

РАЗДЕЛ IV ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.73.06

Рей Р. И.
Гутько Ю. И.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСШАБОТНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОЛОТА

Бесшаботные молоты являются самым мощным оборудованием по производству штампованных поковок, в том числе из труднодеформируемых сплавов [1]. У молотов с пневматическим [1] и гидравлическим приводами [2, 3], сила, обеспечивающая движение, прикладывается к одной из баб. Движение другой бабы осуществляется повышением или понижением давления в гидробаке посредством плунжеров, на которые опирается приводимая в движение баба.

Анализы уравнений движения баб, для случая привода в действие молота приложением силы к одной из баб, приведены в работе [4] без учета, а в работе [5] с учетом сил трения в направляющих и уплотнениях плунжеров показывает, что скорость каждой бабы описывается уравнением прямой линии, на которую накладывается гармоническая составляющая (член содержит $\sin\omega t$) колебания происходят в противофазе. Если к началу удара больше скорость верхней бабы, общий центр масс баб смещается вниз, что приводит к повышению давления в гидробаке; если больше скорость нижней бабы, общий центр масс баб смещается вверх с возможным образованием зазоров в стыках узла гидросвязи баб. В любом случае, как во время движения баб, так и после удара происходит изменение давления жидкости в гидробаке связи баб, которое приводит к колебаниям фундамента генерирующего сейсмические колебания грунта, которые возбуждают вибрации объектов окружающей среды. Для смягчения указанных последствий при проектировании бесшаботных молотов выполняют нижнюю бабу на 5...10 % тяжелее верхней, задают максимально допустимую разницу в скоростях баб, обычно не превышающую 0,3 м/с.

Цель работы – найти соотношения активных сил и масс баб, при которых будут отсутствовать гармонические составляющие в уравнениях перемещений и скоростей баб, а к моменту удара бабы будут обладать одинаковым количеством движения.

Принципиальная схема молота включает нижнюю (m_1) и верхнюю (m_2) бабы, узел гидравлической связи баб и узел гидравлического привода. Для обеспечения устойчивого положения нижней бабы в нижнем положении ее выполняют большей по массе, площадь плунжеров, на которые опираются бабы, определяются по зависимости:

$$f = f_n = f_g = \frac{gm_2}{p_{cm}}, \quad (1)$$

где f_n – суммарная площадь плунжеров, на которые опирается нижняя баба;

f_g – суммарная площадь плунжеров, на которые опирается верхняя баба;

g – ускорение свободного падения;

m_2 – масса верхней бабы;

p_{cm} – давление жидкости в гидробаке связи баб при неподвижных бабах.

Жесткость узла гидросвязи баб включает три жесткости: c_1 – жесткость нижнего амортизатора; c_2 – приведенная к плунжерам жесткость жидкости гидробака, определяется по зависимости:

$$c_2 = \frac{f^2 \cdot E}{V}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости жидкости;

V – объем жидкости гидравлического бака связи баб;

c_3 – жесткость амортизаторов верхней бабы.

Подвижная система молота представляет собой две массы, соединенные упругой связью. Физическая модель системы представлена на рис. 1.

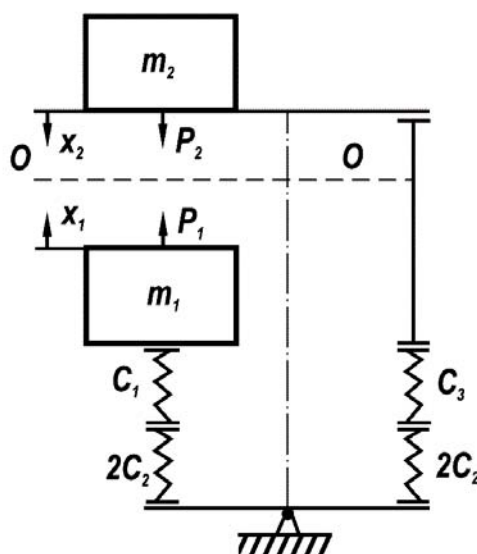


Рис. 1. Физическая модель подвижной системы молота:

m_1, m_2 – массы нижней и верхней баб; P_1, P_2 – постоянные силы, действующие со стороны привода на нижнюю и верхнюю бабы; c_1, c_2, c_3 – жесткости: c_1 – нижнего амортизатора; c_2 – приведена к плунжеру жидкости гидробака; c_3 – амортизаторов верхней бабы

Уравнение движения системы имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1 x_1'' + kx_1 - kx_2 &= P_1 \eta(t); \\ -kx_1 + m_2 x_2'' + kx_2 &= P_2 \eta(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\eta(t)$ – единичная функция Хевисайта, $\eta(t) = \begin{cases} 1, & t > 0, \\ 0, & t < 0; \end{cases}$

k – приведенная жесткость узла гидросвязи, $k = \frac{c_1 \cdot c_2 \cdot c_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}$.

Начальные смещения и скорости масс равны нулю, преобразуя уравнения движения системы (3) по Лапласу [5], получим:

$$\begin{aligned} (m_1 s^2 + k) x_1(s) - kx_2(s) &= P_1/s; \\ -kx_1(s) + (m_2 s^2 + k) x_2(s) &= P_2/s. \end{aligned} \quad (4)$$

Изображения реакций $x_1(s)$ и $x_2(s)$ находятся по правилу Крамера:

$$x_1(s) = \frac{\begin{vmatrix} P_1/s & -k \\ P_2/s & m_2 s^2 + k \end{vmatrix}}{\Delta(s)s} = \frac{P_1(m_2 s^2 + k) + P_2 k}{\Delta(s)s}; \quad (5)$$

$$x_2(s) = \frac{\begin{vmatrix} m_1 s^2 + k & P_1/s \\ -k & P_2/s \end{vmatrix}}{\Delta(s)s} = \frac{P_1 \cdot k + P_2(m_1 s^2 + k)}{\Delta(s)s},$$

где $\Delta(s) = \begin{vmatrix} m_1 s^2 + k & -k \\ -k & m_2 s^2 + k \end{vmatrix} = m_1 m_2 (s^2 + \omega^2) s^2$; $\omega = \sqrt{k(m_1 + m_2)/(m_1 \cdot m_2)}$.

После подстановки $\Delta(s)$ в (5) и несложных алгебраических преобразований представим $x_1(s)$, $x_2(s)$ в виде, удобном для обратного преобразования Лапласа:

$$x_1(s) = \frac{P_1 + P_2}{m_1 + m_2} \frac{1}{s^3} + \frac{-P_2 + P_1 m_2/m_1}{m_1 + m_2} \frac{1}{s(s^2 + \omega^2)}; \quad (6)$$

$$x_2(s) = \frac{P_1 + P_2}{m_1 + m_2} \frac{1}{s^3} - \frac{P_1 - P_2 m_1/m_2}{m_1 + m_2} \frac{1}{s(s^2 + \omega^2)}.$$

После обратного преобразования Лапласа [5] получим зависимости для определения перемещений баб в функции времени:

$$x_1 = \frac{P_1 + P_2}{m_1 + m_2} \frac{t^2}{2} + \frac{-P_2 + P_1 m_2/m_1}{m_1 + m_2} \frac{1}{\omega^2} (1 - \cos \omega t); \quad (7)$$

$$x_2 = \frac{P_1 + P_2}{m_1 + m_2} \frac{t^2}{2} - \frac{P_1 - P_2 m_1/m_2}{m_1 + m_2} \frac{1}{\omega^2} (1 - \cos \omega t).$$

Дифференцируя (7) по времени, получим зависимости для определения скоростей баб:

$$x_1' = \frac{P_1 + P_2}{m_1 + m_2} \cdot t + \frac{-P_2 + P_1 m_2/m_1}{(m_1 + m_2)\omega} \cdot \sin \omega t; \quad (8)$$

$$x_2' = \frac{P_1 - P_2}{m_1 + m_2} \cdot t - \frac{P_1 - P_2 m_1/m_2}{(m_1 + m_2)\omega} \cdot \sin \omega t.$$

Анализ уравнений скоростей баб показывает, что к составляющей возрастающей пропорционально времени (первый член) прибавляется гармоническая составляющая, содержащая $\sin \omega t$ (второй член). Для исключения гармонической составляющей необходимо, чтобы второй член зависимости для скорости был равен нулю, для скорости нижней бабы это условие выразится следующим образом:

$$\frac{-P_2 + P_1 m_2 / m_1}{(m_1 + m_2)\omega} \sin \omega t = 0. \quad (9)$$

Отбрасывая решение $\sin \omega t = 0$, равенство (9) будет выполняться при условии:

$$-P_2 + P_1 m_2/m_1 = 0 \quad (10)$$

или $P_2 = P_1 m_2/m_1$, т. е. при следующем соотношении масс баб и действующих на них сил:

$$P_2/P_1 = m_2/m_1. \quad (11)$$

Анализ уравнения скорости движения верхней бабы дает такое же соотношение между действующими силами и массами баб.

Дальнейший анализ уравнений скоростей баб (8) показывает, что при выполнении условия (11) обе бабы будут иметь одинаковые скорости, равные:

$$x_1' = x_2' = \frac{P_1 + P_2}{m_1 + m_2} t. \quad (12)$$

Количество движения каждой бабы к моменту удара будет равно:

$$\bar{P}_1 = m_1 x_1'(t = t_{nx}); \quad \bar{P}_2 = m_2 x_2'(t = t_{nx}), \quad (13)$$

где t_{nx} – время прямого холостого хода.

И так как к моменту удара скорости баб будут одинаковы, большим количеством движения будет обладать нижняя баба, как имеющая большую массу и к концу нагрузочной фазы удара общий центр масс баб будет перемещаться вверх с начальной скоростью:

$$V_{1,2} = (\bar{P}_2 - \bar{P}_1)/(m_2 + m_1). \quad (14)$$

В этой ситуации устранен недостаток привода связанный с повышением давления в гидробаке, но сохранилась вероятность раскрытия стыков в узле гидросвязи баб. Для устранения и этого недостатка выход очевиден, необходимо выполнять бабы с одинаковой массой и при сохранении соотношения (11) имеем окончательно:

$$m_2 = m_1; \quad P_2 = P_1. \quad (15)$$

Вероятно, по причине указанных во введении недостатков присущих одностороннему приводу скорость падающих частей к началу удара не превышала 3 м/с. Самый крупный бесшаботный молот, построенный на Новокраматорском машиностроительном заводе, имел верхнюю бабу массой 174 т; нижнюю – 190 т; энергию удара 1600 кДж, ход каждой бабы равен 1 м.

Для обеспечения указанной энергии удара скорость каждой бабы должна быть равна 2,96 м/с; если принять движение равноускоренным, то его величина будет равной 4,38 м/с². Шаботные молоты имеют скорость бабы к началу удара не ниже 6 м/с, а это значит, что энергию удара, равную 1600 кДж, на шаботном молоте можно получить при массе бабы 88 т, т. е. в два раза меньше масс каждой из баб бесшаботного молота.

В рассмотренном случае, если выполнить условие (15), ускорение движения баб принять равным ускорению свободного падения, то при массе баб равной 174 т каждая, при ходе каждой бабы равной 1,0 м, каждая баба приобретает скорость равную 4,43 м/с, энергия удара молота составит 3410 кДж, которая в 2,1 раза больше чем у молота традиционной конструкции и эквивалентна шаботному молоту с массой падающих частей 189 т, а это значит, что бесшаботный молот с приводом посредством приложения к каждой бабе одинаковых сил при прямом холостом ходе, при равной массе баб может быть в 2 раза эффективней молота

традиционной конструкции. При определении сил привода, приводящих в движение бабы, необходимо учитывать потери на трение в направляющих и уплотнениях плунжеров. Если воспользоваться рекомендациями, изложенными в [7], усилия привода можно определять по зависимости:

$$P_{np} = m_1 j + 0,08 m_2 g, \quad (16)$$

где j, g – ускорения движения баб и свободного падения.

Обратный холостой ход баб не предъявляет особых требований к приводу молота, в работе [8] рассмотрена кинематика холостого хода бесшаботного молота при условии, что обратный холостой ход осуществляется приложением силы к одной из баб.

ВЫВОДЫ

Составлена математическая модель и предложены математические зависимости для определения параметров движения прямого холостого хода баб при одинаковой площади плунжеров нижней и верхней баб и приложении активных сил со стороны привода к обеим бабам. Определено, что при отношении сил, приложенных к каждой бабе, равно отношению масс баб, скорости баб будут увеличиваться пропорционально времени и в каждый данный момент скорости баб будут одинаковыми.

Для приобретения бабами одинакового количества движения, что обеспечит их остановку в конце нагрузочной фазы удара, необходимо, чтобы массы баб были одинаковыми и одинаковыми были силы, приводящие их в движение. При соблюдении этого условия можно обеспечить скорость каждой бабы, превышающую 3 м/с, и увеличить энергетическую эффективность бесшаботного молота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Живов Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование : учебник для вузов / Л. И. Живов, А. Г. Овчинников, Е. Н. Складчиков ; под ред. Л. И. Живова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 560 с.
2. Пат. № 35919 України, МПК 21jz/00. Безшаботний вертикальний гідравлічний молот / Рей А. Р., Рей М. Р. – № 200805527; заявлено 10.10.2008. Бюл. № 19.
3. Пат. № 30386 Україна, МПК B21j7/00. Безшаботний вертикальний гідравлічний молот / Рей А. Р. – № u2007 11894; заявлено 29.10.2007; опубл. 25.02.2008. Бюл. № 4.
4. Рей Р. И. Определение реакций подвижной системы бесшаботного молота / Р. И. Рей // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорськ : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 339–341.
5. Рей Р. И. Влияние трения на параметры движения бесшаботного вертикального гидравлического молота / Р. И. Рей, В. И. Сумской // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2010. – № 3 (145). – Ч. 2. – С. 24–29.
6. Корн Г. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984. – 831 с.
7. Рей Р. И. Трение в уплотнениях и направляющих падающих частей кузнечных молотов / Р. И. Рей, В. И. Сумской, Т. С. Сушкова // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2005. – С. 107–111.
8. Рей А. Р. Кинематика холостого хода бесшаботного гидравлического вертикального молота / А. Р. Рей, М. Р. Рей // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2010. – № 3 (145). – Ч. 2. – С. 55–60.

Рей Р. И. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВНУ им. В. Даля;

Гутько Ю. И. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВНУ им. В. Даля.

ВНУ им. В. Даля – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск.

E-mail: oomd@edu.snu.ua