

Gabriel BOROWSKI
Politechnika Lubelska

SYMULACJA ROZKŁADU STOPNIA ZAGĘSZCZENIA W PROCESIE SCALANIA MATERIAŁÓW DROBNOZIARNISTYCH Z UŻYCIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

W publikacji przedstawiono wyniki symulacji rozkładu gęstości materiałów drobnoziarnistych podczas scalania w matrycy zamkniętej. Porównano dwa warianty procesu formowania brykietów przebiegające w różnych warunkach tarcia zewnętrznego. Do symulacji komputerowej wykorzystano model Druckera–Pragera Cap zaimplementowany w programie obliczeniowym metodą elementów skończonych ABAQUS wersja 6.6. Model ten skalibrowano, wykorzystując wyniki badań doświadczalnych uzyskane podczas scalania w walcowej matrycy zamkniętej próbek odpadów poszlifierskich z obróbki stali. Stwierdzono, że modyfikacja warunków smarowania powierzchni wewnętrznej matrycy oddziałuje na stopień zagęszczenia materiału w brykietach. Wyniki analizy numerycznej stopnia zagęszczenia wykazały dobre dopasowanie zastosowanego modelu oraz dużą zgodność z wynikami wcześniejszych badań doświadczalnych brykietowania odpadów.

1. Wprowadzenie

Powszechnie stosowaną metodą zagęszczania surowców drobnoziarnistych, w tym odpadowych, jest scalanie w prasach stemplowych i walcowych. W procesie scalania, wywierając odpowiedni nacisk, materiałom tym nadaje się postać kawałkową, określoną kształtem matrycy formującej. Uzyskane wyroby nazywane są brykietami. Brykietowanie prowadzi się w temperaturach otoczenia (na zimno) lub podwyższonych (na gorąco). Brykiety powinny spełniać wymogi potencjalnych odbiorców i posiadać odpowiednie właściwości chemiczne, fizyczne oraz mechaniczne.

Właściwości mechaniczne brykietów zależą od sposobu przygotowania mieszanki, typu i kształtu narzędzi formujących, zastosowanych nacisków prasy, tarcia zewnętrznego oraz wewnętrznego i innych czynników. Uzyskana dobra odporność brykietów powinna być zachowana w dłuższym okresie przechowywania [1].

Rozwój metod komputerowego wspomagania projektowania i wytwarzania wyrobów pozwala uprościć i przyspieszyć dobór parametrów scalania, zaprojektować matrycę formującą, a także określić rozkład stopnia zagęszczenia, wielkości naprężeń wewnętrznych oraz miejsca powstawania mikropęknięć i innych wad struktury. Szczególnie przydatne jest zastosowanie metody elementów skończonych (MES). Umożliwia ona symulację zjawisk i procesów w warunkach odpowiadających rzeczywistym, przynosząc poprawę jakości, obniżenie kosztów produkcji oraz zwiększenie zainteresowania gospodarczym wykorzystaniem brykietów.

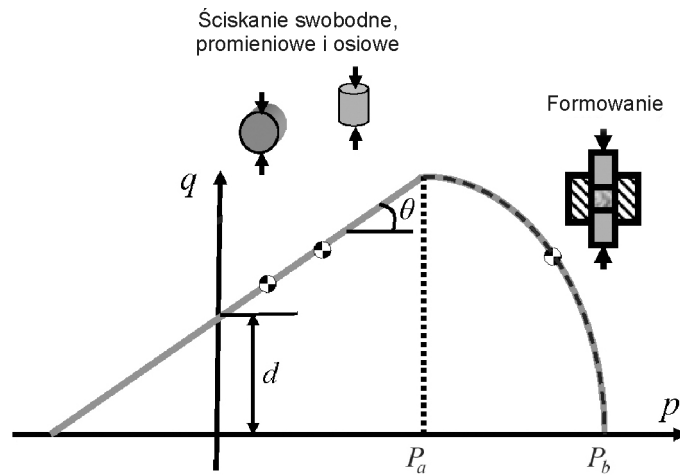
2. Modele scalania materiałów drobnoziarnistych

Mechanizm scalania materiałów drobnoziarnistych charakteryzuje znaczna niejednorodność parametrów fizycznych, takich jak siły, naprężenia, tarcie itp. Istotny jest więc dobór właściwego modelu matematycznego umożliwiającego odwzorowanie rzeczywistego ośrodka ziarnistego. Proces doboru obejmuje opracowanie ekwiwalentnego modelu dyskretnego (obliczeniowego) [5].

Do opracowania modeli scalania materiałów sypkich wykorzystuje się metodę elementów dyskretnych (ang. *discrete element modelling* – DEM) [2]. Cząstki materiałów przedstawia się w formie definiowanych obiektów geometrycznych. Ze względów praktycznych preferowane są sfery lub aglomeraty sfer. Same cząstki uznaje się za sztywne i nie mogą one na siebie nachodzić. Metodę tę wykorzystano do modelowania procesu scalania materiałów drobnoziarnistych, z uwzględnieniem różnorodności wymiarów poszczególnych ziaren substancji, ich kształtu oraz wzajemnego oddziaływania [3]. Niedogodnością tej metody jest bardziej czasochłonna obróbka wyników symulacji w porównaniu z innymi metodami modelowania [6].

Do opisu scalania materiałów ziarnistych stosowany jest też model Gursona [4]. Założeniem modelu jest istnienie w materiale porowatości, wyrażonej udziałem objętościowym pustek, oraz inicjacja nowych pustek w procesie odkształcenia. Model ten często stosowany jest do rozwiązywania zagadnień oddziaływania cząstek w strukturach o znacznym zagęszczeniu, zakładając kulisty kształt pojedynczego ziarna. Mniej przydatny jest on w strukturach o większej porowatości.

Obecnie często stosowany jest model Druckera–Pragera Cap (DPC), powstały w wyniku modyfikacji modelu Mohra–Coulomba. Model DPC reprezentuje sprężysto-plastyczny stan odkształceń w procesie zagęszczania z uwzględnieniem tarcia wewnętrznego poszczególnych ziaren substancji. Model ten wykorzystano do symulacji scalania w matrycy zamkniętej tlenków wolframu oraz innych materiałów drobnoziarnistych z obróbki metali [9]. W modelu DPC wartości odkształceń sprężysto-plastycznych zależą od stopnia zagęszczenia ośrodka (rys. 1.).



Rys. 1. Obszar zastosowań modelu matematycznego Druckera–Pragera Cap: p – nacisk stempla, q – naprężenia normalne, d – naprężenia styczne, P_a – granica sprężystości, P_b – granica plastyczności, θ – kąt tarcia; na podstawie [9]

Przebieg krzywej odkształceń przedstawia zależność liniowa w pierwszej fazie, co odpowiada warunkom ściskania swobodnego, oraz zależność eliptyczną w drugiej fazie dla warunków ściskania w matrycy zamkniętej. Druga część przedstawionego wykresu reprezentuje zatem przebieg odkształceń plastycznych materiałów sypkich scalanych w prasach do brykietowania z zastosowaniem matrycy zamkniętej. Opisana jest ona następującą zależnością:

$$F_C = \sqrt{(p - P_a)^2 + (Rq)^2} - R(d + P_a \tan(\theta)) = 0 \quad (1)$$

gdzie: p – nacisk stempla,
 q – naprężenia normalne,
 d – naprężenia styczne,
 P_a – granica sprężystości,
 θ – kąt tarcia,
 R – współczynnik rozbieżności ($0,0 < R < 1,0$).

Granice sprężystości P_a oblicza się z równania:

$$P_a = \frac{P_b - Rd}{1 + R \tan(\theta)} \quad (2)$$

gdzie P_b – granica plastyczności.

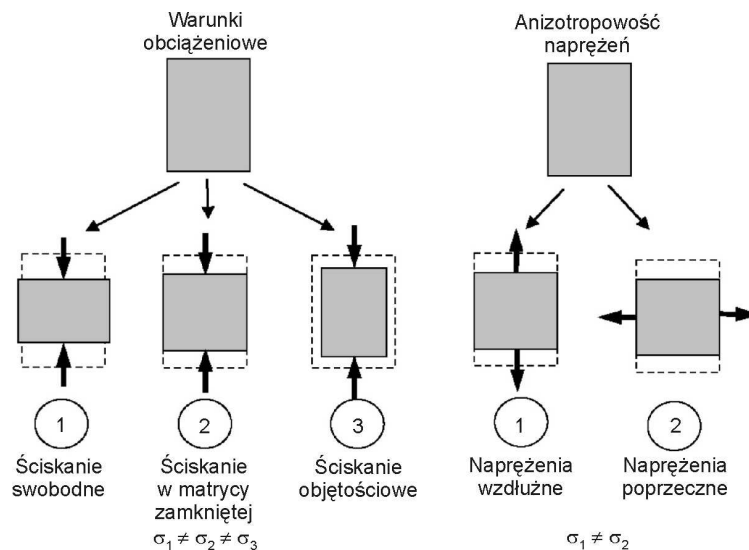
W przypadku niewielkich nacisków jednostkowych odkształcenia plastyczne materiału sypkiego można opisać zależnością liniową Mohra–Coulomba:

$$F_s = q - p \tan(\theta) - d \quad (3)$$

gdzie F_s – nacisk jednostkowy.

W przedstawionym modelu DPC występują cztery współczynniki równania (zmiennne), które wyznacza się na podstawie pomiarów doświadczalnych [7, 8]. Istotnym czynnikiem wpływającym na wyniki modelowania jest anizotropowość materiałów. W przypadku brykietowania w matrycy zamkniętej wykazano, że anizotropowy charakter mają m.in. naprężenia wewnętrzne [4]. Eksperyment polegał na wytwarzaniu próbek o kształcie walcowym z materiałów o różnej podatności na scalanie – o ziarnach miękkich podatnych na brykietowanie oraz ziarnach twardych trudno poddających się brykietowaniu. Przeprowadzono testy ściskania próbek oraz określono wartości naprężeń wzdłużnych i poprzecznych względem osi bryketu.

Wykazano, że w przypadku materiałów o ziarnach miękkich wartości naprężeń wzdłużnych są mniejsze w porównaniu z wartościami naprężeń poprzecznych. W materiałach o ziarnach twardych obserwowano odwrotną zależność. W obu przypadkach naprężenia były funkcją stopnia zagęszczenia, przy czym w materiale podatnym na brykietowanie anizotropowość zwiększała się wraz ze wzrostem zagęszczenia, w materiałach zaś niepodatnych zwiększała się ich izotropowość. W procesie scalania rozkład naprężeń wewnętrznych szczególnie



Rys. 2. Zależność naprężeń od warunków obciążeniowych oraz anizotropowości, na podstawie [7]

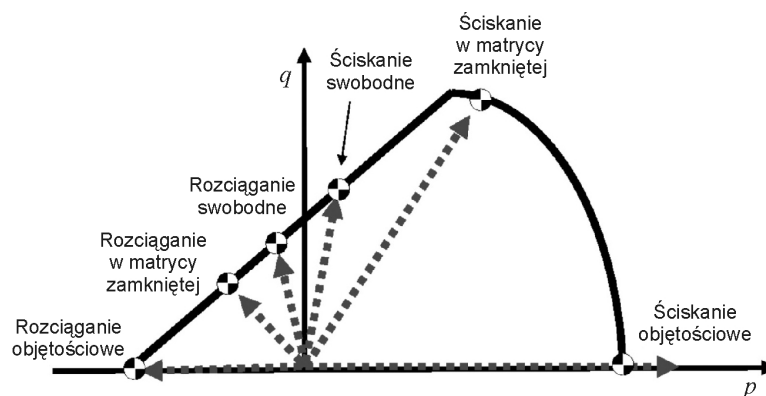
zależy zatem od rodzaju i właściwości materiału, a nie tylko od kształtu i ułożenia ziaren. Na rysunku 2. pokazano charakter naprężeń w zależności od warunków obciążeniowych oraz anizotropowości.

W opracowanej niedawno metodzie modelowania z wykorzystaniem struktur wieloelementowych (*Multi-Particle Finite Element Method*) pod uwagę brane są tylko istotne właściwości materiałów sypkich, np. tarcie wewnętrzne między ziarnami [9]. Metoda ta polega na utworzeniu siatki elementów skończonych dla pojedynczych ziaren rozpatrywanej substancji. Wykorzystując metodę tę, można uwzględnić zarówno właściwości mechaniczne poszczególnych ziaren, jak i zjawiska kontaktowe zachodzące na ich powierzchni. Metoda przydatna jest do symulacji zjawisk deformacji struktury wewnętrznej w przypadku znacznego zagęszczenia materiału drobnoziarnistego.

3. Dobór parametrów modelowania

Do symulacji metodą elementów skończonych wykorzystano program ABAQUS wersja 6.6. W programie zaimplementowane są powszechnie stosowane modele matematyczne wykorzystywane w różnych procesach inżynierskich, w tym model Druckera–Pragera Cap, zastosowany do odwzorowania procesu brykietowania wybranego rodzaju materiału, którym był odpad ze szlifowania wyrobów stalowych.

Program ABAQUS umożliwia symulację zjawisk statycznych i dynamicznych. Ze względu na to, że proces zagęszczania charakteryzuje niejednorodność właściwości fizycznych właściwe jest wykorzystanie równań opisujących zjawiska dynamiczne, czyli wybranie wariantu Explicit. Zdefiniowany obszar modelowania obejmował sześćoosiowy stan odkształceń, tj.: rozciąganie i ściskanie swobodne, rozciąganie i ściskanie nieswobodne (objętościowe) oraz rozciąganie i ściskanie osiowe w matrycy zamkniętej (rys. 3.).



Rys. 3. Obszar modelowania ze względu na warunki obciążeniowe

Parametry modelu DPC dobrano na podstawie wcześniejszych badań eksperymentalnych [1]. Wykorzystano prasę stemplową wraz z matrycą formującą umożliwiającą uzyskanie walcowych brykietów o średnicy 30 mm. Ujednolicony materiał poddawano do komory matrycy i ściskano poprzez przemieszczanie górnego stempla prasy o wartość ok. 20 mm z położenia początkowego wynoszącego 40 mm od powierzchni stempla dolnego. Dla każdej próbki określono stopień zagęszczenia materiału oraz inne właściwości materiałowe niezbędne do skalibrowania modelu (tab. 1.). Ponadto obliczono stopień zagęszczenia w zależności od warunków tarcia zewnętrznego – bez smarowania oraz ze smarowaniem powierzchni wewnętrznych narzędzi formujących (tab. 2.).

Tabela 1. Określenie współczynników modelu matematycznego

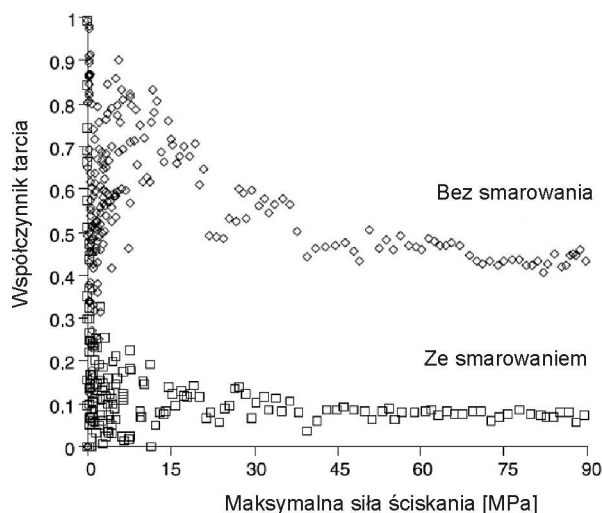
Stopień zagęszczenia	Moduł Younga E [Pa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Naprężenia styczne d [Pa]	Kąt tarcia θ [°]	Współczynnik rozbieżności R [-]	Granica plastyczności P_b [Pa]
1,60	4,50E + 07	0,016	2,68E + 04	54,4	0,270	6,09E + 05
1,80	1,77E + 08	0,035	7,23E + 05	68,8	0,312	4,03E + 06
2,00	4,82E + 08	0,061	1,16E + 06	68,3	0,586	1,07E + 07
2,20	1,05E + 09	0,094	3,12E + 06	68,0	0,640	2,05E + 07
2,40	2,06E + 09	0,136	5,85E + 06	68,1	0,690	3,58E + 07
2,60	3,71E + 09	0,187	1,05E + 07	67,4	0,789	6,47E + 07
2,80	6,32E + 09	0,250	1,86E + 07	66,5	0,907	1,28E + 08

Tabela 2. Pomiary doświadczalne dla wybranej partii próbek

Numer próbki	Przemieszczenie stempla [mm]	Stopień zagęszczenia [-]	Warunki tarcia
1	20,4	2,39	bez smarowania
2	19,7	2,24	bez smarowania
3	18,9	2,04	bez smarowania
4	18,1	1,89	bez smarowania
5	17,6	1,78	bez smarowania
6	20,6	2,41	ze smarowaniem
7	19,7	2,24	ze smarowaniem
8	18,9	2,04	ze smarowaniem
9	18,2	1,91	ze smarowaniem
10	17,6	1,78	ze smarowaniem

Wykorzystano też wyniki badań innych autorów [5] dotyczące wpływu oporów tarcia na maksymalną siłę ściskania w prasie stemplowej (rys. 4.). Stwierdzono, że wartość nacisków jednostkowych prasy istotnie zależy od warunków tarcia w procesie brykietowania.

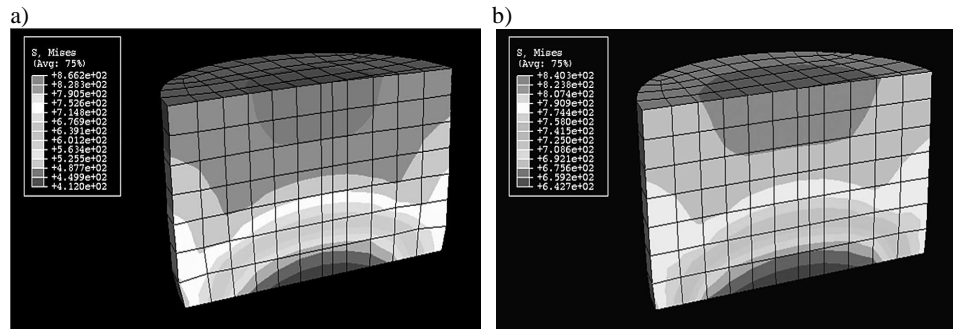
Rys. 4. Wpływ oporów tarcia na maksymalną siłę ściskania w prasie stemplowej, na podstawie [5]



Do przeprowadzenia symulacji komputerowej wybrano siatkę typu C3D8R zastosowaną dla połówki elementu ze względu na jego symetrię. Założono, że powierzchnia stempli dociskowych jest sztywna, a odkształcenia zachodzą tylko w materiale drobnoziarnistym. Górny stempel przemieszcza się z prędkością $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, dolny jest zaś nieruchomy. Gęstość właściwa materiału wynosiła $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

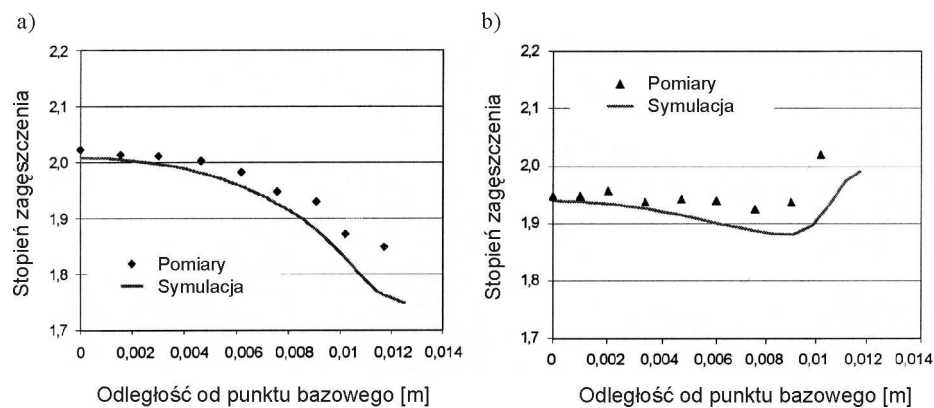
4. Analiza wyników badań

Wyniki symulacji rozkładu stopnia zagęszczenia w zależności od warunków tarcia na powierzchniach narzędzi formujących przedstawiono na rys. 5. Stwierdzono, że brykiety formowane z niższymi oporami tarcia charakteryzuje bardziej jednorodna struktura wewnętrzna. Zagęszczenie struktury wewnętrznej brykietów przebiega warstwowo – większe jest przy powierzchni stempla górnego i w środku przekroju, mniejsze zaś na brzegach i przy powierzchni stempla dolnego. Stwierdzono również, że zmniejszenie oporów tarcia w naczyniu formującym umożliwia zastosowanie niższych nacisków prasy podczas wytwarzania brykietów o określonym stopniu zagęszczenia. Znaczne przemieszczanie się warstw materiału drobnoziarnistego podczas brykietowania obserwowano zarówno dla małych, jak i dużych wartości tarcia zewnętrznego.



Rys. 5. Symulacja stopnia zagęszczenia brykietu: a) w naczyniu formującym bez smarowania, b) w naczyniu formującym z zastosowaniem smarowania

Uzyskane wyniki symulacji poddano weryfikacji doświadczalnej. W tym celu wykonano pomiary mikrotwardości powierzchni przekroju poprzecznego brykietu. Stwierdzono dużą zgodność wyników symulacji z uzyskanymi pomiarami. Na rysunku 6. porównano otrzymane wyniki, potwierdzając dobre dopasowanie zastosowanego modelu matematycznego.



Rys. 6. Rozkład stopnia zagęszczenia w przekroju poprzecznym brykietu: a) bez smarowania ścianek naczynia formującego, b) z zastosowaniem smarowania ścianek naczynia formującego

5. Podsumowanie i wnioski

Stosowanie metody elementów skończonych do symulacji procesu scalania materiałów droбноziarnistych umożliwiło analizę istotnych zjawisk fizycznych. Modelowano rozkład stopnia zagęszczenia w zależności od warunków tarcia zewnętrznego. Dobór tych parametrów pozwolił określić korzystne wartości nacisku jednostkowego prasy, dla których uzyskano brykiety o bardzo dobrej

wytrzymałości mechanicznej. Główną zaletą symulacji była możliwość szybkiego i ekonomicznego testowania wielu wariantów z uwzględnieniem wpływu różnych czynników.

W przypadku kontynuacji badań procesu scalania materiałów drobnoziarnistych należy uwzględnić anizotropowość naprężeń wewnętrznych w brykietach. Metoda elementów skończonych może być pomocna w symulacji wpływu wielu innych zjawisk fizycznych, jak np. utwardzanie materiału, powstawanie mikroporów oraz aglomeracja cząstek.

Na podstawie przedstawionych wyników i ich analizy sformułowano następujące wnioski:

- opracowanie realistycznych modeli symulacji materiałów drobnoziarnistych wymaga kalibrowania parametrów modelu za pomocą danych eksperymentalnych,
- na rozkład stopnia zagęszczenia materiału w brykietach znaczny wpływ mają warunki tarcia zewnętrznego,
- zmniejszenie tarcia w naczyniu formującym pozwala zastosować niższe naciski prasy do wytworzenia brykietów o określonym stopniu zagęszczenia,
- uwzględnienie wyników symulacji komputerowej przyniosło w rezultacie poprawę jakości brykietów wytwarzanych w prasie stemplowej z przeznaczeniem do utylizacji.

Literatura

1. Borowski G.: Modelling of powder processing in the roller press, [in:] Manufacturing technologies in mechanical engineering – Current research problems, J. Józwik (ed.), Published by Lublin Scientific Society, Lublin 2007, s. 205-212.
2. Coube O., Brewin P.: Modelling and numerical simulation of powder compaction, Powder Metallurgy, no 45(1), 2002, s. 18-19.
3. Cunningham J.C., Sinka I.C., Zavaliangos A.: Analysis of tablet compaction. Part I: Characterization of mechanical behaviour of powder and powder/tooling friction, Journal of Pharmaceutical Science, no 93, 2004, s. 2022-2039.
4. Galen S., Zavaliangos A.: Strength anisotropy in cold compacted ductile and brittle powders, Acta Materialia, no 53, 2005, s. 4801-4815.
5. Redanz P.: Numerical modelling of cold compaction of metal powder, Int. J. Mech, no 40, 1998, s. 1175-1189.
6. Schneider L.C R., Cocks A.C.F.: Experimental investigation of yield behaviour of metal powder compacts, Powder Metallurgy, no 45(3), 2002, s. 237-245.
7. Sinka I.C., Cocks A.C.F., Tweed J.H.: Constitutive data for powder compaction modelling, Journal of Engineering Materials and Technology, no 123, 2001, s. 176-183.
8. Sinka I.C., Cunningham J.C., Zavaliangos A.: The effect of wall friction in the compaction of pharmaceutical tablets with curved faces: a validation study of the Drucker–Prager Cap model, Powder Technology, no 133(1-3), 2003, s. 33-43.

9. Zavalianos A.: A numerical study of the development of tensile principal stresses during die compaction, Particulate Science and Technology, no 21, 2003, s. 105-115.

SIMULATION OF DENSITY DISTRIBUTION IN POWDER PROCESSING USING FINITE ELEMENT MODELLING

A b s t r a c t

The results of simulation of density distribution in die powders compaction were described in this paper. There were compared two different types of briquette forming under two lubrication conditions. Analysis of powders compaction were implemented for Drucker-Prager Cap model into finite element program ABAQUS ver. 6.6. This model was calibrated from experimental work by using simple test, such as cylindrical die compaction of the sample of metal waste powders. It was shown, that modifying the lubrication conditions between powder and die wall results in opposing relative density distribution trends in briquette. The predictions of the model in terms of relative density distribution show good agreement of used model and matching with experimental results of previous research work in wastes briquetting.

Złożono w Oficynie Wydawniczej w lipcu 2011 r.