

Piotr ZIMNIAK

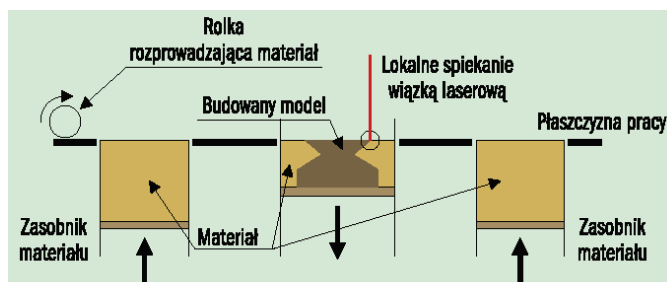
**BADANIE ANIZOTROPII *IN SITU* W PROCESIE
SELEKTYWNEGO SPIEKANIA LASEREM
PROSZKÓW TWORZYW PA12-CF**

Streszczenie: W pracy omówiono podstawy laserowego, selektywnego spiekania proszkowego tworzywa polimerowego jako jednej z wiodących technologii przyrostowego wytwarzania modeli użytkowych i prototypów. Wadą techniki SLS jest zjawisko anizotropii, wynikające z mechanizmu nakładania kolejnych warstw za pomocą narzędzia rozprowadzającego tworzywo proszkowe, kompozytu na bazie poliamidu 12 z dodatkiem włókien węglowych PA12-CF, tj. klingi lub walca, co istotnie wpływa na właściwości mechaniczne uzyskanych wyrobów. W dalszej części pracy opisano unikatowe stanowisko badawcze do nakładania tworzywa proszkowego oraz zaproponowano odpowiednią metodę analizy obrazu, pomocną w zakresie wyznaczenia ukierunkowania włókien tworzywa proszkowego PA12-CF w ujęciu ilościowym i jakościowym.

Słowa kluczowe: selektywne spiekanie laserowe, tworzywo proszkowe PA12-CF, analiza obrazu, ukierunkowanie włókien

1. WPROWADZENIE

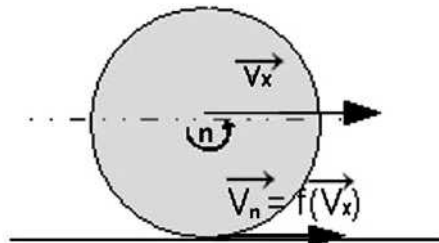
Selektywne spiekanie laserowe proszków jest jedną z wiodących technologii przyrostowego wytwarzania modeli użytkowych i prototypów [1, 3, 10]. Na przestrzeni ostatnich lat nastąpił dynamiczny rozwój stosowanych materiałów i urządzeń [6, 9]. Światowe firmy w branży szybkiego prototypowania, np. 3DSystems, EOS wprowadzają każdego roku nowy rodzaj tworzywa lub nową maszynę [1, 2, 13]. Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy typowego urządzenia do spiekania laserowego z ważniejszymi jego elementami, niezbędnymi do realizacji spiekania tworzyw polimerowych.



Rys. 1. Schemat ideowy urządzenia (wg 3DSystems) do procesu spiekania tworzyw metodą SLS [19]

Fig. 1. The scheme of the device for Selective Laser Sintering (SLS) method [19]

System walcowy stosowany w maszynach firmy 3DSystems został opracowany i opatentowany przez firmę DTM. Podstawowym elementem konstrukcyjnym tego rozwiązania jest wałek, którego zadaniem jest naniesienie równomiernej warstwy proszku o określonej grubości, zależnej od stosowanego materiału i technologii. Cechą charakterystyczną tego rozwiązania jest kinematyka ruchów walca, polegająca na złożeniu ruchu obrotowego i postępowego walca (rys. 2). Istotnym i jednocześnie chronionym patentem tego rozwiązania jest przeciwbieżność ruchu obrotowego w stosunku do ruchu postępowego. Taki układ pozwala na uzyskanie luźnej struktury materiału o stałej gęstości nasypowej i nie powoduje jego ubijania (zagęszczania) podczas nakładania (nanoszenia), co ma istotny wpływ na właściwy przebieg procesu spiekania [7, 9, 16].



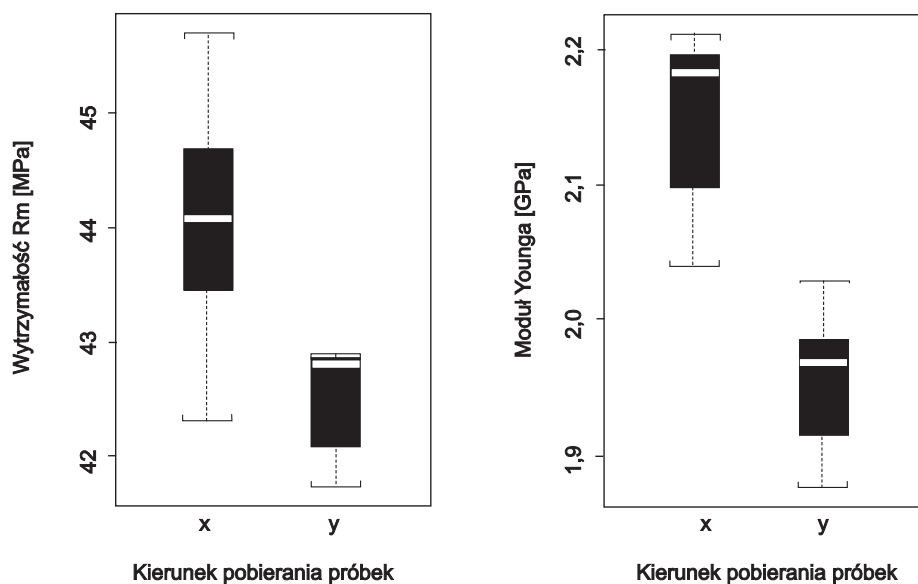
Rys. 2. Rodzaje ruchów walca nakładającego warstwy proszku poliamidowego (opracowanie własne)

Fig. 2. Movements of the PA powder overlaying roll (own study)

Istotną niedogodnością techniki SLS jest zjawisko anizotropii, wynikające z mechanizmu nakładania kolejnych warstw za pomocą narzędzia rozprzodającego tworzywo proszkowe (klingi lub walca), co przekłada się na właściwości mechaniczne uzyskanych wyrobów. Z analizy literatury wynika, że występują znaczne różnice, np. wartości wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga wyznaczone w kierunku osi x i y . Na rysunku 3 pokazano wartości obu parametrów w zależności od kierunku pobierania próbek [4, 5]. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono rezultaty badań E. Riva i in. [11], dotyczące oceny anizotropii poprzez porównanie wytrzymałości na rozciąganie, w zależności od kierunku pobierania próbek dla kąta: 0° , 45° i 90° . Najkorzystniejsze rezultaty uzyskano dla próbek pobieranych przy kącie 0° , tj. w kierunku ruchu walca, a najgorsze rezultaty otrzymano dla próbek pobieranych przy kącie 90° , tj. w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu walca (x). Zjawisko anizotropii właściwości komplikuje się przy spiekaniu proszków z napełniaczem włóknistym.

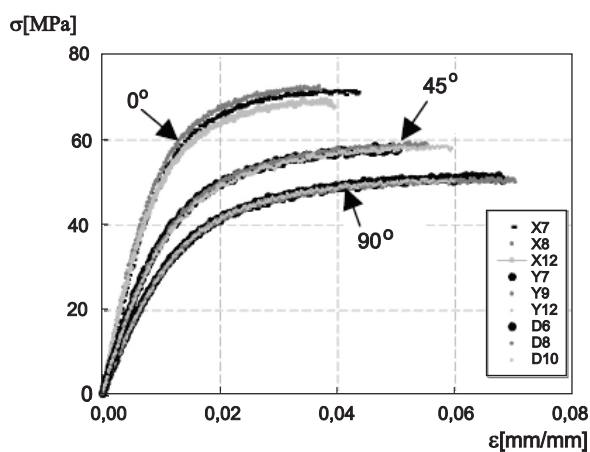
Cel opracowania: Zakładając, że kierunek ułożenia włókien decyduje o właściwościach mechanicznych i przetwórczych wytworów, dla osiągnięcia celu pracy sformułowano problem w postaci pytania: jakie cechy geometryczne i warunki ruchu walca zasilającego przestrzeń roboczą drukarki 3D proszkiem polimerowym z napełniaczem włóknistym są niezbędne dla zmniejszenia anizotropii właściwości mechanicznych i przetwórczych produktu otrzymanego w technologii SLS?

W celu przeprowadzenia takich badań zastosowano analizę obrazu struktury proszku polimerowego z napelniaczem włóknistym *in situ*.



Rys. 3. Wpływ kierunku pobierania próbek (PA12 + włókno szklane) na wytrzymałość na rozciąganie R_m i Moduł Younga E [5]

Fig. 3. Influence of the sampling (PA12+GF) on tensile strength R_m and elasticity modulus E [5]

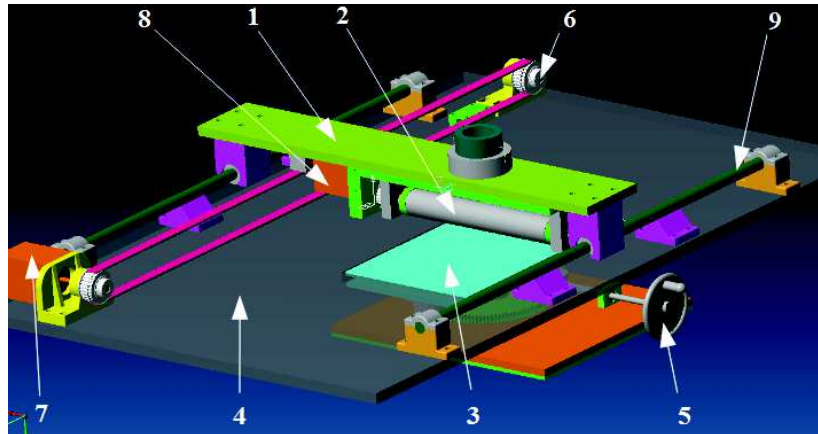


Rys. 4. Wpływ kierunku pobierania próbek (PA12+włókno CF) na wytrzymałość na rozciąganie [11]
 Fig. 4. Influence of the sampling (PA12+CF) on tensile strength R_m and elasticity modulus E [11]

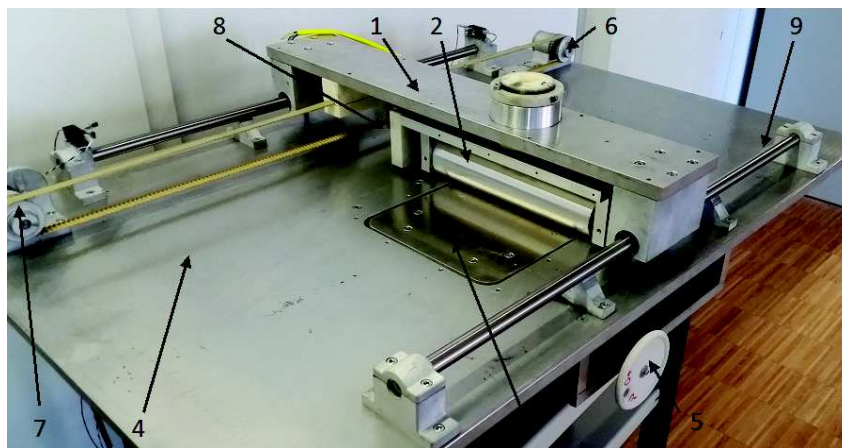
2. BADANIE STRUKTURY WSADU PROSZKU PA12-CF

Poniżej zostały opisane najważniejsze etapy realizacji badań w zakresie wyznaczenia pochylenia (ukierunkowania) włókien węglowych podczas nakła-

dania tworzywa proszkowego PA12-CF w procesie SLS . Badania zostały przeprowadzone na specjalnie zaprojektowanym (rys. 5) i wykonanym stanowisku badawczym (rys. 6), pozwalającym na realizację badań wpływu cech geometrycznych i ruchowych walca będącego elementem rozpraszającym materiał proszkowy z napełniaczem włóknistym, tj. PA12-CF.



Rys. 5. Model wirtualny stanowiska badawczego: 1 – zespół jezdny walca, 2 – zespół walca, 3 – ruchowa platforma robocza, 4 – stół stały, 5 – zespół nastawy grubości nakładanej warstwy, 6 – zespół napędowy układu jezdnego walca, 7 – silnik napędowy układu jezdnego walca, 8 – silnik napędowy walca, 9 – prowadnica układu jezdnego walca (opracowanie własne)
 Fig. 5. Virtual model of the test stand: 1 – roll traverse assembly, 2 – roll assembly, 3 – movable working platform, 4 – stationary table, 5 – assembly for adjusting overlaid layer thickness, 6 – drive assembly of the roll traverse system, 7 – drive motor of the roll traverse system, 8 – motor of the roll drive, 9 – guide of the roll traverse system (own study)

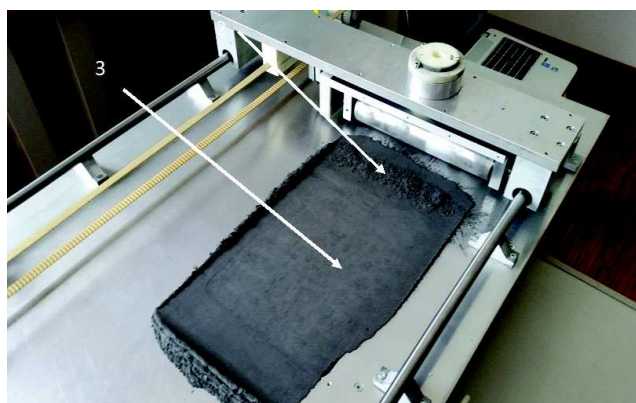


Rys. 6. Widok ogólny, zasadniczej części stanowiska badawczego (opracowanie własne), (oznaczenia zgodne z opisem na rys. 5)
 Fig. 6. General view of the basic part of the test stand (own study), (denotations after fig. 5)

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane w taki sposób, aby nakładanie poszczególnych warstw tworzywa polimerowego przebiegało w warunkach zbliżonych do przemysłowych. Dotyczy to zwłaszcza długości drogi, prędkości, przyspieszeń oraz wymiarów walca. W warunkach przemysłowych walcowi nadawany jest jednocześnie ruch obrotowy przeciwbieżny i ruch prostoliniowy zespołu jezdnych wałków – rysunek 2.

Prędkość wypadkowa jest „złożeniem” składowej prędkości liniowej v_x oraz prędkości obwodowej v_n , będącej funkcją prędkości obrotowej n . W obiekcie rzeczywistym kierunek i zwrot obu prędkości jest jednakowy. Prędkość wypadkowa jest sumą wektorów $v_{wyp} = v_x + v_n$. Kierunek i zwrot wektora prędkości wypadkowej jest zgodny z kierunkiem i zwrotem wektora v_x . W odróżnieniu od obiektu rzeczywistego na stanowisku badawczym zastosowano dwa niezależne napędy (nadające walcowi ruch obrotowy przeciwbieżny i ruch prostoliniowy zespołu jezdnych wałków), dające duże możliwości przy doborze poszczególnych prędkości składowych.

Po przygotowaniu (dozowaniu) odpowiedniej ilości materiału następuje nałożenie kolejnej warstwy proszku kompozytowego za pomocą walca o określonej średnicy i strukturze geometrycznej powierzchni oraz badanych prędkościach v_x oraz v_n . – rysunek 7.



Rys. 7. Widok ogólny nałożonej warstwy tworzywa proszkowego PA12-CF: 2 – porcja tworzywa przygotowana do nakładania kolejnej warstwy, 3 – nałożona warstwa (opracowanie własne)

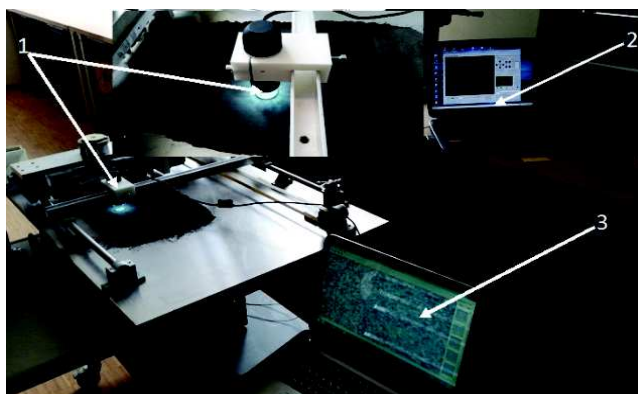
Fig. 7. General view of the overlaid powder layer PA12-CF: 2 – portion ready for overlay the successive layer of the material (own study)

Do pobrania materiału fotograficznego zastosowano kamerę cyfrową USB firmy DNT DigiMicro Profi (rys. 8), która pozwala na wykonanie fotografii w dwóch zakresach: 20x oraz 200x – krotnym powiększeniem w rozdzielczości od 1,3 do 5 Megapixeli. Wymiary rzeczywiste rejestrowanych obrazów wynoszą $2,5 \times 2,5$ mm.

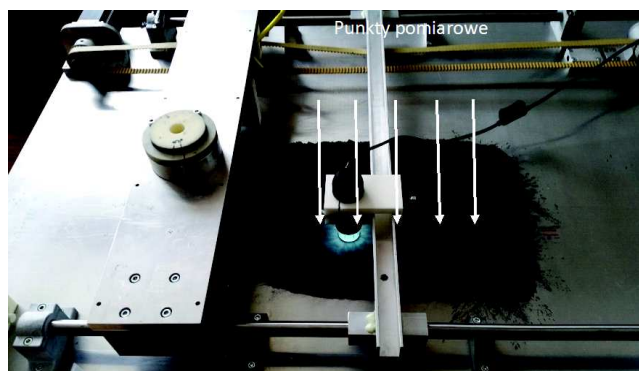
Kamera została ustawiona w osi wzdłużnej platformy roboczej (rys. 9), dla każdej nakładanej warstwy wykonano po 5 zdjęć (rys. 10), które zostały poddane dalszej obróbce w programie do analizy obrazu.



Rys. 8. Widok kamery cyfrowej (opracowanie własne)
Fig. 8. The view of the digital camera (own study)



Rys. 9. Widok usytuowania kamery cyfrowej do rejestracji obrazów: 1 – kamera cyfrowa, 2 – komputer sterujący prędkościami walca i zespołu jezdneho, 3 – komputer do archiwizacji danych
Fig. 9. The view of positioning of the digital camera for registering images: 1 – digital camera, 2 – computer controlling roll and driver assembly speeds, 3 – computer for storing data

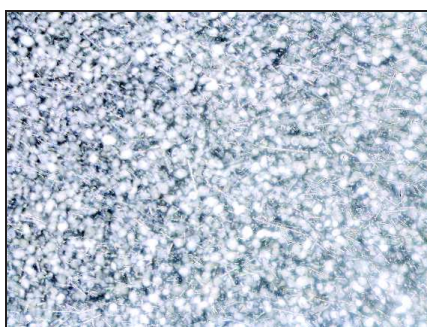


Rys. 10. Widok ogólny nałożonej warstwy tworzywa proszkowego PA12+CF z zaznaczonymi punktami rejestracji obrazów (opracowanie własne)
Fig. 10. General view of the overlaid powdered polymer layer with marked points of registering images (own study)

Analizę ilościowo-jakościową uzyskanych obrazów przeprowadzono za pomocą programu ImageJ 1.48v.

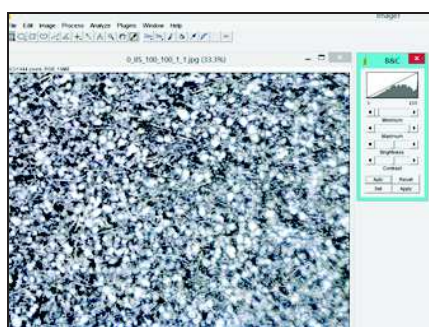
Program ImageJ 1.48v (prod. USA) pozwala na obróbkę materiału fotograficznego począwszy od obrazu oryginalnego do obrazu binarnego, tak aby w konsekwencji uzyskać charakterystyki ilościowo-jakościowe w zakresie ukierunkowania włókien podczas nakładania warstw tworzywa proszkowego. Poniżej zostały opisane poszczególne kroki postępowania niezbędne do wyznaczenia charakterystyk ilościowo-jakościowych.

Pierwszy krok – w pierwszej fazie (1. krok) poprawiono kontrast, wyrównano jasność do stałego poziomu dla wszystkich uzyskanych obrazów, co pozwala na zastosowanie stałych filtrów niezbędnych do przeprowadzenia analizy obrazu. Przykładowy obraz oryginalny uzyskany z kamery cyfrowej przedstawiono na rysunku 11, a na rysunku 12 podano przykład zastosowania automatycznego modułu poprawy jasności i kontrastu. Na rysunku 13 pokazano jego wygląd w wyniku wstępnej obróbki.



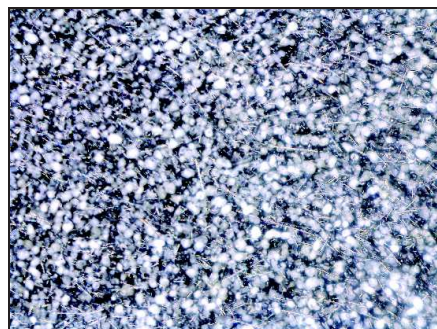
Rys. 11. Widok fotografii uzyskanej za pomocą kamery cyfrowej (opracowanie własne)

Fig. 11. The view of the photograph taken by the digital camera (own study)



Rys. 12. Zastosowanie automatycznego modułu poprawy jasności i kontrastu obrazu (opracowanie własne)

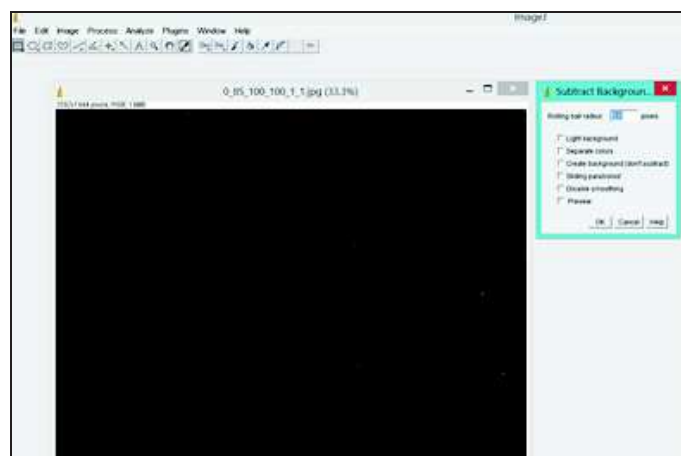
Fig. 12. Application of the automatic module for improving brightness and image contrast (own study)



Rys. 13. Wygląd próbki po wstępnej obróbce – poprawa jasności i kontrastu (opracowanie własne)

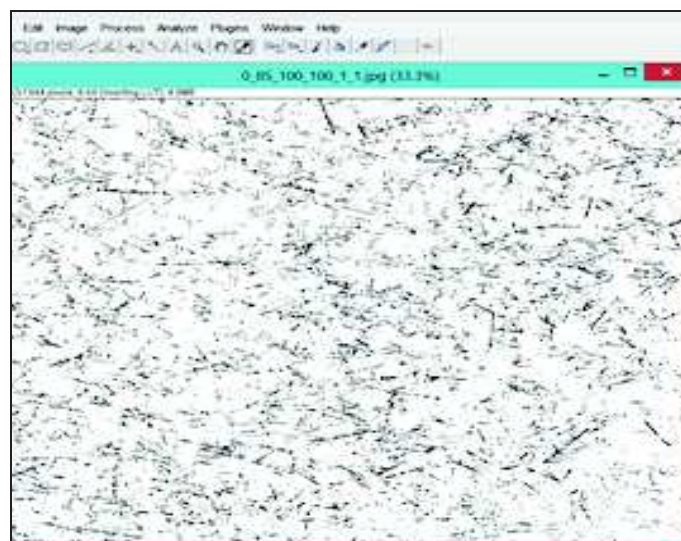
Fig. 13. The sample after preliminary processing – improvement of the brightness and contrast (own study)

Drugi krok – w kolejnej fazie (2. krok) za pomocą funkcji Subtract Background przeprowadzono eliminację elementów niebędących przedmiotem badań, a dotyczy to ziaren poliamidu, które stanowią osnowę poliamidową. Elementy osnowy zapisano jako tło (w kolorze czarnym) i przedstawiono na rysunku 14.



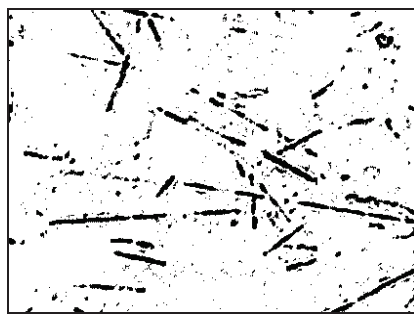
Rys. 14. Widok zapisanej osnowy poliamidowej (opracowanie własne)
Fig. 14. The view of the registered PA matrix (own study)

Trzeci krok – w trzeciej fazie (3. krok) następuje przejście do formatu binarnego (rys. 15), gdyż tylko obrazy w takim formacie można poddać analizie ilościowo-jakościowej ukierunkowania włókien.



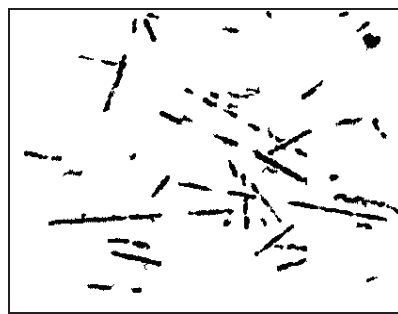
Rys. 15. Wygląd analizowanego obrazu w formacie binarnym (opracowanie własne)
Fig. 15. The view of the analyzed image in binary format (own study)

Mając do dyspozycji obraz w postaci binarnej obejmujący wszystkie elementy (rys. 16), można poddać go odpowiedniej analizie. Zdefiniowano wymiary elementów które będą przedmiotem analizy ilościowo-jakościowej, do której przyjęto elementy o powierzchni mniejszej od $(30 \text{ pixel})^2$. Przykładowy fragment obrazu z zapisem binarnym przedstawiono na rysunku 16 i 17. Natomiast na rysunku 18 przedstawiono natomiast przykładowo widok obrazu binarnego oraz rezultaty analizy ilościowej ukierunkowania liczby włókien przyporządkowanych odpowiednim kątom, w zakresie od 0° - 180° , co 5° . Rezultaty analizy ilościowej przedstawiono w formie tabelarycznej (tab. 1) oraz graficznej – na rysunkach 19 i 20, gdzie pokazano przebieg ukierunkowania włókien.



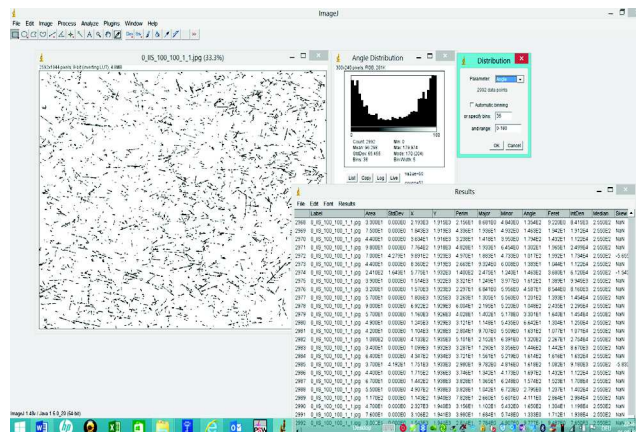
Rys. 16. Fragment obrazu z zapisem binarnym, obejmujący wszystkie elementy (opracowanie własne)

Fig. 16. Fragment of the image with binary registration comprising all elements (own study)



Rys. 17. Fragment obrazu z zapisem binarnym, obejmujący elementy o powierzchni $> 30 \text{ pixel}^2$ (opracowanie własne)

Fig. 17. Fragment of the image with binary registration comprising elements of surface $> 30 \text{ pixel}^2$ (own study)



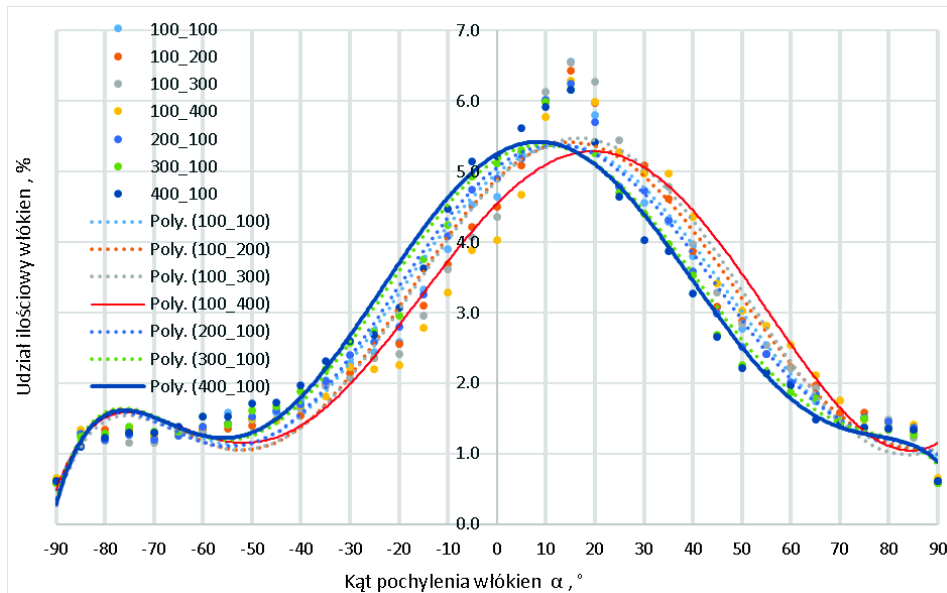
Rys. 18. Widok przykładowego obrazu binarnego oraz uzyskane rezultaty analizy ilościowej ukierunkowania liczby włókien przyporządkowanych odpowiednim kątom, w zakresie 0° - 180° , co 5° – wg tab. 1 (opracowanie własne)

Fig. 18. The view of the example of the binary image and results of the quantitative analysis of orientation of the number of fibers attributed to suitable angles within 0 - 180° each 5° – after Table 1 (own study)

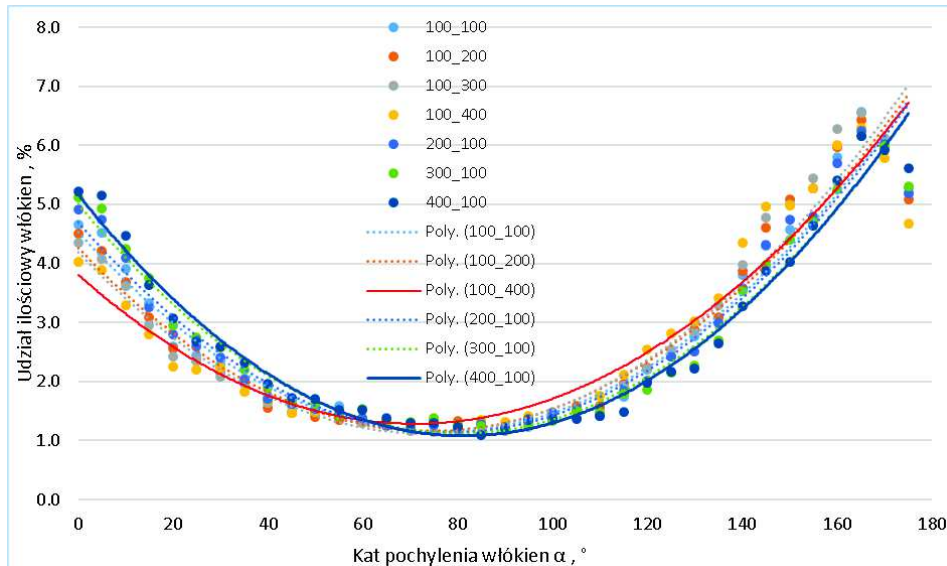
Tabela 1. Przykładowe wyniki liczby włókien w zakresie od 0° do 180° co 5°
 Table 1. The example of the results of the number of fibers within 0-180° each 5°

Kąt pochylenia α°	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
Liczba włókien	102	99	76	61	51	45	47	34	26	29	23	24	22	24	18	33	26	26	36	38	38	38	46	59	68	84	114	120	164	126	134	158	159	115	106	

Tabela przedstawia przykładowy rozkład dla jednego punktu pomiarowego, tj. jednej fotografii. W przeprowadzonych badaniach dla 5 kolejno nakładanych warstw wykonano po 5 fotografii dla każdej z nich, co łącznie daje 25 punktów pomiarowych dla jednego badanego przypadku. Poniżej przedstawiono interpretację geometryczną przykładowych wyników badań wpływu prędkości liniowej układu jezdnych walca i prędkości obrotowej walca na rozkład włókien w nakładanej warstwie materiału.



Rys. 19. Średni udział procentowy włókien w zakresie od -90 do +90° dla badanego walca, w zależności od prędkości liniowej i obwodowej walca $v_x, v_n = 100_100; 100_200; 100_300; 100_400; 200_100; 300_100; 400_100, \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
 Fig. 19. Average percent share of fibers within -90 to +90° for the tested roll depending on the linear and circumferential speed of the roll $v_x, v_n = 100_100; 100_200; 100_300; 100_400; 200_100; 300_100; 400_100, \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$



Rys. 20. Średni udział procentowy włókien w zakresie od 0° do 180° , dla badanego walca w zależności od prędkości liniowej i obwodowej walca $v_x, v_n = 100_100; 100_200; 100_300; 100_400; 200_100; 300_100; 400_100$; $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 20. Average percent share of fibers within 0 to 180° for the tested roll depending on the linear and circumferential speed of the roll $v_x, v_n = 100_100; 100_200; 100_300; 100_400; 200_100; 300_100; 400_100$, $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie badań doświadczalnych rozwiązano sformułowany problem i osiągnięto cel badań polegający na wyznaczeniu geometrycznych cech powierzchni transportującej i warunki ruchu walca, zasilającego przestrzeń roboczą drukarki 3D proszkiem polimerowym z napełniaczem włóknistym, niezbędne dla zmniejszenia (minimalizacji) anizotropii właściwości produktu otrzymanego z technologii SLS.

Dla przeprowadzenia takich badań zastosowano analizę obrazu struktury proszku polimerowego z napełniaczem włóknistym *in situ*. Przeprowadzone badania wskazują na możliwość zastosowania udoskonalonej, algorytmicznej metody analizy obrazu w celu wyznaczenia udziału ilościowego i jakościowego pochylenia włókien węglowych w stosunku do kierunku ruchu walca (x) podczas nakładania proszku tworzyw PA12-CF w procesie SLS. Metoda ta pozwala, już na wstępnym etapie badań, określić wpływ badanych czynników geometrycznych i ruchowych walca na ukierunkowanie włókien, a tym samym na minimalizację anizotropii właściwości mechanicznych i przetwórczych wyrobów wykonanych za pomocą technologii SLS.

Zastosowanie analizy obrazu na tym etapie badań pozwala na skrócenie czasu badań, jak również oszczędności materiału, którego wysoka cena ma zna-

czący wpływ na ogólny koszt badań. Pozwala pośrednio na wytypowanie preferowanej struktury geometrycznej walca i jego parametrów ruchowych.

LITERATURA

- [1] AMADO A., SCHMID M., LEVY G., WEGENER K.: Advances in SLS powder characterization Proceedings of the International Conference on Additive Manufacturing, SFF, Texas, 2011, 438-452.
- [2] CEVOLINI F.: Rapid Manufacturing with carbon reinforced plastics: applications for motor sport, aerospace and automotive small lot production parts. www.crp.it, 2011.
- [3] CHLEBUS E.: Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003, 27-38.
- [4] FLOERSHEIM R.B., HOU G., FIRESTONE K.: CFPC material characteristics and SLS prototyping process. Rapid Prototyping Journal 15 Emerald Group Publishing Limited, part 2, 2009, 339-345.
- [5] GHAZ P. ISAEIDI H.: Description of the Anisotropic Material Behaviour of Short Glass Fibre Reinforced Thermoplastics Using FEA. Master's Degree ISRN: BTH-AMT-EX/D-01-SE, 2006.
- [6] GRIESSBACH S.: Korrelation zwischen Materialzusammensetzung, Herstellungsbedingungen und Eigenschaftsprofil von lasergesinterten Polyamid-Werkstoffen. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2012.
- [7] GRIESSBACH V.: Praxis Rapid Technologien. V.G. Kunststofftechnik GmbH. Chemnitz., 2009.
- [8] KRUTH J-P., LEVY G., CRAEGHS T., YASA E.: Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering, CIRP 56(2), 2007, 730-759.
- [9] MONAMI A.: Einfluss von Materialzusammensetzung und Herstellungsbedingungen auf das Eigenschaftsprofil lasergesinterner PA12-Werkstoffe, Universität Halle-Wittenberg, 2006.
- [10] OCZOŚ K.: Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów. Mechanik 4, 2008, 217-225.
- [11] RIVA E., STOCCHI A., ZANETTI C.: Short carbon fiber reinforced polyamide: a new compound for rapid prototyping. 22nd DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, 2005.
- [12] SAUER A.: Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten. Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [13] SCHMID M., AMADO A., WEGENER K.: Materials perspective of polymers for additive manufacturing with selective laser sintering. J. Mater. Res, 29(17), 2014, 1824-1835.
- [14] SCHMID M.: Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen- Technologie, Prozesse und Werkstoffe. Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [15] WEGNER A., MIELICKI CHR., GRIMM T., GRONHOFF B., WITT G., WORTBERG J.: POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE. Determination of Robust Material Qualities and Processing Conditions for Laser Sintering of Polyamide 12. Jg. 54; 7, 2014, 1540-1554.
- [16] ZIMNIAK P.: Uzdatnianie proszku poliamidowego. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 3, 2008, 36-38.
- [17] ZIMNIAK P., ZIMNIAK J.: Kształtowanie metodami przyrostowymi modeli użytkowych z tworzyw polimerowych. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 3, 2008, 98-99.
- [18] ZIMNIAK P.: Powders and fillers used in SLS/SLM. [W:] Advanced Grinding – 25th anniversary of the comminution in Bydgoszcz, red. A. Mroziński, M. Macko, Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki Bydgoszcz, 2011.
- [19] ZIMNIAK P.: Recykulacja tworzyw stosowanych w technice przyrostowej SLS. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 5, 2010, 146-147.

STUDY OF IN SITU ANISOTROPY IN THE SELECTIVE LASER SINTERING PROCESS OF POWDER PA12-CF

Summary: The grounds of selective laser sintering (SLS) method, as one of the leading methods of rapid prototyping have been discussed in this paper. The greatest disadvantage of SLS method is anisotropy caused by mechanism of laying sequential layers using distributing tool for PA12-CF powder, i.e. a blade or a roller what may considerably influence the mechanical properties of the obtained products. Consequently this paper also describes the unique test stand for laying powdered polymer and presents the convenient method of image analysis which may help in checking behavior of reinforcing fibers in separate layers of PA12-CF polymer in the product regarding qualitative as well as quantitative aspects.

Key words: selective laser sintering (SLS), powdered polymer PA12-CF, image analysis, fiber orientation