 + C_8 \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \lambda_4 t_4 \sin t_4 dt_4 - \\
& - \frac{b_4}{\lambda_4^2 - \omega^2} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos \omega t_4 \sin t_4 dt_4 - \frac{b_4 k}{4(\lambda_4^2 - 4\omega^2)} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos 2\omega t_4 \sin t_4 dt_4;
\end{aligned}$$

Анализ амплитуд и начальных фаз высших гармоник показал избирательное резонирование динамической системы частотам кинематического и силового возбуждения.

Динамическая система пневматического молота, введенная в дробный избирательный резонанс, повышает коэффициент полезного действия, увеличивает передаваемую мощность, скорость и энергию удара.

Способ практического использования резонирующей системы заключается в том, что энергия электропривода сначала накапливается маховиком при глубокой отстройке динамической системы от резонанса, обеспечивающей безаварийный плавный подъем падающих частей. В момент начала движения падающих частей вниз изменяется жесткость пневматических пружин, динамическая система вводится в дробный избирательный резонанс.

Благодаря резкому увеличению энергоемкости динамической

системы кинетическая энергия маховика поглощается. Система раскрывается на удар, передавая всю накопленную энергию поковке.

Третий раздел теоретических исследований посвящен способам управления энергией и частотой ударов. Способ управления энергией ударов заключается в изменении полноты циклов работы компрессорного цилиндра. Приемлемость предложенного способа для практики определилась варьированием различных схем сдвига начальных и конечных фаз на аналоговой вычислительной машине МН-7. Моделирование энергетических параметров отдельных ударов производилось интегрированием дифференциального уравнения движения падающих частей:

$$m\ddot{x} = p_1 f_1 - p_2 f_2 + p_0(f_2 - f_1) + P(1 + \varphi \operatorname{sign} \dot{x});$$

где P_1 и P_2 — давление в нижних и верхних полостях молота;
 p_0 — начальное давление в полостях молота;
 f_1 и f_2 — площадь поршня рабочего цилиндра со стороны нижней и верхней полостей;
 P — вес падающих частей;
 φ — коэффициент сухого трения;
 x — перемещение падающих частей, считая от линии поковки.

Для подстановки значений P_1 и P_2 вводятся обозначения

$$\mu_1 = \frac{p f_3}{V_{01} + r(1 + \cos \alpha) f_3}; \quad \mu_2 = \frac{p f_4}{V_{02} + H f_2 + r(1 - \cos \alpha) f_4}; \quad \frac{f_1}{f_3} = \alpha_1'';$$

$$\frac{f_2}{f_4} = \alpha_2''; \quad \delta_1 = \mu_1 [\cos \alpha_0 - \cos(\omega t + \alpha_1)] - \alpha_1'' x;$$

$$\delta_2 = \mu_2 [\cos \alpha_0 - \cos(\omega t + \alpha_2)] - \alpha_2'' x;$$

где V_{01} и V_{02} — начальные объемы нижней и верхней полостей;
 f_3 и f_4 — площади поршня компрессора со стороны нижней и верхней полостей;
 r — радиус кривошипа компрессора;
 H — монтажный ход поршня рабочего цилиндра.

После подстановки дифференциальное уравнение принимает вид

$$m\ddot{x} = f_1 p_0 \left(\frac{1}{1 - \delta_1} \right)^K - f_2 p_0 \left(\frac{1}{1 + \delta_2} \right) + p_0(f_2 - f_1) - mg(1 - \varphi \operatorname{sign} \dot{x});$$

где K - показатель адиабаты; g - ускорение силы тяжести.

Заменой переменных $x = ZE$; $t = \tau/\beta$ и делением уравнения движения на $mE\beta^2$ оно приводится к безразмерной форме

$$\ddot{Z} = F_1(\bar{q}_1) - F_2(\bar{q}_2) + \Theta_1 - \Theta_2 \operatorname{sign} \dot{Z};$$

где:

$$F_1(\bar{q}_1) = \frac{f_1 p_0}{mE\beta^2} \left(\frac{1}{1 - \bar{q}_1} \right)^K; \quad \Theta_1 = \frac{p(f_2 - f_1) - mg}{mE\beta^2}$$

$$F_2(\bar{q}_2) = \frac{f_2 R}{mE\beta^2} \left(\frac{1}{1 + \bar{q}_2} \right)^K; \quad \Theta_2 = \frac{\varphi g}{\mu\beta^2}.$$

Уравнение движения в безразмерной форме проинтегрировано на электронной моделирующей установке МН-7. Движение падающих частей на последних двух участках фазовой диаграммы начинается с сообщения верхней полости рабочего и компрессорного цилиндра с атмосферой, что определяет изменение p_2 .

Блок-схема для интегрирования уравнения движения на этих участках остается неизменной.

Используя сдвиг начальной фазы для изменения энергии ударов и конечной фазы для вписывания периодического движения падающих частей в цикл работы компрессорного цилиндра, определены оптимальные и приемлемые для практического использования их соотношения.

Глава IV

Методика экспериментальных исследований

"Автографом" любой динамической системы является ходограмма колебательного движения ее массы. К числу наиболее совершенных способов записи таких кривых следует отнести методы, использованные А.Н.Крыловым и Е.П.Унковым. Эти методы использованы с применением более совершенной измерительной киноаппаратуры. Методами измерительной киносъемки была протарирована тросиковая связь между падающими частями и перьями самописцев. Установлено, что последняя имеет удовлетворительную точность и приемлема для записи ходограммы движения падающих частей при ударах переменной энергии. К достоинствам записи ходограмм движения падающих частей указанным самописцем следует отнести наглядность и возмож-

ность получения обширного экспериментального материала.

Запись индикаторных диаграмм при помощи датчиков давления, усилителей и осциллографа обеспечила установление характера силового возбуждения динамической системы и текущей жесткости пневматических пружин.

Энергия удара, определяемая осадкой крешеров, характеризует энергоемкость раскрывающейся динамической системы в конце цикла. Разработан специальный самописец с оригинальными наливными перьями. Разработана методика тарировок измерительной киноаппаратуры, масштабирования, автоматизации и механизации обработки измерительных фильмов. Предложены три авторские заявки на измерительную аппаратуру.

Глава V

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились в кузнечном цехе Воронежского завода КПО им. М.И.Калинина, в лабораторном корпусе кафедры динамической металлокерамики Новочеркасского политехнического института на молоте МЧ15А с устройством программирования энергетического режима горячей штамповки (брикетирования) металлической стружки, а также в лабораторном корпусе ЭНИКМаша на молоте МГ412 с автоматическим клапанным воздухораспределением. Экспериментальные исследования заключались в записи ходограмм движения падающих частей, в определении скорости и энергии ударов, в снятии индикаторных диаграмм и осциллографировании временных характеристик аппаратуры, устройств автоматического управления и клапанного воздухораспределения.

На молоте М415А монтировалась экспериментальная установка УАМ100 и вводилась в кинематическое взаимодействие с кранами управления. На молоте МГ412 краны управления фиксировались в положении полных "автоматических ударов", а управление энергией и числом ударов осуществлялось через клапаны, установленные вместо крышек атмосферных каналов ("решеток") компрессорного цилиндра.

Время срабатывания систем воздухораспределения определялось осциллографированием и при помощи электрического миллисекундомера.

Записаны ходограммы клапанов системы воздухораспределения и индикаторные диаграммы, характеризующие процессы мятия энергопотоков клапанами при включении и выключении ударов различной энергии и "толчков".

Записью ходограмм при помощи измерительной кино съемки и самописцев подтверждены расчетные параметры ударов, регулируемой энергии, реальность "толчка" и зоны "застоя". Осадкой крешеров подтверждена зависимость энергоемкости раскрывающейся динамической системы молота на удары переменной энергии от сдвига начальной и конечной фаз. Сопоставление расчетных параметров динамической системы с экспериментальными показало их удовлетворительную сходимость.

Экспериментальная установка УАМ100 сдана комиссии Новочеркасского политехнического института, а молот МР412 с клапанным воздухораспределением - комиссии ЭНИСМАШа.

Глава VI

Технико-экономические исследования эффективности применения клапанных систем воздухораспределения пневматических приводных молотов

Экономический эффект от внедрения обоснованных способов повышения энергетических и технико-экономических показателей, устройств их реализации и автоматического управления определяется экономией электроэнергии, автоматизацией и расширением технологических возможностей свободнойковки и горячей штамповки. Замена дроссельного способа управления объемным позволяет повысить экономичность молота, исключить его перегревание. Автоматическое изменение частоты ударов в зависимости от их энергии и маховиковый привод с повышенным скольжением обеспечивают уменьшение приводной мощности в несколько раз. Ввод динамической системы молота в параметрический резонанс обеспечивает резкое повышение коэффициента полезного действия передачи энергии электропривода падающим частям.

Программирование энергетического режима горячей штамповки на пневматических приводных молотах определяет экономический эффект за счет повышения производительности и исключения руч-

ного труда.

Расширение технологических возможностей свободнойковки и горячей штамповки на пневматических приводных молотах до уровня паровоздушных определяет значительный экономический эффект за счёт замены последних пневматическими с весом падающих частей до 3-х тонн.

Модернизация пневматических приводных молотов, обеспечивающая использование указанных выше способов повышения энергетических и технико-экономических показателей, сводится к изготовлению и монтажу на молоте командоаппарата, клапанов и емкостей, а также к замене маховика и в некоторых случаях и шабота. Затраты на изготовление командоаппарата увеличивают стоимость молота на 15 + 20 процентов.

Годовой экономический эффект от замены одного паровоздушного молота с весом падающих частей 1 т эквивалентным пневматическим приводным с клапанной системой воздухораспределения составляет 20,3 тыс.руб. при окупаемости затрат за 10 дней работы.

Общие выводы

I. Крановые и золотниковые системы воздухораспределения приводных пневматических молотов в настоящий момент морально устарели, так как не обеспечивают реализации энергетических возможностей, определяемых теоретическими исследованиями.

Пневматические приводные молоты мало используются на процессах свободнойковки в основном производстве и совершенно не приспособлены для горячей штамповки. Процессы штамповки изделий из металлокерамики определяют значительную потребность в штамповочных пневматических приводных молотах с программным управлением и автоматическими подачами.

II. В результате проведенной работы выполнены комплексные экспериментально-теоретические исследования динамики системы: масса падающих частей - упругость пневматических пружин. Предложено два метода энергетического расчета пневматических приводных молотов, обеспечивающих качественную оценку параметров динамической системы.

В качестве основного метода расчета динамических явлений в системе энергопередачи молота для широкой инженерной прак-

тики рекомендовано разложение решения дифференциального уравнения в тригонометрический ряд методом преобразований или интегрированием по методу Эйлера-Фурье. Использование указанных методов расчета позволило определить резонансную кривую динамической системы молота и определить параметры дробных резонансов, а также исследовать переходные процессы при потере устойчивости и особенности автоколебаний.

Исследованы энергетические показатели ударов, включаемых без сопротивления "среды" в динамической системе и дросселей в пневмопередаче между полостями рабочего и компрессорного цилиндров.

Построены фазовые траектории массы падающих частей, определены координаты зоны "застоя" и характер раскрытия динамической системы на удар в конце периода параметрического возбуждения.

Методами гармонического анализа определены условия и причины возникновения "толчка" в динамической системе молота, способы его использования.

Система энергопередачи пневматического приводного молота МБ412 была смоделирована на аналоговой вычислительной машине МН-7. Применение аналоговой вычислительной машины позволило уточнить линейное аппроксимирование уравнения адиабаты на блоках нелинейности, а также наглядно представить на экране электронно-лучевого индикатора процесс изменения энергетических показателей удара, управляемого объемным способом.

Ш. На основе теоретических и экспериментальных исследований даны рекомендации по усовершенствованию системы воздухо-распределения, расширению технологических возможностей свободнойковки и горячей штамповки на пневматических приводных молотах, исключению аварийных ситуаций при автоматическом и ручном управлении, повышению экономичности привода.

Управление энергией ударов изменением цикловой производительности компрессорного цилиндра обеспечивает:

- а) замену дроссельного способа управления объемным;
- б) упрощение системы воздухо-распределения;
- в) упрощение системы автоматического управления;
- г) использование новых способов управления.

Изменение параметров системы на заданных фазовых углах цикла обеспечивает:

- а) исключение аварийных ситуаций при автоматическом включении ударов с верхнего положения падающих частей;
- б) равномерную нагрузку электропривода;
- в) уменьшение размеров верхнего буфера рабочего цилиндра.

Повышение энергетических параметров удара максимальной энергии за счет:

- а) отстройки и ввода динамической системы в дробный избирательный резонанс;
- б) ступенчатого изменения энергоемкости динамической системы;
- в) увеличения момента инерции маховика и скольжения приводного электродвигателя.

Повышение производительности и расширение технологических возможностей свободнойковки и горячей штамповки за счет:

- а) работы молота одиночными ударами в штамповочном режиме;
- б) рубки одиночными ударами с задержкой верхнего бойка на инструменте после удара;
- в) подъема падающих частей с нижнего положения на верхнее за один цикл работы компрессора;
- г) использования автоматического управления частотой ударов в зависимости от их энергии.

IV. Выполнение вышеизложенных рекомендаций обеспечивает разработку и внедрение пневматического приводного молота с автоматической клапанной системой воздухораспределения в ковочном и штамповочном исполнении с технологическими возможностями свободнойковки и горячей штамповки на уровне паровоздушных.

Предложенные усовершенствования пневматических приводных молотов обеспечивают:

повышение экономичности привода в два раза за счет замены дроссельного управления объемным;

повышение коэффициента полезного действия пневматического приводного молота на $20 + 30\%$ за счет ввода его динамической системы в параметрический резонанс;

уменьшение приводной мощности в 4 - 5 раз за счет изменения частоты в зависимости от энергии ударов;

расширение технологических возможностей свободнойковки и горячей штамповки до уровня паровоздушных и их замену более экономичными пневматическими с клапанным воздухораспределением;

Результаты работы использованы при разработке технического предложения на пневматические приводные молоты-автоматы для штамповки изделий из металлокерамики.

Результаты работы по этапам рассматривались на заседаниях ученых Советов ряда вузов, привлеченных ВНИИГПЭ (г. Москва, 1968 - 1970 гг.) к составлению заключений на новые способы и устройства управления энергопередачей через динамическую систему с пневматическими пружинами; на заседании научно-технического Совета ЭНИКМАШ (г. Воронеж, 1970).

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Оксененко П.С. Работа пневматического приводного молота в автоматической линии горячего брикетирования металлической стружки. В сб. "Автоматическое управление кузнечно-прессовыми машинами", "Машиностроение", М., 1965, ЭНИКМАШ, вып. 10.
2. Оксененко П.С. Возможности усовершенствования пневматических приводных молотов. В сб. "Кузнечно-прессовое оборудование. Исследование и конструирование". "Машиностроение", М., 1963, ЭНИКМАШ, вып. 14.
3. Оксененко П.С. Определение условий безаварийного автоматического включения удара пневматического приводного молота. В сб. "Механизация и автоматизация кузнечно-прессового оборудования". "Машиностроение", М., 1971, вып. 23.
4. Оксененко П.С., Пухлов Э.В. Автоматическое включение одиночного удара неполной энергии пневматического молота. В сб. "Механизация и автоматизация кузнечно-прессового оборудования". "Машиностроение", М., 1971, ЭНИКМАШ, вып. 23.