

Lech Paszkowski*, Dionizy Biało, Waldemar Wiśniewski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, ul. Sw. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Poland

* Corresponding author. E-mail: L.Paszkowski@mchtr.pw.edu.pl

Otrzymano (Received) 07.01.2010

FORMOWANIE WTRYSKIWIANIEM KSZTAŁTEK Z KOMPOZYTÓW NA OSNOWIE POLIMEROWEJ Z METALOWYM NAPEŁNIACZEM PROSZKOWYM

Kompozyty funkcjonalne są to materiały składające się z co najmniej dwóch składników. W przypadku kompozytów polimerowych osnowę stanowi polimer termoplastyczny, termoutwardzalny lub chemoutwardzalny. Faza funkcjonalna nadaje kompozytowi określone właściwości mechaniczne, cieplne, elektryczne, magnetyczne lub inne wymagane przez projektanta. Faza ta występuje najczęściej w postaci włókien lub proszków o różnym kształcie cząstek.

Prezentowana praca dotyczy wybranej grupy kompozytów funkcjonalnych zwanych dielektromagnesami bądź magnesami wiązanymi. Na osnowę zastosowano polistyren będący polimerem termoplastycznym, zaś fazę funkcjonalną stanowi proszek stopowy Nd-Fe-B o własnościach magnetycznie twardych równomiernie rozproszony w osnowie. W pracy stosowano proszek o płatkowym i kulistym kształcie cząstek. Kompozyty zawierały objętościowo 48% proszków. Jako metodę formowania kształtek przyjęto wtryskiwanie na wtryskarce do tworzyw sztucznych. Wytwarzano kształtki w postaci prostopadłościennych belki o wymiarach 10×4×40 mm i walca o wymiarach ϕ 10×4 mm. Zasadniczym celem pracy było badanie przebiegu formowania kształtek podczas napełniania komory formy wtryskowej materiałem kompozytowym. Do analizy zastosowano metodę krokową polegającą na wykonaniu serii próbek wtryskiwanych z coraz większych porcji materiału kompozytowego. W ten sposób uzyskano kształtki obrazujące kolejne etapy formowania kształtki finalnej. Próby prowadzono przy ustalonych parametrach wtryskiwania: $T_w = 200^\circ\text{C}$ i $p_w = 110$ MPa. Wykazano, że sposób formowania kształtek podczas wtryskiwania kompozytów zawierających znaczne ilości proszku metalowego jest odmienny w stosunku do formowania wyprasek z polimerów niezawierających fazy funkcjonalnej. Ta odmiennosc wynika ze znacznie większej lepkości kompozytu niż polimeru. W trakcie wtryskiwania polimeru tworzy się front materiału przesuwający się zgodnie z kierunkiem wtryskiwania. Podczas wtryskiwania kompozytu do komory formy materiał wpływa w postaci pręta o przekroju poprzecznym kanału doprowadzającego.

Otrzymane próbki poddano badaniom metalograficznym. Wykonano zglady metalograficzne fragmentów wyprasek otrzymanych w kolejnych fazach wtryskiwania oraz wyprasek finalnych. Strukturę kształtek określano, wykorzystując komputerową analizę obrazu. Do jej przeprowadzenia zastosowano specjalistyczny program komputerowy Metllo 9.0b. Wyniki analizy przedstawiono w postaci obrazów zglądów metalograficznych oraz tak zwanych map strukturalnych. Mapy strukturalne przedstawiają lokalną koncentrację proszków na wydzielonych elementarnych fragmentach powierzchni przekrojów wyprasek. Wykazano, że w trakcie wtryskiwania i w gotowej wyprasce cząstki układają się w miarę równomiernie, zaś płatki przyjmują kierunki przypadkowe. Tak więc, możliwe jest wytwarzanie metodą wtryskiwania wyprasek o właściwościach izotropowych.

Słowa kluczowe: funkcjonalny kompozyt polimerowy, wtryskiwanie, proszki, jednorodność próbki

INJECTION MOULDING OF THE SAMPLES FROM COMPOSITES WITH A POLYMER MATRIX AND METAL POWDER

Functional composites are materials consisting of at least two components. In the case of polymer composites it matrix is made of thermoplastic or thermosetting polymers. Functional phase gives defined mechanical, thermal, electrical, magnetic or other properties required by the designer. This phase is usually in the form of fibers or powders with different particle shape.

The presented work concerns a selected group of functional composites called of dielectromagnets or bonded magnets. Thermoplastic polymer - polystyrene as the matrix material and alloy Nd-Fe-B powder with hard magnetic properties as the functional phase uniformly distributed in the matrix were used. Powder had a flaky or spherical shape. Composite material consisted of 48% powder by volume. As a method of sample forming, injection on injection molding machine, traditionally using for plastics, was applied. The sample was manufactured in the form of rectangular bars with dimensions of 10×4×40 mm and a cylinder with dimensions of ϕ 10×4 mm. The primary purpose of the study was investigating of the course of sample formation during form cavity filling by composite material. For the analysis stepwise method was used. Series of samples were injected with increasing doses of the composite material in the following steps. In this way the obtained samples showing the successive stages of the forming.

Trials were conducted at fixed injection parameters: $T_w = 200^\circ\text{C}$ and $p_w = 110$ MPa. It was shown that the way of sample shaping during injection molding from composites containing large quantities of metal powder is different in relation to the formation of polymer samples that not contain functional phase. This difference is due to a much higher viscosity of composite than the polymer. During injection of the polymer a front of the material is formed and is moving in the direction of in-

jection. During the injection of the composite, material flow into the form chamber in the form of rod with cross-section similar to the cross-section of the channel gate. Obtained samples were tested in metallographic way. Microstructures of the samples obtained in successive phases of injection molding and finished samples were prepared. Structure of the samples were determined using the computer image analysis based on a specialized computer program MetFlo 9.0b. The results of the analysis were presented in the form of images of metallographic structures and so-called structural maps. Structural maps represent the local concentration of the powders on separated small parts of the surface sections of the samples. It was shown that, during injection molding and in the finished sample particles are arranged as evenly and the flakes take random directions. Thus, it is possible to manufacture by injection parts with isotropic properties.

Keywords: functional polymer composites, injection moulding, powders, homogeneity of the sample

WPROWADZENIE

Kształtki z polimerów termoplastycznych najczęściej otrzymuje się przez wtryskiwanie na wtryskarkach. Niewątpliwą zaletą wtryskiwania jest możliwość uzyskania wyprasek w krótkim czasie, nieprzekraczającym kilkadziesiąt sekund. Poosiowy ruch tłoka lub ślimaka powoduje przemieszczenie się polimeru z cylindra wtryskarki poprzez dyszę wtryskową i tulejkę wtryskową formy, a następnie przez kanały prowadzące do gniazda formy wtryskowej. Przesuwający się w trakcie wtryskiwania front masy dąży do całkowitego wypełnienia gniazda formy, tworząc gotowy wyrób [1-4].

Formowanie się elastycznego pręta, w przybliżeniu odwierciedlającego kształt przewężki, przesuwającego się do przeciwległej ścianki gniazda formy wtryskowej, z którego następnie, „od tyłu”, powstaje gotowy wyrób, uważane jest za nieprawidłowe. Wcześniej wtrysnięty polimer szybko tężeje i nie może już połączyć się prawidłowo z nową, cieplejszą porcją polimeru, później wprowadzonego do gniazda formy wtryskowej. Na wypraskach powstałych w taki sposób pojawiają się smugi charakteryzujące się zmniejszoną wytrzymałością mechaniczną, co wynika z niewielkiej pojemności cieplnej polimeru.

Jako prawidłowy sposób formowania kształtki uważa się taki przepływ, w którym polimer po wpłynięciu do gniazda formy wtryskowej rozplywa się na boki. Tworzy się front, który przesuwa się do przodu aż do całkowitego wypełnienia gniazda. Tak więc kształtka powstaje „od przodu”.

Od początku lat 80. wykorzystuje się programy komputerowe do analizy procesu powstawania wyprasek, szczególnie o bardziej rozwiniętych kształtach. Jednak modelowanie procesu powstawania wypraski wymaga znajomości kilkadziesiąt różnych parametrów charakteryzujących wtryskiwany materiał [5-8]. Brak znajomości wszystkich cech materiału wtryskiwanego wymaga przeprowadzenia analizy sposobu tworzenia się wypraski. Analizę taką prowadzi się metodą wizualizacyjną lub metodą krokową.

Metoda wizualizacyjna polega na filmowaniu, w czasie rzeczywistym, za pomocą szybko pracującej kamery, procesu płynięcia polimeru i tworzenia się kształtki w gnieździe formy wtryskowej. Wynikiem filmowania jest seria od kilku do kilkunastu zdjęć, poddawanych

następnie analizie. Zastosowanie metody wizualizacyjnej wymaga przygotowania specjalnej formy wtryskowej, w której ścianki wykonane są ze szkła odpornego na szokowe zmiany temperatury [1, 5, 9-12].

Metoda krokowa polega na wtryskiwaniu coraz większych porcji kompozytu do gniazda formy wtryskowej. Otrzymuje się szereg kształtek odwzorowujących poszczególne etapy powstawania wyrobu [13, 14]. Wytworzone w ten sposób wypraski można poddać szczegółowym badaniom. Zaletą tej metody w stosunku do metody wizualizacyjnej jest możliwość przeprowadzania badania na dowolnej formie wtryskowej.

W przypadku wtryskiwania kompozytów o wysokim napełnieniu polimeru proszkiem obserwowany jest przepływ strumieniowy wynikający ze znacznej lepkości kompozytu [9, 11, 12, 15]. Powstaje elastyczny pręt, który w większym lub mniejszym stopniu ulega deformacji, tworząc gotową wypraskę. A zatem proces powstawania kształtek z wysoko napełnianych kompozytów przebiega odmiennie niż formowanie się kształtek z polimerów.

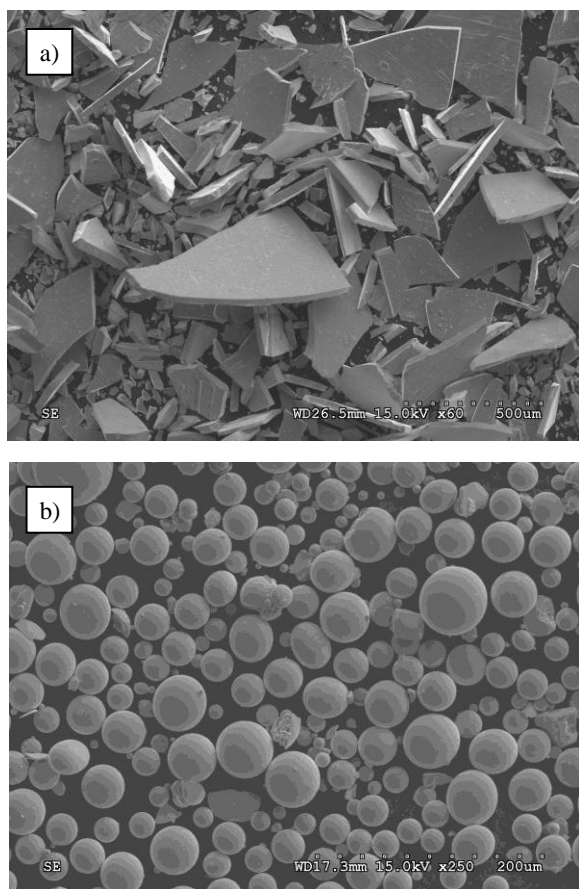
CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Prezentowana praca dotyczy określenia sposobu formowania wyprasek z kompozytów o osnowie polimerowej. Fazę funkcjonalną stanowi proszek metalowy. Jego właściwości użytkowe będą decydować o właściwościach, a więc o zastosowaniach wytworzonych wyprasek. Fazę wiążącą stanowi polimer termoplastyczny.

W celu podwyższenia właściwości użytkowych lub nadania nowych do polimeru wprowadza się odpowiednie materiały w postaci proszków lub włókien. Na ogół dąży się do określenia minimalnej ilości wprowadzonego do polimeru napełniacza dla uzyskania wymaganych właściwości. Odmiennie podejście musi mieć miejsce w przypadku kompozytów funkcjonalnych, w których najważniejsze są właściwości materiału napełniającego. W tym przypadku zadaniem polimeru jest umożliwienie wykonania wypraski metodą wtryskiwania, a następnie zapewnienie zachowania kształtów nadanych w procesie wytwórczym. Takimi materiałami są, na przykład, magnetodielektryki. W tych przypadkach dąży się do jak

największego napełnienia kompozytów, gdyż właściwości użytkowe wyrobów zależą od jego ilości. Maksymalna wielkość napełnienia ograniczona jest zachowaniem podatności kompozytu do wtryskiwania. Przekroczenie tej granicy powoduje tak znaczny wzrost jego lepkości, że traci on tę zdolność.

W niniejszej pracy wykorzystano metodę krokową do badania sposobu formowania wyprasek z kompozytów polimerowych zawierających znaczne ilości proszku metalowego. W badaniu zastosowano proszek o cechach magnetycznie twardej wytwarzany ze stopu typu Nd-Fe-B o płatkowym i kulistym kształcie cząstek, których obrazy przedstawiono na rysunku 1. Proszek płatkowy zawiera znaczną ilość cząstek grubych, a proszek kulisty cząstek drobnych.



Rys. 1. Obrazy proszków o płatkowym (a) i kulistym (b) kształcie cząstek
Fig. 1. Image of flaky (a) and spherical (b) shape particles

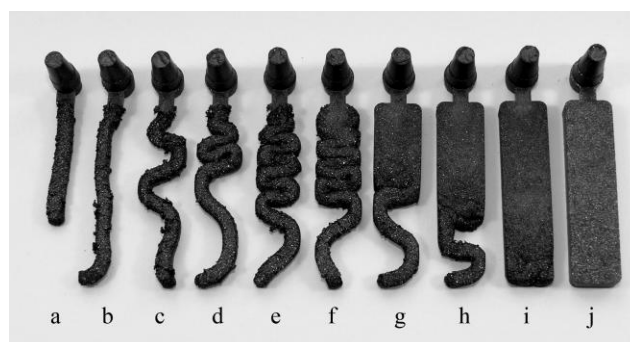
Osnowę polimerową kompozytów stanowił polistyren. Dla proszku płatkowego maksymalna wielkość napełnienia kompozytów nie przekraczała 54% objętościowo, a dla proszku kulistego dochodziła do 64%. Na maksymalną wielkość napełnienia wpływała również wielkość cząstek, szczególnie proszku płatkowego.

Kształtki wytwarzano przy ustalonych wartościach parametrów przetwórczych. Materiały kompozytowe podgrzewano w cylindrze wtryskarki do temperatury 200°C, a następnie wtryskiwano pod ciśnieniem 110 MPa. Na rysunku 2 przedstawiono obrazy kształtek w postaci pro-

stopadłościennej belki o wymiarach: 10×4×40 mm wytworzonych metodą krokową z kompozytu zawierającego proszek płatkowy.

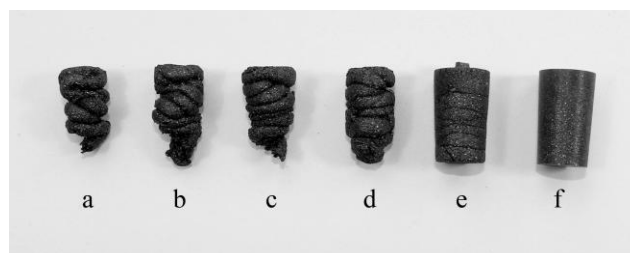
W początkowym etapie wtryskiwania tworzy się elastyczny pręt (rys. 2a). Po dotarciu do przeciwległej ścianki gniazda formy pręt ulega zagięciu (rys. 2b), a następnie coraz większemu wyginaniu, dochodząc do bocznych ścianek gniazda (rys. 2c-e). Następuje stopniowe wypełnianie gniazda formy od strony wejścia kanału doprowadzającego (rys. 2e, f), gdyż nowa masa jest bardziej podatna na odkształcenia niż masa wcześniej wtrysnięta. Kolejne, wpływające do gniazda formy porcje masy powodują formowanie się kształtki w kierunku zgodnym z kierunkiem wtryskiwania (rys. 2g-i). W końcowym etapie powstawania kształtki następuje dokładne wypełnienie całego gniazda formy, gdyż rozwijane jest wtedy maksymalne ciśnienie w formie. Wytworzona wypraska ma powierzchnię gładką i nie wykazuje śladów łączenia się poszczególnych fragmentów masy ze sobą. W podobny sposób formowana jest kształtka z kompozytu zawierającego proszek kulisty.

Metodę krokową zastosowano również do analizy procesu formowania próbek otrzymanych podczas wtryskiwania kompozytu przez przewężkę usytuowaną w osi próbki walcowej o średnicy 10 mm i wysokości 17 mm. Obrazy próbek otrzymanych wtryskiwaniem coraz większych porcji kompozytu przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Etapy formowania kształtek w postaci prostopadłościennej belki otrzymanych metodą krokową z kompozytu zawierającego proszek płatkowy; $T_w = 200^\circ\text{C}$, $p_w = 110\text{ MPa}$

Fig. 2. Stages of the sample formation in the form of rectangular beams obtained by the stepwise method from the composite containing flaky powder; $T_w = 200^\circ\text{C}$, $p_w = 110\text{ MPa}$



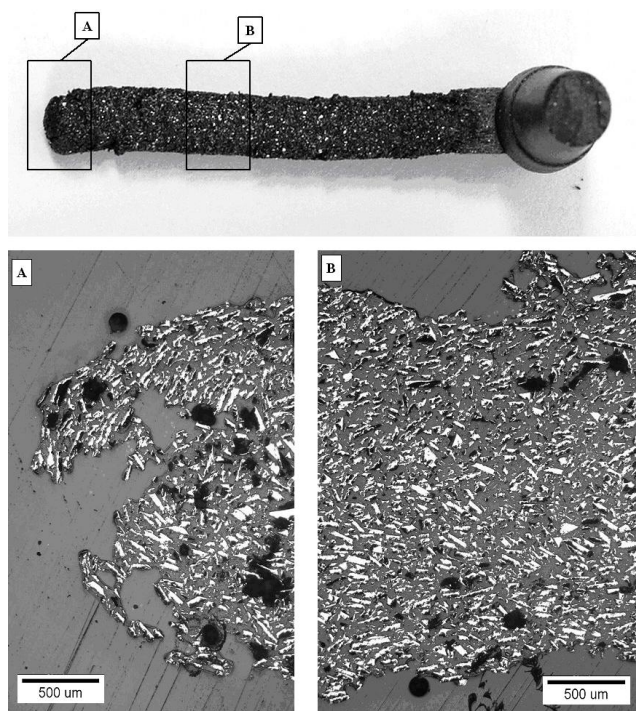
Rys. 3. Etapy formowania kształtek w postaci walca otrzymane metodą krokową z kompozytu napełnionego proszkiem płatkowym; $T_w = 200^\circ\text{C}$, $p_w = 110\text{ MPa}$

Fig. 3. Stages of the sample formation in the form of a cylinder obtained by the stepwise method from the composite filled with flaky powder; $T_w = 200^\circ\text{C}$, $p_w = 110\text{ MPa}$

Przebieg powstawania próbki walcowej (rys. 3) zbliżony jest do sposobu formowania próbki w postaci belki (rys. 2). Różnica polega na tym, że belki powstają z pręta kompozytowego wyginającego się praktycznie w jednej płaszczyźnie, zaś próbka walcowa formuje się z pręta skręcającego się przestrzennie.

Proszek metalowy przyczynia się do znacznego zwiększenia lepkości kompozytu w stosunku do lepkości polimerowej osnowy, co powoduje, że elastyczna masa kompozytu nie rozplywa się natychmiast po wpłynięciu do gniazda formy wtryskowej, jak to ma miejsce w przypadku wtryskiwania polimeru. Dzięki temu, że pojemność cieplna proszku jest znacznie większa niż polimeru, spadek temperatury kompozytu nie jest tak szybki i pozostaje on dłuższy czas w stanie plastyczno-płynnym. Dlatego łączące się między sobą poszczególne porcje kompozytu zlewają się w całość. Nie powstają nawet najmniejsze ślady łączenia się poszczególnych porcji kompozytu, co w rezultacie prowadzi do wytwarzania prawidłowych wyprasek.

Na rysunku 4 przedstawiono obraz kształtki powstałej w pierwszym etapie wtryskiwania z kompozytu zawierającego proszek płatkowy (rys. 2a) oraz obrazy osiowych przekrojów przedniej (rys. 4A) i środkowej (rys. 4B) części formującego się pręta. Powierzchnie kształtek z pośrednich etapów wtryskiwania nie są gładkie. Front kształtki jest wyraźnie postrzępiony, a powierzchnie boczne są pokryte gruzelkami. Większe gruzelki występują w kształtkach zawierających proszek płatkowy niż proszek kulisty.

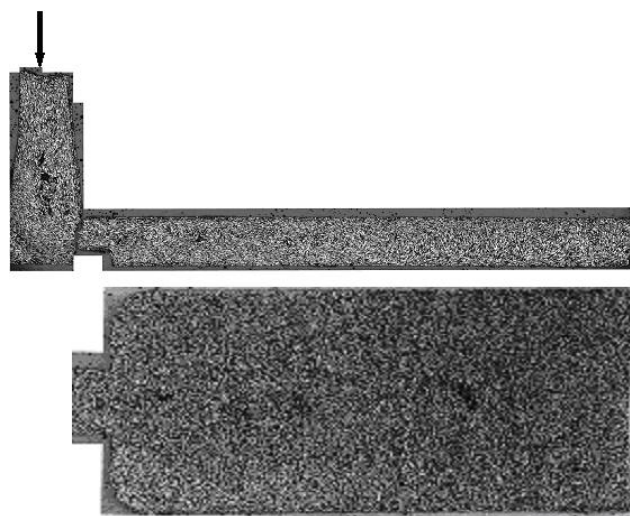


Rys. 4. Obraz kształtki otrzymanej z wtryskiwania najmniejszej ilości kompozytu zawierającego proszek płatkowy oraz obrazy przekroju czołowej (A) i środkowej (B) części kształtki

Fig. 4. Image of the sample obtained by injection the smallest bath of composite containing flaky powder and the cross-sectional images of the frontal (A) and central (B) parts of the sample

Gruzelki tworzone są z płatków proszku otoczonych polimerową osnową. Rysunek pokazuje sposób układania się płatków proszku podczas wtryskiwania. Płatki nie układają się zgodnie z kierunkiem płynięcia wtryskiwanej masy kompozytowej, a przyjmują przypadkowe położenie. Prowadzi to do powstawania produktu o izotropowych właściwościach użytkowych.

Na rysunku 5 przedstawiono obraz przekroju osiowego oraz obraz przekroju wykonanego w połowie wysokości kształtki składającej się z prostopadłościennych próbek i zastygłego w kanale doprowadzającym kompozytu stanowiącego odpad. Strzałką zaznaczono kierunek wtryskiwania masy kompozytowej do formy wtryskowej. Przedstawiony obraz pokazuje przypadkowe ułożenie płatków w kształtce.



Rys. 5. Przekroje próbki wraz z odwzorowanym kształtem kanału doprowadzającego z kompozytu zawierającego proszek płatkowy

Fig. 5. Cross-sections of the sample with sprue replica from the composite with flaky powder

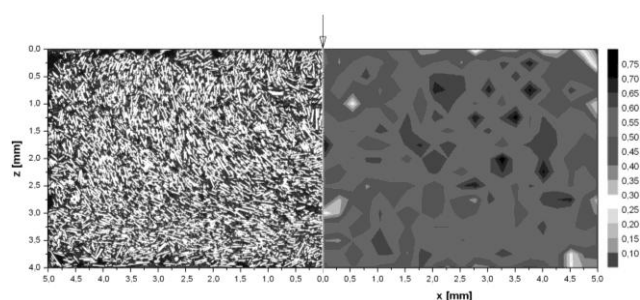
Badaniom budowy wewnętrznej poddano niskie próbki walcowe o średnicy 10 mm i wysokości 4 mm. Badania te przeprowadzono na obrazach zglądów metalograficznych przekrojów osiowych, wykorzystując do tego celu komputerową analizę obrazu. W badaniu zastosowano specjalistyczny program Metllo 9.0b. Na rysunku 6 przedstawiono wybrany obraz powierzchni zglądu metalograficznego próbki zawierającej proszek płatkowy. Strzałką zaznaczone jest miejsce wtryskiwania kompozytu do formy wtryskowej.

Lewa strona przedstawia obraz mikrostruktury, a strona prawa obraz mapy strukturalnej, na którym odmiennym stopniem szarości zaznaczono lokalny udział proszku. Po prawej stronie mapy strukturalnej umieszczony jest zestaw stopni szarości wraz z odpowiadającymi im wartościami udziału proszku.

Analiza rozkładu cząstek proszku na powierzchni przekroju pokazuje, że jest on względnie równomierny, dowodząc do prawidłowego przygotowania kompozytu.

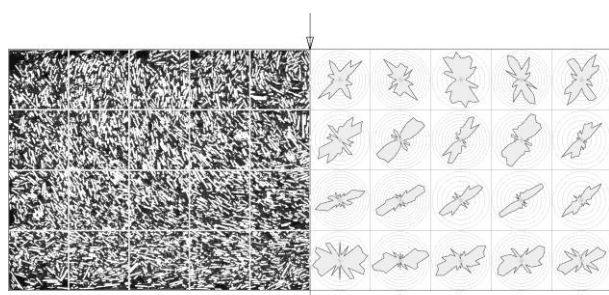
Dla próbki z proszkiem płatkowym zostały określone dominujące kierunki układania się płatków na zaznaczo-

nych na rysunku obszarach. Otrzymane wyniki zostały przedstawione na rysunku 7.



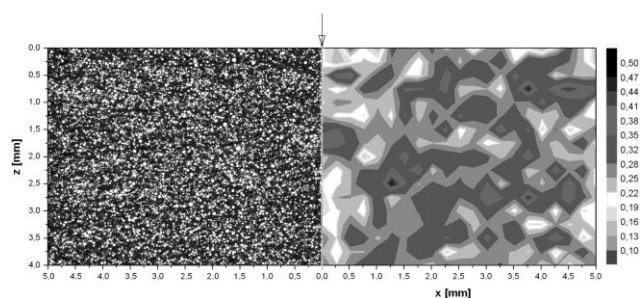
Rys. 6. Obraz powierzchni przekroju próbki z proszkiem płatkowym; $T_w = 200^\circ\text{C}$ i $p_w = 110$ MPa. Lewa strona pokazuje obraz mikrostruktury, a strona prawa mapę strukturalną; strzałką zaznaczono miejsce wtryskiwania kompozytu

Fig. 6. Image of the cross-section of the sample with of the flaky powder; $T_w = 200^\circ\text{C}$ and $p_w = 110$ MPa. The left side shows a picture of the microstructure and the right side shows of the structural map; arrow indicates point of injection of composite



Rys. 7. Obraz powierzchni przekroju próbki z proszkiem płatkowym; $T_w = 200^\circ\text{C}$ i $p_w = 110$ MPa. Lewa strona pokazuje obraz mikrostruktury, podzielony na analizowane obszary, a strona prawa obraz rozkładu kierunków układania się płatków; strzałką zaznaczono miejsce wtryskiwania kompozytu

Fig. 7. Image of the cross-section of the sample with the flaky powder; $T_w = 200^\circ\text{C}$ and $p_w = 110$ MPa. The left side shows the picture of the microstructure divided into small analyzed areas, the right side shows main directions of flakes arrangement; arrow indicates point of injection of composites



Rys. 8. Obraz powierzchni przekroju próbki z proszkiem kulistym; $T_w = 200^\circ\text{C}$ i $p_w = 110$ MPa. Lewa strona pokazuje obraz mikrostruktury, a strona prawa mapę strukturalną; strzałką zaznaczono miejsce wtryskiwania kompozytu

Fig. 8. Image of the cross-section of the sample with of the spherical powder; $T_w = 200^\circ\text{C}$ and $p_w = 110$ MPa. The left side shows a picture of the microstructure and the right side of the structural map; arrow indicates point of injection of composite

Większościowe kierunki układania się płatków wskazują na sposób płynięcia kompozytu podczas wtryskiwania. Zgodnie z oboma obrazami płatki układają się

w sposób przypadkowy. Występujące lokalne zwiększenie lub zmniejszenie koncentracji napełniacza są na tyle niewielkie, że nie wpływają w sposób znaczący na izotropowość właściwości użytkowych wyprasek.

Podobne badania przeprowadzono dla próbek z proszkiem kulistym, a wyniki zostały przedstawione na rysunku 8. Również w tym przypadku rozłożenie cząstek jest równomierne.

PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki badań wykazały, że proces formowania wyprasek z kompozytów o dużej zawartości proszku metalowego jest odmienny w stosunku do sposobu formowania kształtek z polimeru termoplastycznego. Tworzenie się pręta z kompozytu podczas wtryskiwania jest prawidłowe. Taki sposób formowania kształtki wynika ze znacznej lepkości materiału. Dzięki dużej pojemności cieplnej nie stygnie on tak szybko, jak to ma miejsce przy wtryskiwaniu polimeru, co powoduje, że późniejsze łączenie się między sobą poszczególnych porcji kompozytu jest skuteczne i zachodzi całkowicie, tworząc jednolitą wypraskę. Stwierdzono również, że metodą wtryskiwania można wytwarzać kształtki o właściwościach izotropowych.

LITERATURA

- [1] Najmi L. A., Lee D., Application of mold filling simulation to gate location optimization in powder injection molding, Department of Mechanical Engineering, Aeronautical Engineering and Mechanics Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York 12180-359, 95-103.
- [2] Smorawiński A., Technologia wtrysku, WNT, Warszawa 1989.
- [3] Smorawiński A., Wtrysk elastomerów, PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Wydawnictwo Przemysłowe WEMA, Warszawa 2001.
- [4] Zawistowski H., Frenkler D., Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych, WNT, Warszawa 1984.
- [5] Fox R.T., Lee D., Simulation of the mold cooling process in powder injection molding, Advances in Powder Metallurgy, 1991, 105-117.
- [6] Kwiatkowski D., Nabiałek J., Komputerowe symulacje procesu wtryskiwania kompozytów polimerowych, Kompozyty (Composites) 2005, 5, 4, 93-95.
- [7] Kwiatkowski D., Nabiałek J., Komputerowe symulacje procesu wtryskiwania próbek do badania odporności na pęknięcie, Kompozyty (Composites) 2006, 6, 4, 75-78.
- [8] Suri P., German R.M., de Souza J.P., Park S.J., Numerical analysis of filling stage during powder injection moulding: effects of feedstock rheology and mixing conditions, Powder Metallurgy 2004, 47, 2, 137-143.
- [9] Dvorak P., Barriere T., Gelin J.C., Jetting in metal injection moulding of 316L stainless steel, Powder Metallurgy 2005, 48, 3, 254-260.

- [10] Nabałek J., Kwiatkowski D., Badania symulacyjne i wizualizacyjne przepływu kompozytu polipropylenu z talkiem w procesie przetwórstwa metodą wtryskiwania, *Kompozyty (Composites)* 2006, 6, 4, 79-82.
- [11] Piccirillo N., Lee D., Jetting in powder injection molding, 1991 PM Conference and Exhibition, USA, *Advances in Powder Metallurgy* 1991, 2, 119-125.
- [12] Piccirillo N., Lee D., Jetting phenomenon in powder injection molding, *The International Journal of Powder Metallurgy* 1992, 28, 1, 13-25.
- [13] Bociąga E., Jaruga T., Badania mikroskopowe przepływu tworzywa w kanałach 16-gniazdowej formy wtryskowej, *Polimery* 2006, 51, 11-12, 843-851.
- [14] Bociąga E., Doświadczalne metody badania przepływu tworzywa w kanałach form wtryskowych, *Polimery* 2007, 52, 3, 170-178.
- [15] Rodriguez-Senin E., Várez A., Levenfeld B., Torralba J.M., París M.A., Processing of Mn-Zn ferrites using mould casting with acrylic thermosetting binder, *Powder Metallurgy* 2005, 48, 3, 249-253.