

**Bazyli KRUPICZ<sup>\*</sup>, Wojciech TARASIUK<sup>\*</sup>**

## **WPLYW SIŁ TARCIA NA WŁAŚCIWOŚCI WYROBÓW OTRZYMANÝCH POPRCZEZ ZAGĘSZCZANIE MATERIAŁÓW SYPKICH**

### **INFLUENCE OF FRICTION FORCES ON THE PROPERTIES OF PRODUCTS MADE BY THICKENING OF LOOSE MATERIALS**

#### **Słowa kluczowe:**

zagęszczanie, modele tarcia, współczynnik prasowania  $\psi$

#### **Key words:**

consolidation, friction models, consolidation coefficient  $\psi$

#### **Streszczenie**

W pracy dokonano analizy rozkładu sił tarcia w zagęszczanym ośrodku sypkim. Zagęszczaniu poddawano mieszanę wapienno-piaskową. Dla niej określono rozkład nacisków  $p_r(z)$  na ścianki boczne formy wywołane siłami tarcia i ciśnieniem prasowania  $p(z)$ . Do opisu ciśnienia prasowania zastosowano model tarcia Amontonsa-Coulomba. Zdefiniowano nowy współczynnik prasowa-

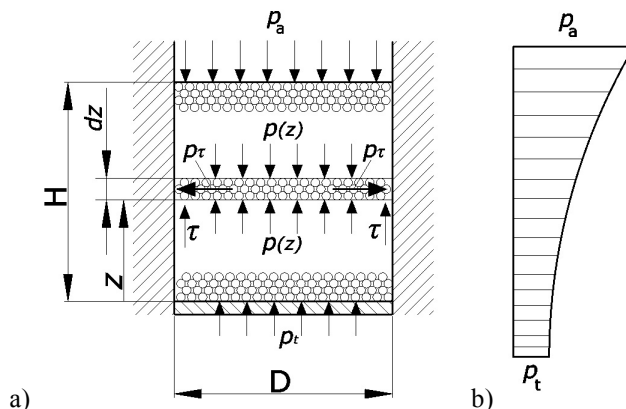
---

<sup>\*</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok, Polska, tel. 85 746 9225, e-mail: b.krupicz@pb.edu.pl.

nia  $\psi = f\zeta$ . Określono wpływ sił tarcia na właściwości otrzymanego wyrobu. Zmniejszającym się naciskom bocznym odpowiadała większa nasiąkliwość, mniejsza gęstość i wytrzymałość wyrobu na ściskanie.

## WPROWADZENIE

Proces zagęszczania materiałów sypkich odbywa się poprzez prasowanie w zamkniętych lub otwartych formach. Podczas zagęszczenia występuje ruch cząstek względem siebie i powierzchnią elementów kształtujących wyrób. Procesowi temu towarzyszy wzajemne oddziaływanie, a w tym i sił tarcia między cząstkami materiału zagęszczanego, ściankami formy i dnem stempla. Wartości tych sił wpływają na stan równowagi lokalnego obszaru [L. 1, 2]. Ponieważ siły są zróżnicowane w różnych obszarach, stąd ciśnienie formujące wyrób jest niejednakowe w całej jego objętości i w rezultacie właściwości wyrobu mogą być niejednorodne w całej jego masie. Dotyczyć to może takich cech jak gęstość, nasiąkliwość, wytrzymałość na ściskanie. Wartości sił tarcia mogą też decydować o kącie ustalającym płaszczyznę ścinania podczas osiowego ściskania [L. 3, 4]. Wpływ sił tarcia w procesie zagęszczania materiału sypkiego analizowano na przykładzie mieszanki wapienno-piaskowej i gotowego wyrobu, wykonanego z tego materiału, w postaci bloku silikatowego. Schemat obliczeniowy nacisków na ścianki cylindrycznej zamkniętej formy o średnicy  $D$  pokazano na Rys. 1.



Rys. 1. a) schemat obliczeniowy nacisków bocznych, b) schemat ciśnienia prasowania

Fig. 1. a) the calculation scheme of side pressures, b) the graph scheme of compression pressure

Do obliczeń nacisku na ścianki przyjęto hipotezę ośrodka jednorodnego, do którego można stosować równania mechaniki ośrodków ciągłych. Przyjęto również, że ciśnienie prasowania na danej wysokości próbki w całym jej przekroju jest stałe. W warunkach tarcia cząstek mieszanki o ścianki formy przyjęto

model tarcia Amontonsa-Coulomba, to znaczy że naprężenie styczne  $\tau$  jest proporcjonalne do bocznego nacisku  $p_\tau$  ( $\tau = fp_\tau$ ,  $f$  – współczynnik tarcia). W pracach [L. 5, 6] związanych z zagęszczaniem proszków metali i tworzyw sztucznych miało miejsce zmniejszanie się współczynnika tarcia w miarę wzrostu nacisku stempla prasującego. Przyjmowano również, że nacisk boczny  $p_\tau$  jest proporcjonalny do ciśnienia zagęszczania  $p(z)$ , czyli  $p_\tau = \xi p(z)$ ,  $\xi$  – współczynnik naciska bocznego. Wartości tych współczynników przyjmowano jako stałe w całej próbce przy danym nacisku stempla. Definiując nowy współczynnik prasowania  $\psi$ :

$$\psi = f\xi \quad (1)$$

można przyjąć, że naprężenie styczne:

$$\tau = \psi p(z) \quad (2)$$

Współczynnik  $\psi$ , przy zadanym nacisku stempla, jest charakterystyczny dla pary ciernej, którą stanowi materiał formy i zagęszczane tworzywo. Na podstawie równowagi warstwy o wysokości  $dz$  otrzymano równanie różniczkowe [L. 1, 9]:

$$\frac{dp(z)}{dz} = \frac{4\tau}{D} \quad (3)$$

Jego rozwiązanie przy warunku brzegowym  $p(z = H) = p_a$ , ma postać:

$$p(z) = p_a e^{\frac{4\psi}{D}(z-H)} \quad (4)$$

Schemat wykresu zależności ciśnienia prasowania na wysokości formy, według przyjętego modelu, pokazano na **Rys. 1b**. Przy przyjętych założeniach nacisk boczny  $p_\tau$  tworzywa na formę ma postać:

$$p_\tau(z) = \xi p_a e^{\frac{4\psi}{D}(z-H)} \quad (5)$$

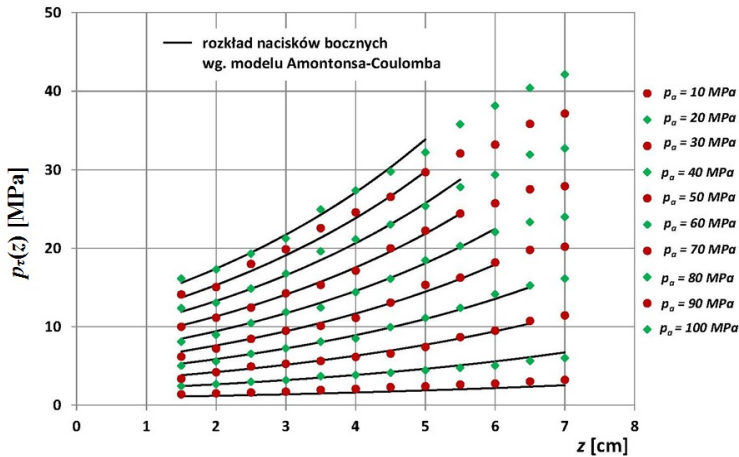
Badania doświadczalne będą stanowiły weryfikację wpływu sił tarcia na rozkład nacisków bocznych, a tym samym ciśnienia prasowania. To z kolei ma bezpośrednie przełożenie na jednorodność właściwości zagęszczonego wyrobu, takie jak gęstość, wytrzymałość na ściskanie, chłonność wody.

## BADANIA DOŚWIADCZALNE

### Badanie nacisków bocznych

Badania doświadczalne dotyczyły wyrobów silikatowych. Były one utworzone poprzez prasowanie mieszanki wapienno-piaskowej, następnie poddanej procesowi autoklawizacji, tj. działaniu pary wodnej pod ciśnieniem 6 MPa w temperaturze 203°C. Naciski zagęszczonej mieszanki na ścianki formy mierzono na specjalnym stanowisku metodą opisaną w pracy [L. 7, 9]. Próbka miała średnicę 50 mm i wysokość 80 mm. Przyjęta metodyka badań pozwalała na pomiary sił nacisku na wysokości próbki w odległościach co 5 mm w przedziale 15–70 mm, poczynając od dna formy. Łącznie uzyskiwano 12 punktów pomiarowych przy zadanym nacisku stempla.

Mieszanka wapienno-piaskowa posiadała ziarnistość w przedziale 0–0,25 mm. Pomiarów dokonywano przy nacisku stempla co 10 MPa w zakresie 0–100 MPa. Wyniki pomiarów nacisków bocznych pokazano na Rys. 2.



Rys. 2. Zależność nacisków bocznych  $p_r(z)$  od dna formy; punkty – dane doświadczalne, linie ciągłe – na podstawie modelu Amontonsa-Coulomba

Fig. 2. Dependency of side pressures  $p_r(z)$  on the bottom of the mould; points – experimental data, lines – based on Amontons-Coulomb model

Punkty pomiarowe aproksymowano według zależności (5), którą da się przedstawić w postaci:

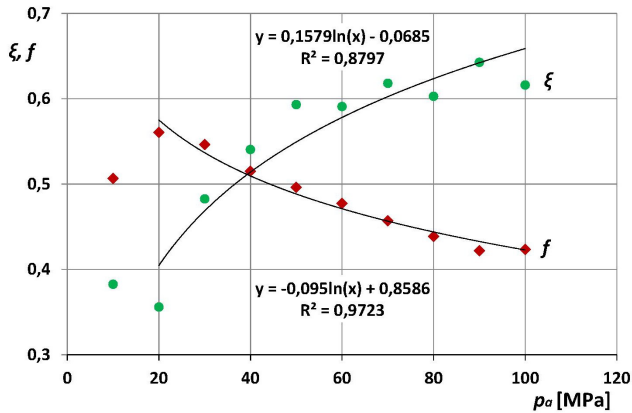
$$p_r(z) = \xi e^{\frac{4\psi}{D}(z-H)} = \xi e^{a+bz} \quad (6)$$

Po zlogarytmowaniu zależności (6) otrzymano równanie linii prostej w półlogarytmicznym układzie współrzędnych:

$$\ln p_{\tau}(z) = a + bz \quad (7)$$

w którym 
$$b = \frac{4\psi}{D}, \quad \psi = \frac{1}{4}bD, \quad a = \ln \xi p_a + \frac{4\psi H}{D} \quad (8)$$

Okazało się, że kryterium tarcia Amontonsa–Coulomba nie może być stosowane na całej wysokości próbki. Im jest wyższy nacisk stempla, tym bardziej widoczny jest wpływ tarcia tworzywa o powierzchnię stempla. Ustalając zakres stosowalności przyjętego prawa, kierowano się kryterium wartości  $R^2 \geq 0,99$  przy ustalaniu prostej (7) metodą najmniejszych kwadratów. Mając wartości współczynników  $a$  i  $b$  w równaniu (7), można również z zależności (8) obliczyć współczynnik tarcia  $f$  oraz współczynnik nacisku bocznego  $\xi$ . Wartości współczynników  $f$ ,  $\xi$  w zależności od zastosowanego nacisku stempla pokazano na Rys. 3.



Rys. 3. Wartości współczynników nacisku bocznego  $\xi$  i tarcia zewnętrznego  $f$ , mieszanki o ziarnistości  $0 \div 0,25$  mm

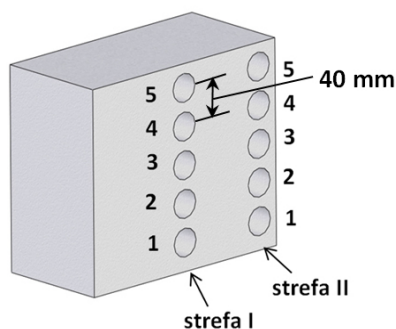
Fig. 3. Values of lateral pressure coefficients  $\xi$  and external friction  $f$ , granulation  $0 \div 0.25$  mm

Zależności te aproksymowano funkcją logarytmiczną. Anomalie ich przebiegu wystąpiły przy małych naciskach stempla (10 MPa). Do wyznaczenia rozkładu ciśnienia prasowania na podstawie równania (4) wystarcza więc znajomość tylko wartości współczynnika  $\psi$ .

### Właściwości wyrobu

Z **Rys. 2** wynika, że za sprawą sił tarcia i wraz z oddalaniem się od powierzchni stempla zmniejsza się nacisk boczny  $p_t(z)$  będący wynikiem zmniejszającego się ciśnienia prasowania  $p(z)$ . Stąd należy się spodziewać niejednorodności cech materiałowych, takich jak gęstość, chłonność wody, wytrzymałości na ściskanie. Zdolność do pochłaniania wody może być wskaźnikiem porowatości wyrobu pod warunkiem, że pory są otwarte. Przy porach zamkniętych będzie zmieniać się tylko gęstość. Do określenia ww. cech materiałowych na kierunku prasowania wybrano bloki silikatowe określone nazwą handlową 3NFD.

Zgodnie z **Rys. 3** pobrano po 3 próbki na każdej wysokości wyrobu i na każdy rodzaj badań. Próbki miały średnicę 30 mm i wysokość 50 mm.



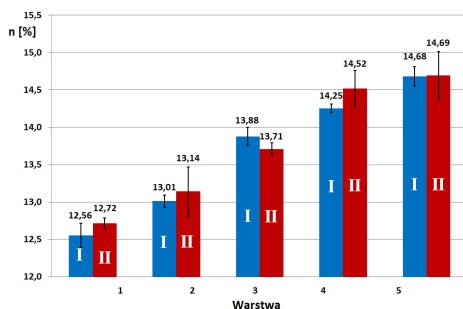
**Rys. 3. Schemat bloku silikatowego 3NFD i umiejscowienia stref pobrania próbek**

Fig. 3. The scheme of silicate block 3NFD and location of the zones, where the samples were taken

Do badań gęstości i nasiąkliwości użyto tych samych próbek. Nasiąkliwość  $n$  określono następująco:

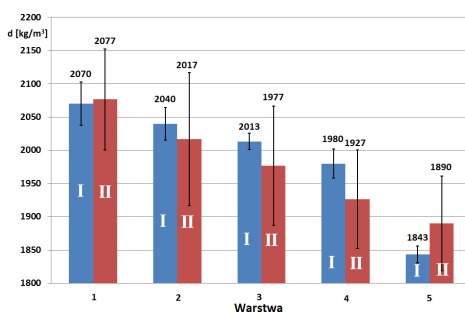
$$n = \frac{m_w - m_s}{m_s} 100\% \quad (9)$$

Przed od określeniem gęstości próbki były suszone do uzyskania stałej masy w temperaturze 40°C. Badaniu wytrzymałości na ściskanie poddano próbki ze strefy II (skrajnej) i warstw leżących w pobliżu stempla (warstwa 1) i dna (warstwa 5). Wyniki badań przedstawiono na rysunkach: **Rys. 4** – nasiąkliwość, **Rys. 5** – gęstość, **Rys. 6** – wytrzymałość na ściskanie próbek suchych i nasyconych wodą.



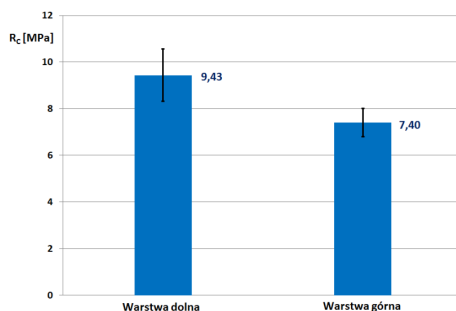
**Rys. 4. Nasiąkliwość próbek z obszaru I i II wyrobu silikatowego 3NFD**

Fig. 4. The absorptivity of samples from I and II area of the silicate 3NFD product



**Rys. 5. Gęstość próbek z obszaru I i II wyrobu silikatowego 3NFD**

Fig. 5. Density of samples from I and II area of the silicate 3NFD product



**Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie próbek z obszaru II wyrobu silikatowego 3NFD**

Fig. 6. Resistance to compression – samples from I and II area of the silicate 3NFD product

Analiza danych doświadczalnych wskazuje na istotny wpływ sił tarcia towarzyszących procesowi zagęszczania wyrobów sypkich na właściwości wyrobu. Zmiany się powiększają wraz z wzrostem wysokości wyrobu na kierunku prasowania.

## WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz wyciągnięto następujące wnioski:

- rozkład ciśnienia prasowania  $p(z)$ , na kierunku osi stempla podczas zagęszczania mieszanki wapienno-piaskowej można opisać, stosując model tarcia Amontonsa-Coulomba, z zastrzeżeniem strefy w pobliżu stempla prasującego,
- do obliczeń ciśnienia prasowania  $p(z)$  można stosować zdefiniowany nowy współczynnik prasowania  $\psi$  będący iloczynem współczynnika tarcia  $f$  formy i ośrodka zagęszczanego oraz współczynnika nacisku bocznego  $\xi$  ( $\psi = f\xi$ ),
- siły tarcia powodują zmniejszanie się ciśnienia prasowania wraz z oddalaniem się od stempla prasującego,
- w wyniku zmniejszania się ciśnienia prasowania obniza się gęstość wyrobu oraz wytrzymałość na ściskanie, wzrasta natomiast jego nasiąkliwość wynikająca z mniejszego zagęszczenia wyrobu (większej porowatości).

*Badania wykonano w ramach projektu S/WM/1/2013.*

## LITERATURA

1. Барсуков В., Крупич Б.: Трибомеханика дисперсных материалов. Технологические приложения. Гродно 2004.
2. Jeng-Haur Horng, Chin-Chung Wei, Hung-Jung Tsai, Bai-Chiuan Shiu: A study of surface friction and particle friction between rough surfaces. *Wear* 267, 2009, s. 1257–1263.
3. Барсуков В.Г., Крупич Б., Барсуков В.В.: Трибомеханический анализ процессов межслойного сдвига и зарождения поверхностных трещин в компактируемых дисперсных материалах. *Трение и износ*, Vol. 36, No. 2, 2015, 147–153.
4. Barsukov V.G., Barsukov V.V., Krupicz B.: The Effect of Interparticulate and External Friction on the Orientation of Shear Sites when Brittle Dispersed Materials Undergo Compaction. *Journal of Friction and Wear*, Vol. 33, No 1, 2012, s. 53–59.
5. Demianiuk L.: Analiza współczynnika tarcia w roboczym układzie brykietującym, *Masinoznawstwo*, nr 11/12 – 2004, s. 46–50.
6. Drzymała Z., Hryniewicz M., Kostrukiewicz B.: Badania zmienności tarcia zewnętrznego w procesie zagęszczania materiałów droбноziarnistych. *Mechanika*, nr 11/2, 1992, s. 135–144.
7. Page N.M., Youstuff M., Wauchope C.I.: Interparticle friction in granular ceramic materials, *Nat. Conf. Publ., Inst. Eng. Austral.* 92/7, s. 267–271.



8. Pullen J., Williamson J.B.P.: On the plastic contact of rough surface, Proceedings of the Royal Society of London A327, 1972.
9. Tarasiuk W., Krupicz B.: Analiza sił tarcia w procesie zagęszczania mieszanki wapienno-piaskowej. Tribologia, nr 3, 2009, s. 273–283.

### Summary

**In the paper, the analysis of friction force distribution in the consolidated loose material was made. The sand-lime mix was subjected to compression. Distribution of  $p_{\tau}(z)$  pressures related to this mix (caused by friction forces and  $p(z)$  pressure) on side walls of the mould are described. The friction model Amontons-Coulomb was used to describe a compression pressure  $\psi = f\xi$ . A new consolidation coefficient  $\psi = f\xi$  was calculated. The influence of friction forces on the properties of the formed material is described. The decrease in side pressures was accompanied by increased absorptivity, decreased density, and a resistance of the material to compression.**