

СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭКСТРУДИРОВАНИЮ В ФОРМУЮЩЕМ КАНАЛЕ ПОЛОГО БРИКЕТА ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК

На основе модели упругопластического тела определено сопротивление экструдированию полого брикета древесных опилок, рассмотрены условия образования коаксиальной цилиндрической полости брикета, установлена связь диаметра полости с длиной формирующей полости и физическими свойствами полуфабриката.

Ключевые слова: экструдирование, биоэнергетика, древесные опилки, топливные брикеты

В последнее время древесные опилки получили статус перспективного ресурса биоэнергетики. Одним из возможных путей реализации древесных опилок в качестве альтернативного топлива является их брикетирование в шнековых экструдерах.

Распространенная форма выпускаемых брикетов имеет вид полого стержня с внешней поверхностью в виде правильного шестигранника или восьмигранника и внутренней коаксиальной цилиндрической поверхностью [1]. Полость обеспечивает доступ воздуха к поверхности брикета, что позволяет интенсифицировать процесс горения. Поэтому полость следует рассматривать как важный элемент брикета.

Формирующая полость экструдера, в которой образуется брикет, не имеет дорна, поэтому полость в брикете имеет свободную поверхность, а диаметр полости определен напряженным состоянием полуфабриката в сечении, где происходит отрыв полуфабриката от конической насадки на конце шнека. В связи с этим представляет интерес определение диаметра формирующей полости, исходя из ее размеров и физических параметров экструдированного полуфабриката.

Задача определения сопротивления экструдированию брикета в формирующем канале важна для определения производительности экструдера и мощности, затрачиваемой на экструдирование. Кроме того, напряженно-деформированное состояние полуфабриката в формирующем канале определяет его оптимальную протяженность.

Будем полагать, что древесные опилки, экструдированные шнековым экструдером в виде полого брикета, обладают свойствами упругопластического тела.

При рассмотрении напряженно-деформированного состояния полуфабриката примем

допущение, что формирующий канал имеет цилиндрическую поверхность, что позволяет рассматривать задачу как осесимметричную.

Разместим, находящийся в формирующем канале экструдера полуфабрикат в цилиндрической системе координат $\theta r z$, как показано на рисунке 1.

Для осесимметричного напряженного состояния можно использовать уравнение равновесия, которые в полярных координатах с учетом того, что нормальным напряжениям приписаны положительные значения, будет иметь вид

$$\frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0 \quad (1)$$

где σ_z – осевое нормальное напряжение в полуфабрикате;

$\tau_{z\rho}$ – напряжение сдвига в полуфабрикате.

Преобразуя уравнение (1) и удовлетворяя граничному условию $\tau_{z\rho} = 0$ на поверхности отверстия радиуса полости $\rho = \rho_0$, получим

$$\frac{d\sigma_z}{dz} - \frac{2\rho \cdot \tau_{z\rho}}{\rho^2 - \rho_0^2} = 0 \quad (2)$$

Будем полагать, следуя Е.П. Унксову [2], что нормальное напряжение σ_z зависит толь-

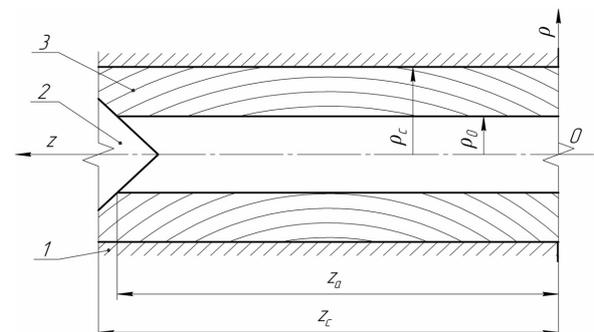


Рисунок 1. Схема формирующего канала экструдера древесных опилок: 1 – стенка формирующего канала; 2 – коническая насадка на конце шнека; 3 – экструдированный полуфабрикат

ко от координаты z , и окончательный вид уравнения будет

$$\frac{d\sigma_z}{dz} - \frac{2\rho_c \cdot \tau_c}{\rho_c^2 - \rho_0^2} = 0 \quad (3)$$

где τ_c – напряжение сдвига на контактной поверхности формирующей полости;

ρ_c – радиус контактной поверхности формирующей полости.

Будем полагать, что полуфабрикат обладает свойствами упруго-пластического тела.

Из обобщенного закона Гука

$$\varepsilon_\rho = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_\rho - \nu \cdot (\sigma_z + \sigma_\theta)], \quad (4)$$

где ε_ρ – радиальная относительная деформация полуфабриката;

E – модуль упругости полуфабриката;

$\sigma_\rho, \sigma_\theta$ – соответственно радиальное и окружное нормальные напряжения в полуфабрикате;

ν – коэффициент поперечной деформации полуфабриката.

Предположим, что на контактной поверхности на выходе из фильеры осевые нормальные напряжения отсутствуют, радиальные и окружные равны между собой и равны пределу текучести полуфабриката σ_T при сжатии, то есть

$$\text{при } z=0, \sigma_{z0} = 0, \sigma_{\rho 0} = \sigma_{\theta 0} = \sigma_T \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим радиальную относительную деформацию полуфабриката на выходе из формирующего канала на его контактной поверхности

$$\varepsilon_{\rho 0} = \frac{\sigma_T}{E} \cdot (1 - \nu) \quad (6)$$

Во всей области упругого сжатия полуфабриката, то есть на всей длине канала на его контактной поверхности

$$\varepsilon_{\rho c} = \varepsilon_{\rho 0} \quad (7)$$

Подставив в (7) выражения (4) и (6), получим на контактной поверхности формирующей полости

$$\sigma_{\rho c} = \sigma_T + \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_z \quad (8)$$

Напряжение сдвига τ_c радиальное напряжение на контактной поверхности формирующей полости связаны законом Кулона

$$\tau_c = f \cdot \sigma_{\rho c}, \quad (9)$$

или с учетом (8)

$$\tau_c = f \cdot \left(\sigma_T + \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_z \right) \quad (10)$$

где f – коэффициент контактного трения полуфабриката о поверхность формирующей полости.

Для нахождения распределения нормального осевого и нормального радиального на контактной поверхности напряжений подставим выражение (10) в уравнение (3) и проинтегрируем его с граничными условиями: при $z = 0, \sigma_z = 0$.

После преобразований получим формулы распределения нормальных напряжений на контактной поверхности формирующего канала

$$\sigma_z = \frac{1 - \nu}{\nu} \cdot \sigma_T \cdot \left[\exp \left(\frac{\nu}{1 - \nu} \cdot f \cdot \frac{2\rho_c}{\rho_c^2 - \rho_0^2} \cdot z \right) - 1 \right], \quad (11)$$

$$\sigma_{\rho c} = \sigma_T \cdot \exp \left(\frac{\nu}{1 - \nu} \cdot f \cdot \frac{2\rho_c}{\rho_c^2 - \rho_0^2} \cdot z \right) \quad (12)$$

В точке a начала пластического течения приближенное условие пластичности возможно в двух вариантах:

$$\sigma_{za} = \sigma_{\rho a} + \sigma_T, \quad (13)$$

$$\sigma_{za} = \sigma_{\rho a} \quad (14)$$

С учетом $\sigma_{\rho a} = \sigma_{\theta a}$ на поверхности канала деформация в точке начала пластического течения

$$\varepsilon_{\rho a} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_{\rho a} - \nu \cdot (\sigma_{za} + \sigma_{\rho a})] \quad (15)$$

При выполнении условий (13), (14) зависимость (15) соответственно примет вид

$$\varepsilon_{\rho a} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_{\rho a} \cdot (1 - 2\nu) - \nu \cdot \sigma_T], \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\rho a} = \frac{1}{E} \cdot \sigma_{\rho a} \cdot (1 - 2\nu) \quad (17)$$

Из условия постоянства радиальной относительной деформации полуфабриката в канале (7) справедливо условие

$$\varepsilon_{\rho a} = \varepsilon_{\rho 0} \quad (18)$$

Подставляя в (18) выражение (6) и последовательно зависимости (16), (17) получим соответственно

$$\sigma_{\rho a} = \frac{\sigma_T}{1 - 2\nu}, \quad (19)$$

$$\sigma_{\rho a} = \sigma_T \cdot \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \quad (20)$$

Удовлетворяя в выражении (12) условию $\sigma_{\rho c} = \sigma_{\rho a}$ при $z = z_a$ и подставляя полученный результат последовательно в уравнения (19), (20) получим после преобразований значения радиуса центрального отверстия полуфабрика-

та для условий пластичности соответственно (13), (14)

$$\rho_0 = \sqrt{\rho_c^2 + \frac{2\rho_c}{\ln(1-2\nu)} \cdot f \cdot \frac{\nu}{1-\nu} \cdot z_a}, \quad (21)$$

$$\rho_0 = \sqrt{\rho_c^2 - \frac{\nu}{1-\nu} \cdot f \cdot \frac{2\rho_c}{\ln \frac{1-\nu}{1-2\nu}} \cdot z_a} \quad (22)$$

Сравнение результатов вычислений по формулам (21), (22) с данными экспериментального исследования, позволит определить характер напряженного состояния полуфабриката на входе в формующий канал.

Для проведения предварительного анализа результатов влияния на радиус центрального отверстия полуфабриката параметров, входящих в приведенные выше формулы, построены их зависимости, представленные на рисунке 2. Приняты постоянными значения радиуса контактной поверхности формующей полости $\rho_c = 0,03$ м и коэффициента поперечной деформации $\nu = 0,2$.

Следует отметить, что зависимости влияния на радиус центрального отверстия ρ_0 коэффициента контактного трения полуфабриката о поверхность формующей полости f будут аналогичны влиянию протяженности упругой зоны z_a , поскольку в формулах (21), (22) эти параметры выступают множителями.

Анализ диаграмм на рисунке 2 показывает, что радиус центрального отверстия более чувствителен к изменению коэффициента поперечной деформации полуфабриката, чем изменению протяженности упругой зоны.

На рисунке 3 приведены зависимости при постоянных значениях радиуса контактной поверхности формующей полости $\rho_c = 0,03$ м и коэффициента контактного трения полуфабриката о поверхность формующей полости $f = 0,1$.

Анализ диаграмм на рисунке 3 показывает, что радиус центрального отверстия более чувствителен к изменению протяженности упругой зоны, чем изменению коэффициента поперечной деформации полуфабриката.

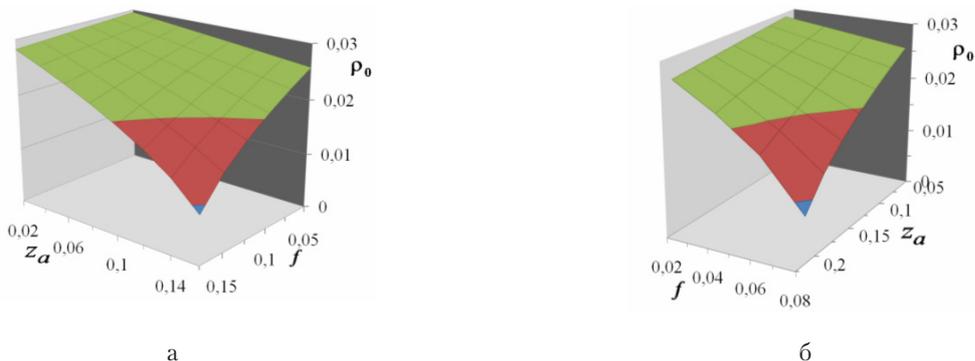


Рисунок 2. Диаграммы зависимостей радиуса центрального отверстия полуфабриката ρ_0 при $\nu = 0,2$ по формулам: а – (21); б – (22)

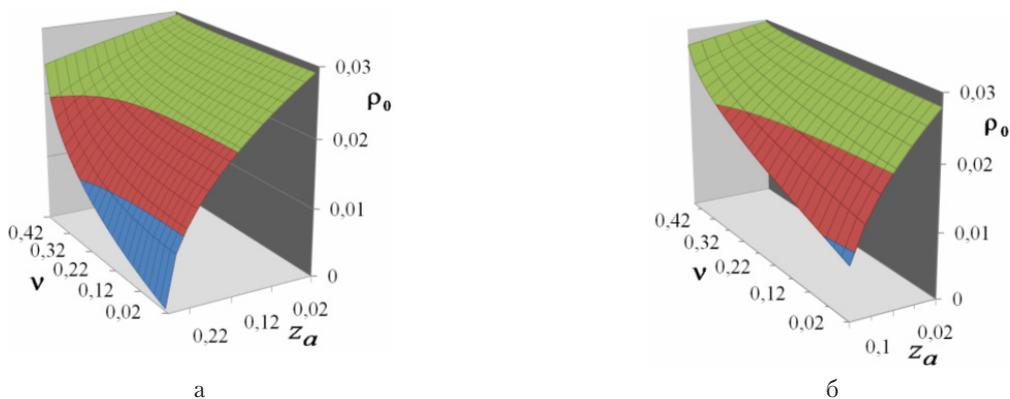


Рисунок 3. Диаграммы зависимостей радиуса центрального отверстия полуфабриката ρ_0 при $f = 0,1$ по формулам: а – (21); б – (22)

В целом, из диаграмм на рисунке 3 можно сделать вывод, что более предпочтительным для использования в вычислениях является приближенное условие пластичности (13) диаграмма для которого приведена на рисунке 3 а, так как это условие допускает большую протяженность канала.

Можно считать, что длина канала z_c совпадает с протяженностью упругой зоны z_a . Тогда

сопротивление экструдированию полуфабриката в формующем канале определено формулой (11) при условии $z=z_c$.

Для проведения идентификации предлагаемой модели требуется экспериментальное определение физических параметров полуфабриката: предела текучести, коэффициента поперечной деформации и коэффициента контактного трения.

28.10.2011

Список литературы:

1. Гомонай М. В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы [Текст]: Монография / М.В. Гомонай. - М.: МГУЛ, 2006 г. - 68 с.
2. Унсков Е.П. Инженерная теория пластичности [Текст] / Е.П. Унсков. - М.; Машгиз, 1959. 328 с.

Сведения об авторах:

Полищук Владимир Юрьевич, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и пищевых производств Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Ханин Виктор Петрович, преподаватель кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

Прилепина Ирина Ивановна, аспирант кафедры машин и аппаратов химических

и пищевых производств Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 3115, тел. (3532) 372464, e-mail: mahpp@mail.osu.ru

UDC 674.08:662.818

Polishchuk, V.Yu., Khanin V.P., Prilepina I.I.

Orenburg state university, e-mail: mahpp@mail.osu.ru

RESISTANCE TO EXTRUSION IN FORMING CHANNELS OF HOLLOW BRIQUETTES OF SAWDUST

Based on the model of elastic body the authors defined the resistance of the hollow extruded sawdust briquettes, considered conditions of formation of a briquette coaxial cylindrical cavity, the cavity diameter of a connection with the length of the forming cavity, and the physical properties of semi-finished product.

Key words: extrusion, bioenergy, wood sawdust, fuel bricks.

Bibliography:

1. Gomonay M.V. Fuel briquettes production. Wood raw materials, the equipment, technologies, operating modes [Text]: the Monography / M.V. Gomonay. - M: MSUF, 2006 - 68 p.
2. Unskov E.P. The engineering theory of plasticity [Text] / E.P. Unskov. - M; Mashgis, 1959. 328 p.