

Jarosław CZABAN
Zbigniew KAMIŃSKI

ENERGOCHŁONNOŚĆ PRASOWANIA MIESZANEK PASZOWYCH W KOMORZE ZAMKNIĘTEJ

Energy consumption of pressure of fodder mixtures in the closed chamber

Wstęp

Zagęszczanie i scalanie mieszanek paszowych w prasach rotacyjnych z układem roboczym typu „matryca-rolki” jest jednym z najbardziej energochłonnych procesów w produkcji pasz. Poznanie mechanizmu tego procesu oraz określenie wpływu podstawowych parametrów na jego przebieg stanowi więc nie tylko teoretyczny, lecz także praktyczny problem. Ze względu na łatwość pomiaru nacisków i odkształceń podstawowe badania procesu są prowadzone najczęściej w komorze zamkniętej przy użyciu prasy stemplowej. Jednakże nawet przy zagęszczaniu tego samego materiału sypkiego porównanie otrzymanych przez różnych badaczy wyników jest utrudnione ze względu na zróżnicowanie warunków badań, w tym stanu powierzchni i wymiarów komory prasującej. Skłoniło to autorów do zastosowania nowych metod analizy procesu zagęszczania mieszanek paszowych, opartych na modelowaniu matematycznym ośrodków sypkich i porowatych [2, 6].

Założenia i rozwiązania podstawowe

Do analizy procesu zagęszczania mieszanek w cylindrycznej komorze zamkniętej (rys. 1) zastosowano metodę cienkich przekrojów. Wykorzystując warunek plastyczności Greena [5] jak dla materiału ze wzmocnieniem gęstościowym:

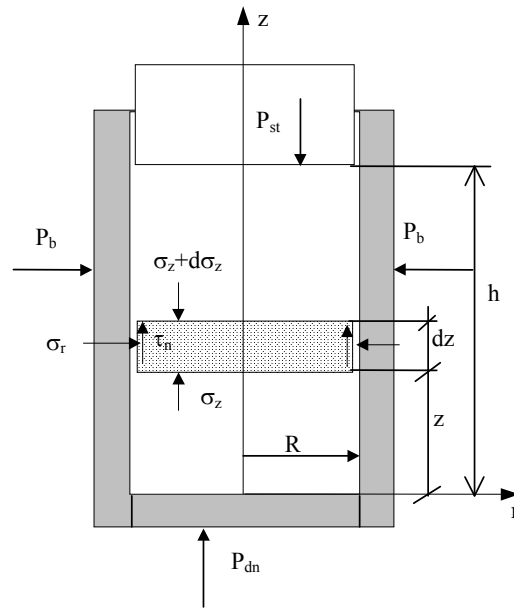
$$f(\sigma_{ij}) = 3J_2' + \alpha(\Theta)J_1^2 - \beta(\Theta)\sigma_{pl}^2 = 0 \quad (1)$$

i stowarzyszone z nim prawo płynięcia oraz pomijając tarcie o ścianki komory, otrzymano składowe tensora naprężenia dla jednoosiowego stanu odkształcenia [2, 6, 7]:

$$\sigma_\varphi = \sigma_r = \frac{1 - 2\alpha(\Theta)}{1 + 4\alpha(\Theta)} \sigma_z \quad \sigma_z = -\frac{1}{3} \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(\Theta)}{\alpha(\Theta)}} \sqrt{\beta(\Theta)} \sigma_{pl} \quad (2)$$

gdzie:

- J_1 – pierwszy niezmiennik tensora naprężenia,
- J'_2 – drugi niezmiennik dewiatora naprężeń,
- $\alpha(\Theta)$ i $\beta(\Theta)$ – funkcje porowatości Θ ,
- σ_{pl} – granica plastyczności materiału litego.



Rys. 1. Schemat działania naprężeń podczas prasowania w komorze zamkniętej

Tarcie materiału o ścianki komory w rzeczywistych warunkach zagęszczania powoduje, że rozkład naprężeń nie jest jednorodny, a wyrażenie (2) zachowuje swoją moc tylko dla pewnego przekroju $z < h$, w którym gęstość jest równa gęstości średniej próbki. Z warunku równowagi sił działających element o średnicy $2R$ i nieskończenie małej grubości dz otrzymano po uporządkowaniu równanie różniczkowe:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{2\tau_n}{R} \quad (3)$$

Rozwiązując to równanie dla modelu tarcia Prandtla i liniowego rozkładu gęstości zagęszczanego materiału [4, 8], przy którym gęstość średnia (pozorna) znajduje się w połowie wysokości h wypraski, otrzymano wyrażenie opisujące rozkład naprężenia osiowego w prasowanym materiale w funkcji wysokości próbki i odległości przekroju od dna komory [8]:

$$\sigma_z(z) = \sigma_z(\Theta_{\dot{s}r}) + \frac{2\tau_n(\Theta_{\dot{s}r})}{R} \left(z - \frac{h}{2}\right) \quad (4)$$

gdzie:

$\Theta_{\dot{s}r}$ – porowatość średnia próbki opisana zależnością:

$$\Theta_{\dot{s}r} = 1 - \frac{\rho_{\dot{s}r}}{\rho_L} = 1 - \frac{m_p}{\pi R^2 h \rho_L} \quad (5)$$

gdzie:

$\rho_{\dot{s}r}$ – gęstość średnia próbki o wysokości h ,

ρ_L – gęstość materiału litego (kompaktu) o porowatości $\Theta = 0$,

m_p – masa próbki.

Naprężenia styczne $\tau_n(\Theta_{\dot{s}r})$ w połowie wysokości próbki opisano zależnością [3]:

$$\tau_n(\Theta) = m_L (1 - \Theta)^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\beta(\Theta)}{3}} \sigma_{pl} \quad (6)$$

gdzie:

m_L – współczynnik tarcia Prandtla materiału litu.

Wykorzystując zależności (2), (4) i (6), otrzymano zależności na siły działające na stempel $P_{st}(z = h)$, dno komory $P_{dn}(z = 0)$ oraz połówkę matrycy P_b :

$$\begin{aligned} P_{st} &= \pi R^2 |\sigma_z(h)| = \pi R^2 \left(\frac{1}{3} \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}} \sqrt{\beta(\Theta_{\dot{s}r})} \sigma_{pl} + \frac{\tau_n(\Theta_{\dot{s}r})h}{R} \right) \\ P_{dn} &= \pi R^2 |\sigma_z(0)| = \pi R^2 \left(\frac{1}{3} \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}} \sqrt{\beta(\Theta_{\dot{s}r})} \sigma_{pl} - \frac{\tau_n(\Theta_{\dot{s}r})h}{R} \right) \\ P_b &= \int_0^h 2\xi(\Theta_{\dot{s}r}) |\sigma_z(z)| R dz = \frac{2}{3} \frac{1 - 2\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})} \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}} \sqrt{\beta(\Theta_{\dot{s}r})} R h \sigma_{pl} \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

$\xi(\Theta_{\dot{s}r}) = \frac{1 - 2\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}$ – współczynnik nacisków bocznych.

W przypadku przyjęcia modelu tarcia Amontonsa-Coulomba otrzymano:

$$\begin{aligned} P_{st} &= \pi R^2 |\sigma_z(h)| = \frac{\pi R^2}{3} \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}} \exp\left(\mu \frac{1 - 2\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})} \frac{h}{R}\right) \sqrt{\beta(\Theta_{\dot{s}r})} \sigma_{pl} \\ P_{dn} &= \pi R^2 |\sigma_z(0)| = \frac{\pi R^2}{3} \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}} \exp\left(-\mu \frac{1 - 2\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})} \frac{h}{R}\right) \sqrt{\beta(\Theta_{\dot{s}r})} \sigma_{pl} \\ P_b &= \frac{1}{3\mu} \exp\left(-\frac{h\xi(\Theta_{\dot{s}r})\mu}{R}\right) \left[\exp\left(\frac{2h\xi(\Theta_{\dot{s}r})\mu}{R}\right) - 1 \right] \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}{\alpha(\Theta_{\dot{s}r})}} \sqrt{\beta(\Theta_{\dot{s}r})} R^2 \sigma_{pl} \end{aligned} \quad (8)$$

Zależność współczynnika tarcia μ od porowatości materiału przyjęto z literatury [3]:

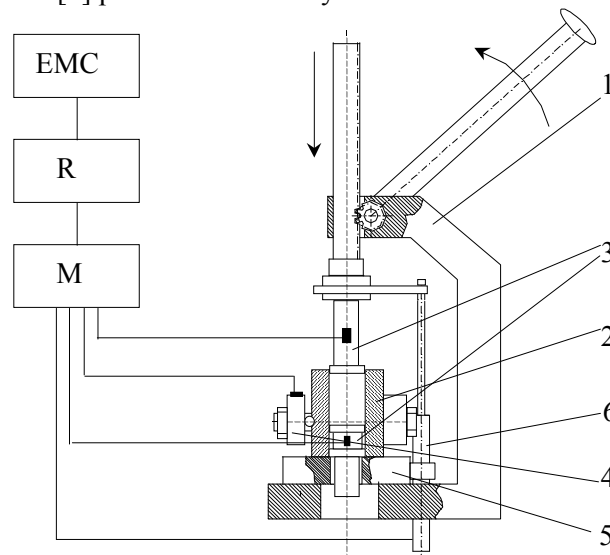
$$\mu = \mu_L (1 - \Theta)^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

gdzie:

μ_L – współczynnik tarcia Amontonsa-Coulomba materiału litu.

Określanie właściwości mechanicznych mieszanki paszowej

Do wyznaczenia stałych materiałowych mieszanki paszowej skonstruowano stanowisko SJ-3 [2] przedstawione na rys. 2.



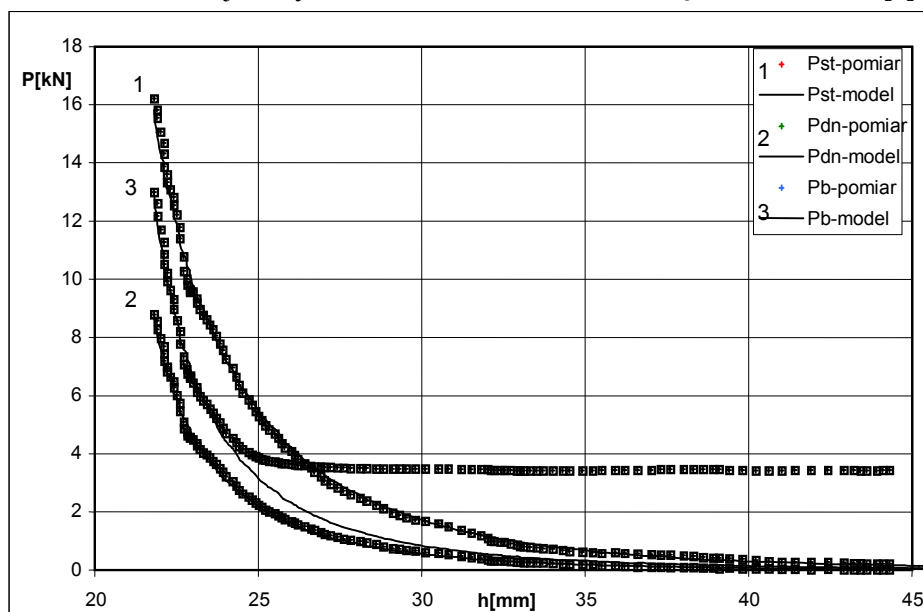
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego SJ-3 [2]: 1 – prasa ręczna, 2 – dzielona komora prasowania, 3 – stemple górny i dolny (tensometryczne przetworniki siły), 4 – obejma (tensometryczny przetwornik siły), 5 – podstawa, 6 – transformatorowy przetwornik przemieszczeń TPP 100, EMC – komputer, M – mostek tensometryczny KWS/6a-5, R – rejestrator MC201A

Do badań wykorzystano mieszankę paszową o wilgotności 15% i następującym składzie procentowym: kreda 1,94%, sól 0,28%, mączka kostno-mięsna 5,55%, soja 8,32%, rzepak 5,55%, pszenica 33,85%, jęczmień 11,10%, pszenżyto 19,42%, bobik 19,42%, otręby 5,55%, preparat konserwujący 0,11% i tłuszcz 2,77%. Pomiarów wykonano dla mieszanki o temperaturze 10, 40, 53, 65, 78 i 90°C. W trakcie pomiarów zauważono, że w zakresie temperatur 40-90°C występuje silne przyleganie mieszanki paszowej do ścianek matrycy, co zadecydowało o przyjęciu modelu tarcia Prandtla. Dla temperatury 10°C tego zjawiska nie zaobserwowano, przyjęto więc dla niskich temperatur model tarcia Amontonsa-Coulomba.

Zarejestrowane w trakcie zagęszczania za pomocą czujników tensometrycznych przebiegi doświadczalne sił działających na tłok dolny, górny i półówkę matrycy (rys. 3) posłużyły do identyfikacji metodą najmniejszych kwadratów parametrów materiałowych σ_{pl} , $m_L(\mu_L)$ i parametrów C , D , E przyjętej funkcji porowatości Shima-Oyane [9, 10]:

$$\alpha(\Theta) = D\Theta^E \quad \beta(\Theta) = (1 - \Theta)^C \quad (10)$$

Do minimalizacji sumy kwadratów zastosowano metodę Hook'a-Jeevesa [1].



Rys. 3. Przykładowe wykresy przebiegów sił P_{st} , P_{dn} , P_b , z krzywymi modelowymi ($T = 40^\circ\text{C}$), model z tarciem Prandtl'a [2]

Wartości średnie identyfikowanych parametrów dla różnych temperatur przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Średnie wartości identyfikowanych parametrów mieszanki paszowej [2]

T °C	σ_{pl} [MPa]	$m_L(\mu_L)$	C	D	E
10	37,74	0,1227	12,19	0,2204	0,3744
40	25,80	0,3686	12,12	0,2428	0,5089
53	20,70	0,3398	12,25	0,1981	0,5948
65	17,13	0,2677	12,25	0,2210	0,7386
78	13,94	0,2372	12,48	0,2297	0,8341
90	14,59	0,1949	12,05	0,2562	0,9738

Wartość wyróżniona odnosi się do współczynnika tarcia (μ_L) Amontonsa-Coulomba.

Następnie określono metodą aproksymacji średniokwadratowej zależności zidentyfikowanych parametrów w funkcji temperatury procesu:

– odpowiednik granicy plastyczności σ_{pl} [MPa]:

$$\sigma_{pl} = 43,166 \exp(-0,01350T) \quad R^2 = 98,58\% \quad (11)$$

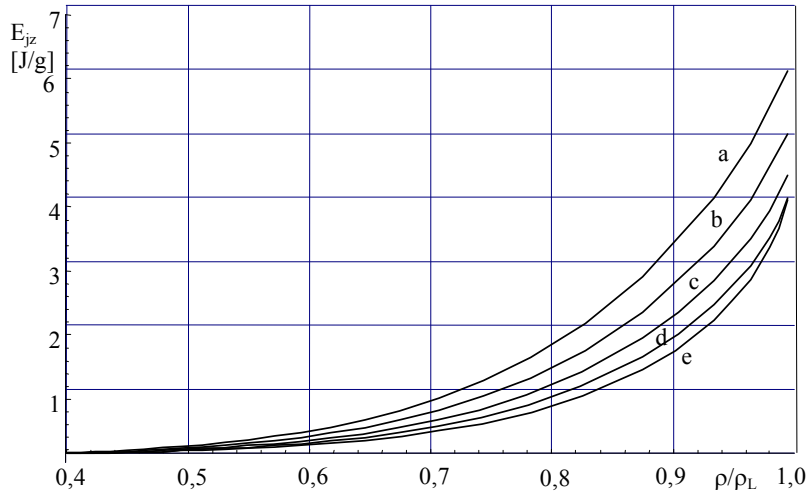
– parametry funkcji porowatości C, D, E dla temperatur $10^\circ\text{C} < T < 90^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} E &= 0,31786 \exp(0,012439T) \quad R^2 = 99,40\% \\ C &= 12.222 \quad D = 0.22805 \end{aligned} \quad (12)$$

– współczynnik tarcia Prandtla m_L dla temperatur $40^\circ\text{C} < T < 90^\circ\text{C}$:

$$m_L = -0,0035948 T + 0,51600 \quad R^2 = 97,87\% \quad (13)$$

Za gęstość materiału litego przyjęto wartość średnią $\rho_L = 1498 \text{ kg/m}^3$ z 12 pomiarów prasowania badanej mieszanki w komorze zamkniętej przy nacisku 200 MPa. Nie stwierdzono przy tym istotnego wpływu temperatury na gęstość litu.



Rys. 4. Wykres przebiegu jednostkowej energochłonności zagęszczania mieszanki paszowej dla temperatur: a) $T = 10^\circ\text{C}$, b) $T = 30^\circ\text{C}$, c) $T = 50^\circ\text{C}$, d) $T = 70^\circ\text{C}$, e) $T = 90^\circ\text{C}$

Zidentyfikowane parametry materiałowe posłużyły do określenia jednostkowej pracy zagęszczania E_{jz} badanej mieszanki paszowej:

$$E_{jz}(h) = \frac{-\int_{h_0}^h P_{st}(h) dh}{m_p} = \frac{-\int_{h_0}^h \pi R^2 \left(\frac{1}{3} \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(\Theta_{sr})}{\alpha(\Theta_{sr})}} \sqrt{\beta(\Theta_{sr}) \sigma_{pl}} \right) dh}{m_p} \quad (14)$$

Wartość siły $P_{st}(h)$ przyjęto wg zależności (8), w której pominięto tarcie ($\tau_n \Theta_{sr} = 0$). Wykorzystując równanie (5) i wyrażenie $dh = -[m_p/(\pi R^2 \rho^2)] d\rho$, przekształcono zależność (14) po zmianie granic całkowania do postaci:

$$E_{jz}(\rho) = \int_{\rho_0}^{\rho} \left(\frac{1}{3\rho^2} \sqrt{\frac{1 + 4\alpha(1 - \rho/\rho_L)}{\alpha(1 - \rho/\rho_L)}} \sqrt{\beta(1 - \rho/\rho_L)} \sigma_{pl} \right) d\rho \quad (15)$$

Tak obliczana jednostkowa praca na „czyste” zagęszczanie (bez tarcia) nie zależy od ani od wymiarów geometrycznych komory i jej stanu powierzchni, ani od masy próbki. Całkując numerycznie wyrażenie (15), otrzymano pokazane na rys. 4. przebiegi jednostkowej pracy zagęszczania w funkcji temperatury i gęstości względnej ρ/ρ_L .

Podsumowanie

Przedstawiona metoda określania jednostkowej pracy zagęszczania E_{jz} materiałów sypkich umożliwia ocenę porównawczą różnych mieszanek paszowych niezależnie od warunków prowadzenia badań i parametrów geometrycznych komory prasowania.

Otrzymane wyniki wskazują na wyraźny wpływ wzrostu temperatury mieszanek na spadek wartości odpowiednika granicy plastyczności i współczynnika tarcia Prandtla m_L , co prowadzi do zmniejszenia energochłonności zagęszczania badanej mieszanki paszowej.

Uzyskane metodą identyfikacji procesu w komorze zamkniętej stałe materiałowe mogą być wykorzystane do modelowania i analizy energochłonności procesów zagęszczania mieszanek paszowych realizowanych w przemysłowych urządzeniach granulujących [2, 6].

Piśmiennictwo

1. Baron B.: Metody numeryczne w Turbo Pascalu. Wyd. Helion, Gliwice 1994.
2. Czaban J.: Ciśnieniowa aglomeracja pasz w układzie roboczym granuladora. Praca doktorska, Politechnika Białostocka, Białystok 2000.
3. Drujanov B.A.: Příkladnaja teorija plastičnosti poristych tel. Mašinostroenie, Moskva 1989.
4. Gąsiorek S.: Makroskopowe przejawy procesu zagęszczania i scalania proszków ferrytowych przez prasowanie i spiekanie. Zesz. Nauk. AGH, Ceramika, 40, 1978.
5. Green R.: A plasticity theory for porous solids. Int. J. of Mech. Sci. 14, 4, 1972.
6. Kamiński Z.: Energochłonność procesu ciśnieniowej aglomeracji pasz w urządzeniach granulujących. Praca doktorska, Politechnika Białostocka, Białystok 1995.
7. Kamiński Z.: Model matematyczny procesu prasowania mieszanek paszowych w komorze zamkniętej. VII Sympozjum im. prof. Cz. Kanafojskiego: Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych. Płock, 1997, ss. 221 – 226.
8. Laptev A.M.: Analiz formirovanija i dopressovki poristych vtulok metodom tonkich sečenij, Proškovaja Metallurgija 1988, 7, ss. 30-35.
9. Okoński St.: Podstawy plastycznego kształtowania materiałów spiekanych z proszków metali. Monografia 153, Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Kraków 1993.
10. Shima S., Oyane M.: Plasticity theory for porous metals. Int. J. of Mech. Sci. 18, 6, 285-291, 1976.

Streszczenie

Przedstawiono opracowany przy wykorzystaniu metody cienkich przekrojów model matematyczny prasowania mieszanek w komorze zamkniętej. Na jego podstawie określono energochłonność zagęszczania badanej mieszanki paszowej.

Summary

The method of thin section to mathematical modeling of pressing of fodder mixtures in the closed chamber is used in the paper. The model was used for calculating energy consumption of pressing of fodder mixtures.

Recenzent: Prof. dr hab. inż.