

УДК 621.7.044.2

Павленко А. А., Мещеряков А. Н., Комнатный И. П.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ В РАБОТУ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ МАШИНЫ

Прокатные валки – это массивные, относительно быстро изнашивающиеся элементы прокатных станов, изготовленные из специальных сортов стали. Несмотря на применение прогрессивных ресурсосберегающих технологий при обработке их заготовок [1–3], количество дорогостоящего металла, уходящего в отходы виде стружки значительно. Известные трудности делают убыточной прямую переработку стружки в исходном состоянии. Уплотнение (окускование) превращает стружку в ценную металлургическую шихту, попутно решая и экологические проблемы. Машины импульсного брикетирования (МИБ) конструкции ХАИ позволяют быстро и эффективно изготавливать из отходов металлообработки плотные брикеты массой до 200 кг.

Целью данной работы является выявление физической сущности термодинамических процессов, протекающих на протяжении рабочего цикла привода МИБ.

Применяемые в настоящее время расчетные модели МИБ не позволяют с достаточной степенью точности спрогнозировать характеристики будущей машины, и требует доводки на опытном образце, а в некоторых случаях и частичного переконструирования.

Конструктивно МИБ состоит из следующих элементов (рис. 1): камеры сгорания (КС) 1, цилиндра расширения (ЦР) 2, запирающе-перепускного устройства (ЗУ) 3, шток-пуансона (ШП) 4, контейнера с матричным узлом 5, наковальни 6 и шаботного блока 7. КС и ЦР неподвижно соединяются с наковальней и шаботной частью посредством стяжных колонн 8 с гайками. Шток-пуансон и контейнер с матричным узлом имеют возможность перемещения в осевом направлении для непосредственного осуществления технологического цикла. Собранный МИБ устанавливается на катках, закрепленных на раме. Такая конструкция позволяет полностью замкнуть возникающие технологические усилия внутри оборудования, вследствие чего полностью исключается его сейсмичность и отпадает необходимость сооружения массивных фундаментов.

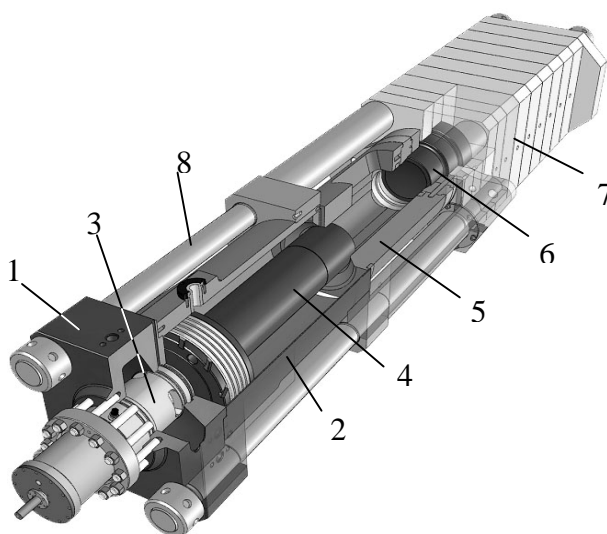


Рис. 1. Конструкция машины импульсного брикетирования:

1 – камера сгорания; 2 – цилиндр расширения; 3 – запирающе-перепускное устройство; 4 – шток-пуансон; 5 – контейнер с матричным узлом; 6 – наковальня; 7 – шаботный блок; 8 – стяжные колонны с гайками

После возвращения контейнера на место МИБ готова к новому циклу.

По сравнению с импульсными машинами другого назначения (для резки, штамповки,ковки) технологическое усилие МИБ изменяется более плавно, а непосредственно процесс брикетирования имеет относительно большую продолжительность. Это обусловлено особенностями преобразования геометрии массива металлической стружки в ходе его уплотнения. Поэтому при построении расчетной модели следует учитывать не только кинетическую энергию рабочего инструмента, приобретенную на этапе разгона, но и дополнительную – от продолжающегося воздействия на него газов, находящихся в ЦР.

Кроме того, очень важна и более точная дозировка энергии брикетирования, так как ее недостаток приведет к получению брикета малой прочности, а избыток вызовет его расслоение.

Расчетная схема МИБ с обозначением всех характеристик представлена на рис. 2.

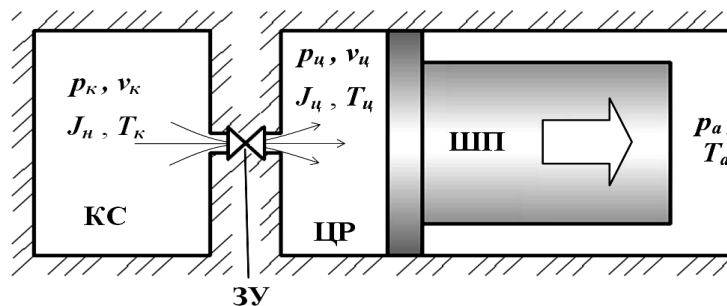


Рис. 2. Расчетная схема машины импульсного брикетирования:

p_k – давление продуктов сгорания топливной смеси КС; v_k – объем КС; J_n – масса газа в КС; T_k – температура газа в КС; p_u – давление продуктов сгорания топливной смеси в ЦР; v_u – текущий объем ЦР; J_u – масса газа в ЦР; T_u – температура газа в ЦР; p_a – атмосферное давление; T_a – температура окружающей атмосферы

Исходя из положений классической термодинамики [1], потенциальную внутреннюю энергию газов в КС перед началом истечения можно определить как:

$$U^{\max} = \frac{p_z v_k}{k-1} \text{ или } U^{\max} = \frac{J_n T_z R}{k-1}, \quad (1)$$

где U^{\max} – конечная внутренняя энергия сгоревших газов в КС; p_z – конечное давление продуктов сгорания топливной смеси в замкнутом объеме КС; v_k – объем КС; J_n – масса газа в КС; T_z – температура газа при окончании сгорания; R – универсальная газовая постоянная; $k = C_p / C_v$ – соотношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме (адиабатический коэффициент). Величина U^{\max} станет начальным значением энергии газов в КС при исследовании перетекания газов из КС в ЦР: $U_{k_n} = U^{\max}$.

Между поверхностями торцевой стенки ЦР со стороны КС и торца ШП неизбежно имеется полость незначительного объема, наличие которой объясняется невозможностью (и ненужностью) идеально точной пригонки поверхностей в процессе изготовления МИБ. В начальный момент этот объем заполнен атмосферным воздухом, внутренняя энергия которого равна:

$$U_{u_n} = \frac{p_a v_u}{k-1} \text{ или } U_{u_n} = \frac{J_u T_a R}{k-1}, \quad (2)$$

где U_{u_n} – начальная внутренняя энергия газа в ЦР; p_a – атмосферное давление; v_u – начальный объем ЦР; J_u – масса газа в ЦР; T_a – температура окружающей среды.

В процессе перетекания масса газа в КС уменьшается:

$$J_{k_i} = J_{k_n} - J_y, \quad (3)$$

а в ЦР – увеличивается на одну и ту же величину:

$$J_{u_i} = J_{u_n} + J_y, \quad (4)$$

где J_{k_i} – масса газа, оставшегося в КС; J_{k_n} – начальная масса газа в КС; J_{u_i} – масса газа в ЦР; J_{u_n} – начальная масса газа в ЦР; J_y – масса газа, ушедшего из КС в ЦР. При этом суммарная масса газа в полостях КС и ЦР на всем протяжении рабочего хода остается величиной постоянной (утечками газов пренебрегаем вследствие их малости):

$$J_{\Sigma} = J_{k_n} + J_{u_n}, \quad (5)$$

то есть масса газа только перемещается из объема КС в объем ЦР.

Газ, массой J_y , ушедший в процессе перетекания из КС, без учета потерь тепла в стенки конструктивных элементов машины, имеет энергию Z :

$$Z = \frac{k}{k-1} \cdot p_k \cdot \bar{v}_k \cdot J_y, \quad (6)$$

где p_k – давление газа в КС; \bar{v}_k – удельный объем газа, находящегося в КС.

Масса газа J_y , ушедшая в процессе перетекания из КС, равна:

$$J_y = G \cdot t, \quad (7)$$

где G – секундный расход газа, который зависит от площади проходного сечения перепускного клапана и разности давлений в КС и ЦР определяемый по известной зависимости [1]; t – время, за которое происходит перетекание.

Если разбить время протекания рабочего цикла брикетирования на определенные, достаточно малые отрезки, то на первом из них энергия газа, оставшегося в КС будет равна:

$$U_{k_1} = U_{k_n} - Z_1, \quad (8)$$

а в конце этого отрезка газ придет в равновесное состояние, параметры которого определяются известной зависимостью [1]:

$$p_{k_1} \cdot v_k = J_{k_1} \cdot T_{k_1} \cdot R, \quad (9)$$

где p_{k_1} – давление в КС в конце первого отрезка времени; J_{k_1} – масса газа в КС в конце первого отрезка времени; T_{k_1} – температура газа в КС в конце первого отрезка времени.

За этот отрезок времени в ЦР происходит ассимиляция газа массой J_y , пришедшего из КС, с массой газа J_u , которая ранее находилась в ЦР. При этом внутренняя энергия в полости ЦР увеличивается:

$$U_{u_1} = U_{u_n} + Z_1 - L_1, \quad (10)$$

где U_{u_1} – внутренняя энергия газа в ЦР на первом после начала открытия ЗУ отрезке времени, U_{u_n} – начальная внутренняя энергия газа в ЦР, Z_1 – энергия, прибывшая в ЦР с газами из КС на этом отрезке времени, L_1 – работа, воспринятая шток-пуансоном на этом отрезке времени.

За последующие отрезки времени энергообмен между КС и ЦР выразится зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} U_{\kappa_{i+1}} &= U_{\kappa_i} - Z_{i+1} \text{ для ЦР и} \\ U_{u_{i+1}} &= U_{u_i} + Z_{i+1} - L_{i+1} \text{ для КС.} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

В то же время, при разгоне под действием энергии расширяющихся газов шток-пуансон (до подлета к массиву деформируемой стружки) приобретает некоторую кинетическую энергию:

$$L_{\kappa} = \frac{m_{ун} \cdot V_{ун}^2}{2}, \quad (12)$$

где $m_{ун}$ – масса, а $V_{ун}$ – скорость шток-пуансона.

Энергообмен между КС и ЦР в соответствии с формулами системы (1), можно представить в виде графика:

В течение дальнейшего процесса брикетирования шток-пуансон, кроме приобретенной на этапе разгона кинетической энергии L_{κ} , продолжает получать дополнительную энергию от газов L_2 , расширяющихся в ЦР. Такой обмен энергией происходит непрерывно, вплоть до полной остановки шток-пуансона, причем последний совершает работу $L_{бр}$, необходимую для брикетирования порции стружки.

Очевидно, что наиболее эффективной будет такая конструкция привода, в которой вся работа $L_{ун} = L_{\kappa} + L_2$, развиваемая шток-пуансоном, будет полностью израсходована на получение брикета заданной плотности и массы: $L_{ун} = L_{бр}$.

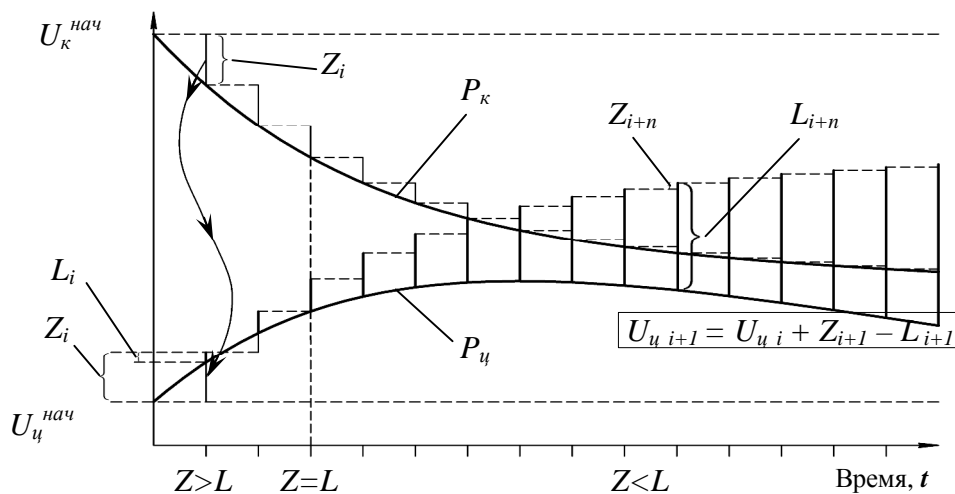


Рис. 3. Графическое представление энергообмена между камерой сгорания и цилиндром расширения импульсной машины

На графике рис. 3 видно, что энергия в ЦР с приходом газа с энергией Z из КС может: увеличиваться, когда $Z_i - L_i > 0$; оставаться неизменной, когда $Z_i - L_i = 0$ и уменьшаться, когда $Z_i - L_i < 0$.

Представленные физические закономерности энергообмена в приводе ИМ определяют качественные зависимости протекания термодинамических процессов. Для количественной оценки параметров работы привода ИМ следует записать эти зависимости в дифференциальном виде.

Уравнение для определения энергии газов в КС будет выглядеть так:

$$\frac{dU_{\kappa}}{dt} = -Z. \quad (13)$$

Энергия газов, ушедших из КС в ЦР, будет равна:

$$Z = \frac{k}{k-1} p_{\kappa} \cdot v_{\kappa} \cdot G \cdot dt, \quad (14)$$

где G – секундный расход газа из КС, определяемый по известной зависимости [1], dt – элементарный отрезок времени протекания процесса.

Масса газа, ушедшего из КС в ЦР, определится как:

$$\frac{dJ_y}{dt} = -G. \quad (15)$$

Внутренняя энергия газа в цилиндре расширения составит:

$$\frac{dU_{\psi}}{dt} = Z - p_{\psi} \frac{dv_{\psi}}{dt}, \quad (16)$$

где $p_{\psi} \frac{dv_{\psi}}{dt} = \frac{dL}{dt}$, а приход массы газа из КС – $\frac{dJ_{\psi}}{dt} = G$.

Давление газа p и его температура T в полостях КС и ЦР определяется калорическими и термическими зависимостями состояния рабочего тела в соответствующих объемах:

$$p_{\kappa_i} = (k-1) \cdot \frac{U_{\kappa_i}}{v_{\kappa}}, \text{ для КС } v_{\kappa} = \text{const}; T_{\kappa_i} = \frac{p_{\kappa_i} \cdot v_{\kappa}}{R \cdot J_{\kappa_i}}; \quad (17)$$

$$p_{\psi_i} = (k-1) \cdot \frac{U_{\psi_i}}{v_{\psi_i}}, \text{ для ЦР } v_{\psi} = \text{var}; T_{\psi_i} = \frac{p_{\psi_i} \cdot v_{\psi_i}}{R \cdot J_{\psi_i}}. \quad (18)$$

Решение этих уравнений позволяет определить изменение термодинамических параметров $p_{\kappa} = p_{\kappa}(Z)$, $T_{\kappa} = T_{\kappa}(Z)$, $p_{\psi} = p_{\psi}(Z)$, $T_{\psi} = T_{\psi}(Z)$, величину полезной работы, совершаемой шток-пуансоном в цилиндре расширения $L = L(Z)$, а также определить термический К.П.Д. МИБ с учетом энергии теплообмена $Z = f(t)$ между КС и ЦР.

ВЫВОДЫ

Выявленные особенности физической сущности термодинамических процессов, протекающих на протяжении рабочего цикла в приводе машины импульсного брикетирования, дают возможность построить адекватную расчетную модель, которая позволит более точно рассчитать технологические параметры и характеристики оборудования на стадии проектирования. Это исключает необходимость изготовления опытного образца для проведения доводочных работ по обеспечению соответствия характеристик готового изделия требованиям заказчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллин В. А. *Техническая термодинамика : учебн. для вузов / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – 4-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.*
2. Синаве М. *Улучшение эксплуатационных характеристик литых прокатных валков / М. Синаве // Сталь. – 2002. – № 11. – С. 40–43.*
3. Гольдштейн М. И. *Специальные стали / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – М. : МИСИС. 1999. – 408 с.*
4. Горелик С. С. *Рентгенографический и электронно-графический анализ металлов / С. С. Горелик, А. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – М. : Металлургия, 1963. – 218 с.*
5. Миркин Л. И. *Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов : справочник / Л. И. Миркин. – М. : Машиностроение, 1979. – 250 с.*