

Otrzymywanie prototypów części chwytaka robota mobilnego z materiałów polimerowych z wykorzystaniem technologii wytwarzania przyrostowego

Cz. I. Właściwości mechaniczne i stałe materiałowe próbek z kopolimeru akrylonitryl-butadien-styren

Maciej Cader^{1), *}, Rafał Oliwa²⁾, Olimpia Markowska³⁾, Grzegorz Budzik³⁾

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.027](https://doi.org/10.14314/polimery.2017.027)

Streszczenie: Przedstawiono wyniki badań dotyczące wykorzystania technologii wytwarzania przyrostowego (FDM) w produkcji prototypów części chwytaka robota mobilnego wykonanych z modyfikowanego kopolimeru akrylonitryl-butadien-styren (ABS-M30). Oceniano wpływ rodzaju geometrii wypełnienia na właściwości mechaniczne i stałe materiałowe kształtek polimerowych. Wykonano próby wytrzymałościowe przy statycznym rozciąganiu w trzech kierunkach, z rejestracją odkształceń za pomocą szybkich kamer systemu Aramis, próbek wytwarzanych w trzech orientacjach. Wyniki porównano z danymi literaturowymi dotyczącymi kształtek wykonanych z tworzywa ABS-M30 w procesie wtryskiwania.

Słowa kluczowe: ABS, technologia FDM, szybkie prototypowanie, dynamiczna analiza obrazu, Aramis.

Producing mobile robot gripper part prototypes from polymeric materials using additive manufacturing technology. Part I. Mechanical properties and material constants of specimens from acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer

Abstract: In this work, the application of Fused Deposition Modeling for manufacturing of mobile robot gripper part prototypes from a modified copolymer of acrylonitrile, butadiene, and styrene (ABS-M30) was investigated. The effects of the type of filling geometry on the mechanical properties and material constants (such as Young's and Kirchhoff's Moduli and Poisson's ratio) of polymeric fittings were evaluated. The static tensile tests in three directions with strain registration using high speed camera system Aramis were carried out at three different sample orientations. The results were compared with literature data on the injection molded fittings made from ABS-M30.

Keywords: ABS, FDM technology, rapid prototyping, dynamic image analysis, Aramis.

Technologia FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) jest jedną z szesnastu reprezentatywnych technologii wytwarzania przyrostowego [1–16] i jednocześnie najpowszechniej stosowaną w produkcji prototypów technologią z grupy szybkiego prototypowania (ang. *Rapid Prototyping*, RP) [17–19]. Obecnie FDM stanowi 50 % ryn-

ku technologii wytwarzania przyrostowego [19]. Technologia ta polega na warstwowym nakładaniu przez dwudyszową głowicę uplastycznionych materiałów: modelowego i podporowego, wykonanego z polimeru termoplastycznego (rys. 1).

Dwudyszowa głowica sterowana numerycznie nanosi materiał na ruchomy stół opuszczany o kolejne wysokości odpowiadające grubości warstwy. Materiał jest nanoszony w jednym procesie naprzemiennie, przy czym materiał podporowy jest nakładany w miejscach, gdzie wytwarzana część nie przylega bezpośrednio do stołu modelowego (rys. 2). W ten sposób powstaje gotowa część z materiału modelowego wspieranego materiałem podporowym.

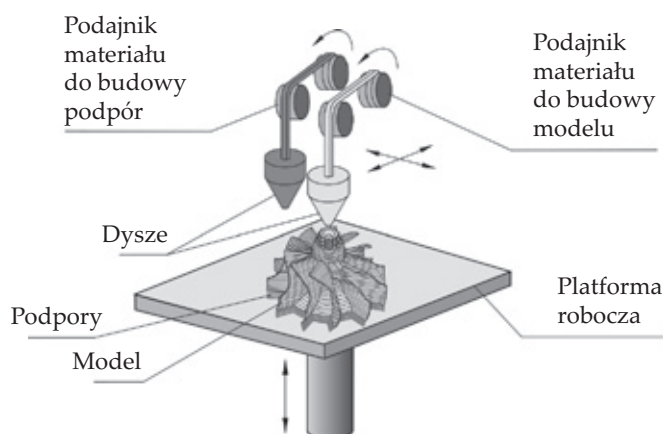
Części wytwarzane z wykorzystaniem technologii FDM, w porównaniu z elementami otrzymanymi za po-

¹⁾ Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Aleje Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa.

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Chemiczny, Katedra Technologii i Materiałoznawstwa Chemicznego, ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów.

³⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Konstrukcji Maszyn, ul. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów.

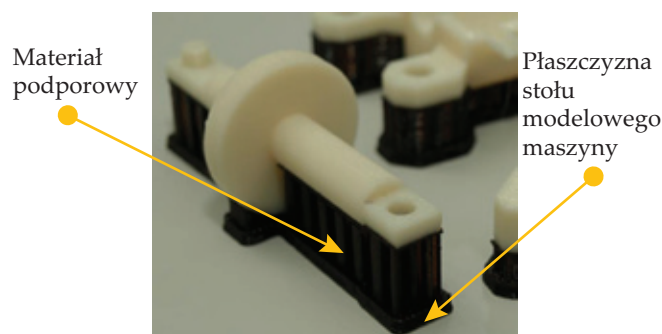
^{*} Autor do korespondencji; e-mail: mcader@piap.pl



Rys. 1. Schemat ideowy maszyny pracującej w technologii FDM
Fig. 1. Schematic diagram of FDM machine

mocą pozostałych technologii przyrostowych wykorzystujących materiały niemetalowe (polimery, żywice fotoutwardzalne, wosk), charakteryzują się relatywnie dużą wytrzymałością mechaniczną, odpornością na wysoką temperaturę (90–160 °C), niezmiennością kształtów w czasie, odpornością na działanie wody oraz dużymi możliwościami obróbki, takiej jak: obróbka skrawaniem, szlifowanie, wiercenie, galwanizacja, lakierowanie, metalizowanie [20]. Specyfika technologii FDM – budowanie modeli warstwa po warstwie – pozwala na dowolne programowanie wewnętrznego kształtu geometrycznego wytwarzanej części. Oznacza to, że użytkownik w dowolny sposób może generować kształt geometryczny wypełnienia wewnętrznego prototypów wytwarzanych przyrostowo. Dodatkowo, technologia FDM pozwala również na ingerencję mechaniczną w wewnętrzny kształt geometryczny prototypu w trakcie procesu jego otrzymywania. Mianowicie, po zatrzymaniu procesu wytwarzania na wybranej warstwie budowanego modelu jest możliwe wtapienie w warstwę wewnętrzną elementów wzmacniających: metalowej siatki, cienkich prętów, nakrętek lub tulei (zawierających gwint). Po wtopieniu wzmocnienia proces wytwarzania części można wznowić w dowolnej chwili.

Budowanie przyrostowe prototypów umożliwia ścisły dobór i zoptymalizowanie (zaprogramowanie) kształtu geometrycznego wewnętrznej części elementu maszyny, uwzględniające występujące pole obciążeń zewnętrznych, warunki pracy lub inne czynniki, np. jest możliwe minimalizowanie całkowitej masy części z zachowaniem jej pierwotnego kształtu zewnętrznego. Dzięki programowanej geometrii wewnętrznej można optymalizować prototypy tak, aby z zadaną wytrzymałością spełniały swoje założone funkcje. Masa maszyn, którą stanowi masa: osłon, korpusów, obudów także może zostać zmniejszona do wymaganego minimum, z zachowaniem założonej wytrzymałości. Projektowanie i wdrażanie tak wytwarzanych podzespołów ma bezpośrednie przełożenie na poprawę osiągnięć maszyn i na lepszą korelację wytrzymałości części z czynnikami zewnętrznymi (np. budowanie ultralekkich korpusów maszyn [15,



Rys. 2. Przykładowa część wytworzona z wykorzystaniem technologii FDM

Fig. 2. Exemplary part manufactured using FDM technology

21–23]). Reprezentatywnym, izotropowym materiałem, stosowanym w technologii FDM do produkcji modeli i prototypów, obecnie powszechnie wykorzystywanym w przemyśle, jest polimer ABS-M30 (modyfikowany akrylonitryl-butadien-styren) [24].

Celem niniejszej pracy, stanowiącej rozwinięcie badań dotyczących technologii szybkiego prototypowania [25, 26], była ocena wpływu rodzaju geometrii wypełnienia kształtek normatywnych, wykonanych z ABS-M30 z wykorzystaniem technologii FDM, na ich właściwości mechaniczne i stałe materiałowe. Wyniki porównano z danymi odpowiadającymi prototypom części chwytaka robota mobilnego.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

W badaniach wykorzystano ABS-M30 produkcji Stratasys Ltd. o właściwościach przedstawionych w tabeli 1.

Otrzymywanie kształtek

Próbki do badań laboratoryjnych wytworzono w warunkach podanych w tabeli 2 za pomocą maszyny FORTUS 400mc [24], reprezentatywnej dla technologii FDM, łączącej w sobie właściwości charakterystyczne zarówno dla drukarek 3D, jak i dla maszyn przemysłowych w dużych centrach wytwórczych pracujących w tej technologii.

T a b e l a 1. Właściwości tworzywa ABS-M30 [27]

T a b l e 1. Properties of ABS-M30 material [27]

Właściwość	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	36
Wytrzymałość na zginanie, MPa	61
Odkształcenie przy zerwaniu, %	4
Moduł Younga, MPa	2413
Współczynnik Poissona	0,34
Moduł Kirchhoffa, MPa	900
Gęstość, g/cm ³	1,04

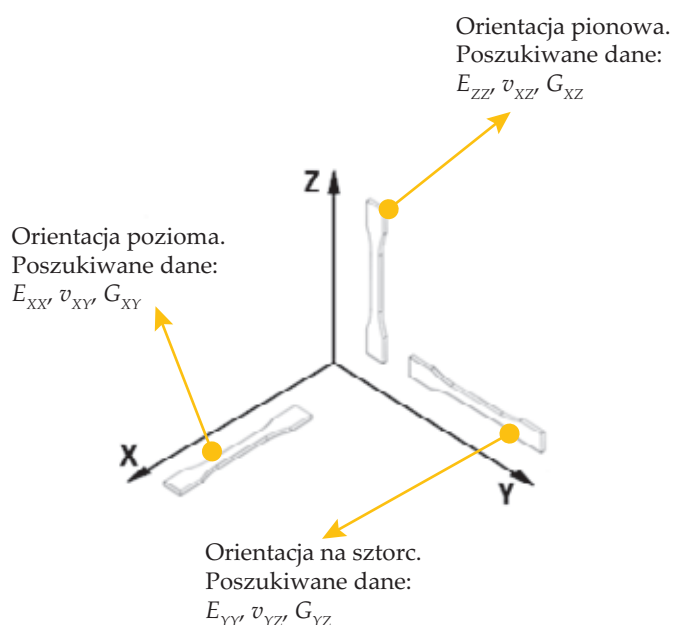
Próbki wykonano w trzech charakterystycznych orientacjach ściśle związanych z głównymi osiami maszyny, a jednocześnie głównymi kierunkami modelu ortotropowej geometrii.

Rysunek 3 przedstawia ułożenie próbek normatywnych w komorze roboczej maszyny. Oś główna pionowa Z pokrywa się z kierunkiem przyrostu modelu, czyli osią, wzdłuż której porusza się stół modelowy maszyny. Osie główne X i Y są osiami płaszczyzny poziomej

T a b e l a 2. Podstawowe dane techniczne centrum wytwórczego FORTUS 400mc

T a b l e 2. Basic technical data of FORTUS 400mc production system

Nazwa	Wartość
Wymiary komory roboczej	405 x 355 x 355 (XYZ) mm
Dokładność wytwarzania modeli	Modele wytwarzane z dokładnością bezwzględną w płaszczyźnie XY: $\pm 0,128$ mm, wzdłuż osi przyrostu: $\pm 0,038$ mm na każdy milimetr przyrostu
Temperatura tłoczenia tworzywa ABS-M30	320 °C
Temperatura w komorze podczas tłoczenia tworzywa ABS-M30	90 °C
Średnica włókna materiału ABS-M30	0,11 mm
Wysokość pojedynczej warstwy nakładanego materiału	0,11 mm



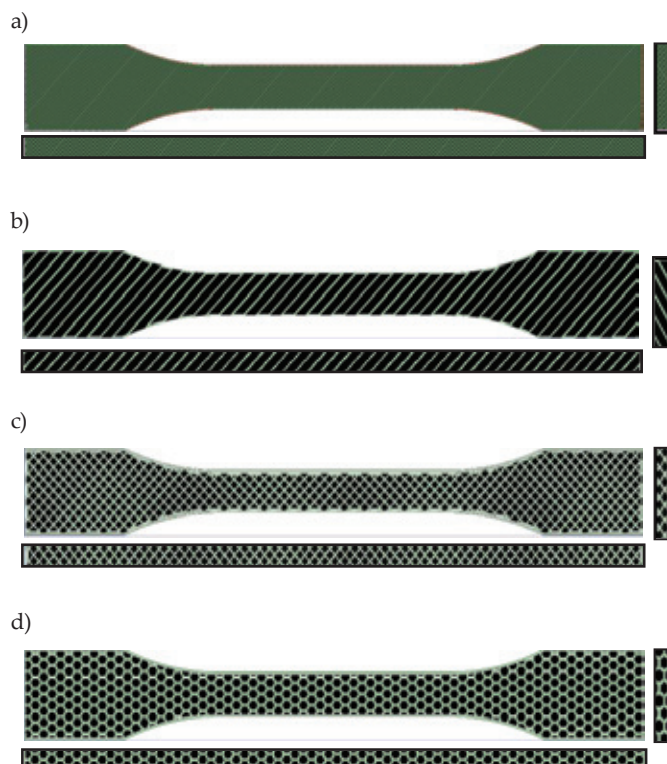
Rys. 3. Orientacja badanych próbek w komorze roboczej maszyny

Fig. 3. Orientation of the examined samples in a machine working chamber

i pokrywają się z płaszczyzną środkową pojedynczej warstwy budowanego modelu. Rysunek 4 przedstawia przekroje w płaszczyźnie X-Y próbek w trzech charakterystycznych ułożeniach: poziomo, na sztorc i pionowo.

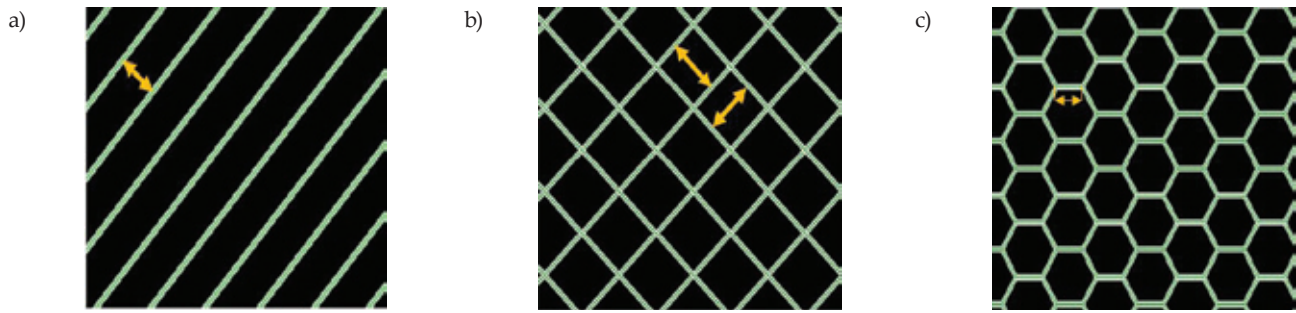
Metodyka badań

Właściwości wytrzymałościowe oraz charakterystyki materiałowe określano podczas próby jednoosiowego statycznego rozciągania próbek w kształcie wiosełek wytworzonych z ABS-M30 o wymiarach 160 x 10 x 4 mm, zgodnie z normą ISO 527-1:1998. Zastosowano maszynę wytrzymałościową typu INSTRON 5967 sprzężoną z systemem pomiarowym Aramis, sterowaną za pomocą programu Bluehill 3. System szybkich kamer umożliwiał monitorowanie deformacji próbek i wyznaczenie współczynników Poissona, definiowanych jako stosunek odkształcenia poprzecznego do odkształcenia podłużnego próbki. Próby jednoosiowego rozciągania kształtek prowadzono w stabilnych warunkach temperaturowych, w temp. 23 °C i wilgotności 55 %. Tempo obciążenia wstępnego próbki wynosiło 2 mm/min i podczas próby rosło do 3 mm/min. Jedną serię pomiarową stanowiło 5 próbek. Badane kształtki charakteryzowały cztery różne rodzaje geometrii wypełnienia: lito-włóknista, kratowa, żeberkowa oraz plastra miodu. Rozciągano próbki w trzech charakterystycznych ułożeniach: poziomo, na sztorc i pionowo (rys. 5).



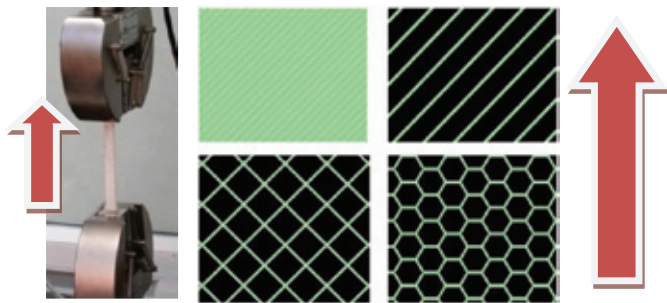
Rys. 4. Geometria wypełnienia kształtki do badań: a) lito-włóknista, b) żeberkowa, c) kratowa, d) plastra miodu

Fig. 4. Interior geometry of the specimen: a) solid-fibrous, b) sparse, c) sparse-double dense, d) honeycomb



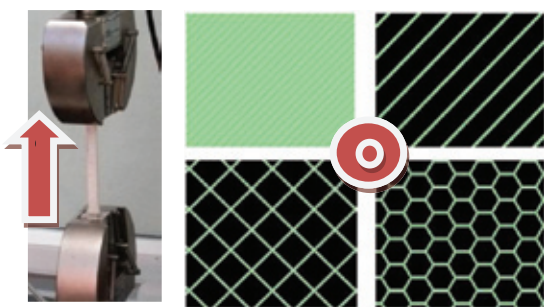
Rys. 5. Wymiar charakterystyczny (2 mm), oznaczony żółtymi strzałkami, w geometrii: a) żeberkowej, b) kratowej, c) plastra miodu
 Fig. 5. Basic dimension (2 mm) marked with yellow arrows for geometries: a) sparse, b) sparse-double dense, c) honeycomb

Kształtki do badań wytwarzano w taki sposób, aby kierunek przyłożenia siły rozciągającej w badaniach laboratoryjnych był zgodny z przedstawionym na rys. 6.



Rys. 6. Kierunek działania siły rozciągającej w odniesieniu do próbek wytwarzanych w orientacji poziomej i na sztorc
 Fig. 6. Direction of tensile force applied to the samples produced in landscape and upright orientation

W wypadku próbek wytworzonych w orientacji pionowej siła rozciągająca działała prostopadłe do geometrii wewnętrznej (rys. 7).



Rys. 7. Kierunek działania siły rozciągającej w odniesieniu do próbek wytwarzanych w orientacji pionowej
 Fig. 7. Direction of tensile force applied to the samples produced in vertical orientation

Zdjęcia uzyskane w trakcie pomiaru posłużyły również do określenia wpływu geometrii na rozkład odkształceń na powierzchni próbek. Zdjęcia przetwarzano metodą korelacji obrazu (ang. *Digital Image Correlation*, DIC [28–31]). Działanie DIC opiera się na połączeniu modelu matematycznego pozycji kamer z korelacją cyfrowego obrazu i obliczeniami triangulacyjnymi, co pozwala na precyzyj-

ne obliczenie współrzędnych wybranych punktów naniesionych na powierzchnię próbki. Na podstawie wyników monitorowania tych punktów system określał odkształcenie poprzeczne i podłużne rozciąganej powierzchni, z uwzględnieniem jej geometrii oraz teorii plastyczności. Prędkości deformacji w przestrzeni trójwymiarowej oraz wartości odkształceń zapisywano automatycznie.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

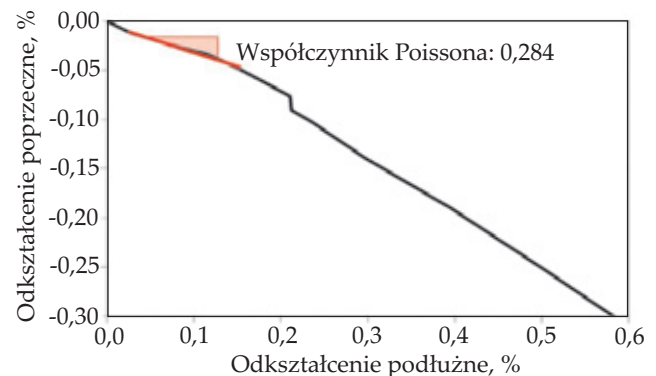
Właściwości mechaniczne i stałe materiałowe próbek

W toku badania za pomocą systemu szybkich kamer Aramis obserwowano bezpośrednio odkształcenia techniczne poprzeczne ϵ_{techB} i techniczne podłużne ϵ_{techL} badanych próbek. Współczynnik Poissona obliczano na podstawie dopasowania ujemnego nachylenia funkcji najmniejszych kwadratów do technicznego liniowego odkształcenia poprzecznego i technicznego odkształcenia podłużnego wzdłuż krzywej odkształcenia w zakresie sprężystym, co obrazuje wykres (rys. 8) wykonany na bazie dokumentacji technicznej systemu Aramis.

Moduły Kirchhoffa wyznaczano analitycznie na podstawie uogólnionego wzoru (1):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

gdzie: G – moduł Kirchhoffa, E – moduł Younga,



Rys. 8. Wyznaczanie współczynników Poissona z wykorzystaniem systemu Aramis

Fig. 8. Determination of Poisson's coefficient using Aramis system

ν – współczynnik Poissona w odniesieniu do głównych kierunków geometrii prototypów wytwarzanych z zastosowaniem technologii FDM: X, Y, Z (2).

$$\begin{aligned} G_{XY \text{ analityczne}} &= \frac{E_{XX \text{ eksperymentalne}}}{2(1 - \nu_{XY \text{ eksperymentalne}})} \\ G_{YZ \text{ analityczne}} &= \frac{E_{YY \text{ eksperymentalne}}}{2(1 - \nu_{YZ \text{ eksperymentalne}})} \\ G_{ZX \text{ analityczne}} &= \frac{E_{ZZ \text{ eksperymentalne}}}{2(1 - \nu_{ZX \text{ eksperymentalne}})} \end{aligned} \quad (2)$$

Rozciąganie próbek w orientacji poziomej

Na podstawie wyników (tabela 3) można stwierdzić, że rodzaj geometrii wewnętrznej w istotnym stopniu wpływa na właściwości wytrzymałościowe oraz stałe materiałowe wykonanych próbek. Największą wartość naprężenia zrywającego, a także największy moduł Younga i moduł Kirchhoffa wykazywały, wykonane w technologii FDM, próbki o geometrii lito-włóknistej. Otrzymane wartości były jednak mniejsze o, odpowiednio, 31, 31 i 20 % w stosunku do wartości naprężenia zrywającego, modułu Younga i modułu Kirchhoffa próbek wykonanych metodą wtryskiwania (tabela 1 i tabela 3). Najmniejszą wytrzymałością na rozciąganie, a także znacznie mniejszym (o ok. 30 %) niż pozostałe próbki współczynnikiem Poissona ($\nu = 0,326-0,358$) odznaczał się materiał o geometrii plastra miodu. Interesującą zależność naprężenie–odkształcenie zaobserwowano w wypadku próbki o geometrii żeberkowej, która wykazuje wartości modułu Younga i Kirchhoffa na poziomie wartości

odpowiadających próbce o geometrii kratowej, ale ponad dwukrotnie mniejszą wartość naprężenia zrywającego.

Rozciąganie próbek w orientacji na sztorc

W wypadku rozciągania próbek zorientowanych sztorcowo uzyskano większe wartości ocenianych właściwości niż w wypadku próbek rozciąganych w orientacji poziomej (tabela 4). Spośród próbek wykonanych techniką FDM kształtki o geometrii plastra miodu charakteryzowały się, podobnie jak poprzednio, najmniejszymi wartościami naprężenia zrywającego, modułu Younga i modułu Kirchhoffa. Z kolei największy przyrost naprężenia zrywającego, modułu Younga oraz modułu Kirchhoffa wykazywała próbka o geometrii żeberkowej. Wartości te wzrosły o, odpowiednio, 104, 33 i 36 % w stosunku do wartości uzyskanych w toku rozciągania próbek w orientacji poziomej (tabela 3 i 4). Największymi wartościami badanych właściwości i tym razem odznaczała się próbka o geometrii lito-włóknistej, jednak odpowiadające jej naprężenie zrywające było nadal mniejsze o 25 % od wartości naprężenia zrywającego próbki otrzymanej metodą wtryskiwania (tabela 1 i 4).

Rozciąganie próbek w orientacji pionowej

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że próbki otrzymane techniką FDM charakteryzowały się najmniejszą wytrzymałością podczas rozciągania w orientacji pionowej (tabela 5). Próbki o geometrii żeberkowej i plastra miodu wykazywały zbliżone war-

T a b e l a 3. Właściwości wytrzymałościowe i stałe materiałowe próbek wytwarzanych w orientacji poziomej

T a b l e 3. Mechanical properties and material constants of the samples produced in landscape orientation

	Geometria lito-włóknista	Geometria żeberkowa	Geometria kratowa	Geometria plastra miodu
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	24,8 ± 0,4	8,6 ± 1,6	18,5 ± 0,3	6,6 ± 0,2
Obciążenie przy zerwaniu, N	990 ± 10	340 ± 60	740 ± 10	240 ± 10
Moduł Younga, MPa	1910 ± 10	1100 ± 10	1260 ± 10	470 ± 0
Współczynnik Poissona	0,326 ± 0,019	0,346 ± 0,010	0,358 ± 0,050	0,266 ± 0,030
Moduł Kirchhoffa, MPa	719 ± 7	410 ± 3	464 ± 10	185 ± 3

± – odchylenie standardowe.

± – standard deviation.

T a b e l a 4. Właściwości wytrzymałościowe i stałe materiałowe próbek wytwarzanych w orientacji sztorcowej

T a b l e 4. Mechanical properties and material constants of the samples produced in upright orientation

	Geometria lito-włóknista	Geometria żeberkowa	Geometria kratowa	Geometria plastra miodu
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	27,1 ± 0,2	17,6 ± 0,5	20,9 ± 0,1	6,9 ± 0,1
Obciążenie przy zerwaniu, N	1080 ± 10	700 ± 20	830 ± 40	270 ± 3
Moduł Younga, MPa	1920 ± 10	1460 ± 0	1560 ± 0	780 ± 10
Współczynnik Poissona	0,401 ± 0,008	0,307 ± 0,030	0,416 ± 0,030	0,277 ± 0,024
Moduł Kirchhoffa, MPa	687 ± 3	558 ± 7	549 ± 7	306 ± 5

± – odchylenie standardowe.

± – standard deviation.

T a b e l a 5. Właściwości wytrzymałościowe i stałe materiałowe próbek wytwarzanych w orientacji pionowej**T a b l e 5.** Mechanical properties and material constants of the samples produced in vertical orientation

	Geometria lito-włóknista	Geometria żeberkowa	Geometria kratowa	Geometria plastra miodu
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	16,7 ± 2,3	7,9 ± 0,8	12,3 ± 0,3	5,8 ± 0,2
Obciążenie przy zerwaniu, N	670 ± 90	320 ± 40	490 ± 50	270 ± 13
Moduł Younga, MPa	1670 ± 20	880 ± 10	1210 ± 20	410 ± 0
Współczynnik Poissona	0,306 ± 0,023	0,279 ± 0,020	0,285 ± 0,040	0,553 ± 0,049
Moduł Kirchhoffa, MPa	637 ± 6	342 ± 4	476 ± 10	133 ± 2

± – odchylenie standardowe.

± – standard deviation.

T a b e l a 6. Odształcenie przy zerwaniu (%) w zależności od orientacji wytwarzania oraz geometrii próbki**T a b l e 6.** Dependence of strain at break (%) on the sample orientation and geometry

Orientacja	Geometria lito-włóknista	Geometria żeberkowa	Geometria kratowa	Geometria plastra miodu
Pozioma	2,70 ± 0,24	0,78 ± 0,14	3,63 ± 0,30	3,05 ± 0,32
Na sztorc	2,75 ± 0,18	2,51 ± 0,38	3,95 ± 0,25	0,77 ± 0,03
Pionowa	1,10 ± 0,18	0,91 ± 0,15	1,17 ± 0,04	3,19 ± 0,08

± – odchylenie standardowe.

± – standard deviation.

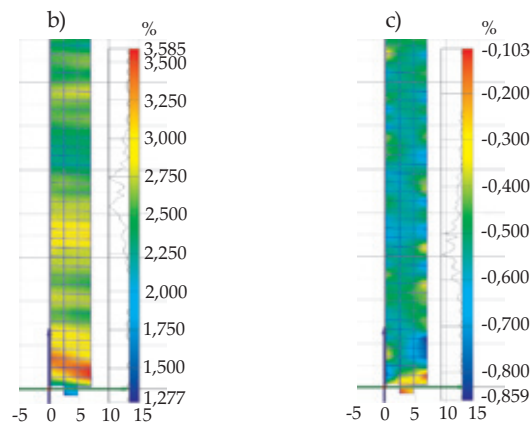
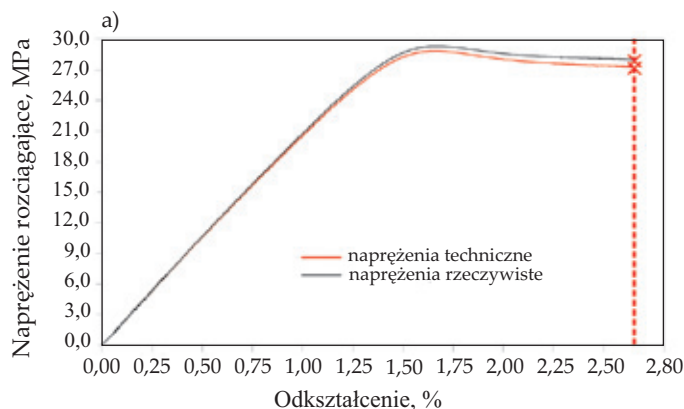
tości naprężenia zrywającego, modułu Younga i modułu Kirchhoffa do wartości uzyskanych przy rozciąganiu próbek w orientacji poziomej. Z kolei największe zmniejszenie, w stosunku do wyników uzyskanych podczas rozciągania w orientacji na sztorc, wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga o, odpowiednio, 41 i 23 % zaobserwowano w odniesieniu do kształtki o geometrii kratowej. W próbie rozciągania w orientacji pionowej, podobnie jak poprzednio, materiał o geometrii lito-włóknistej charakteryzował się najlepszą wytrzymałością mechaniczną i najkorzystniejszymi stałymi materiałowymi.

Analiza pól odkształceń próbek normatywnych w trakcie ich rozciągania

Na podstawie zdjęć zarejestrowanych w czasie rozciągania próbek normatywnych przeprowadzono analizę

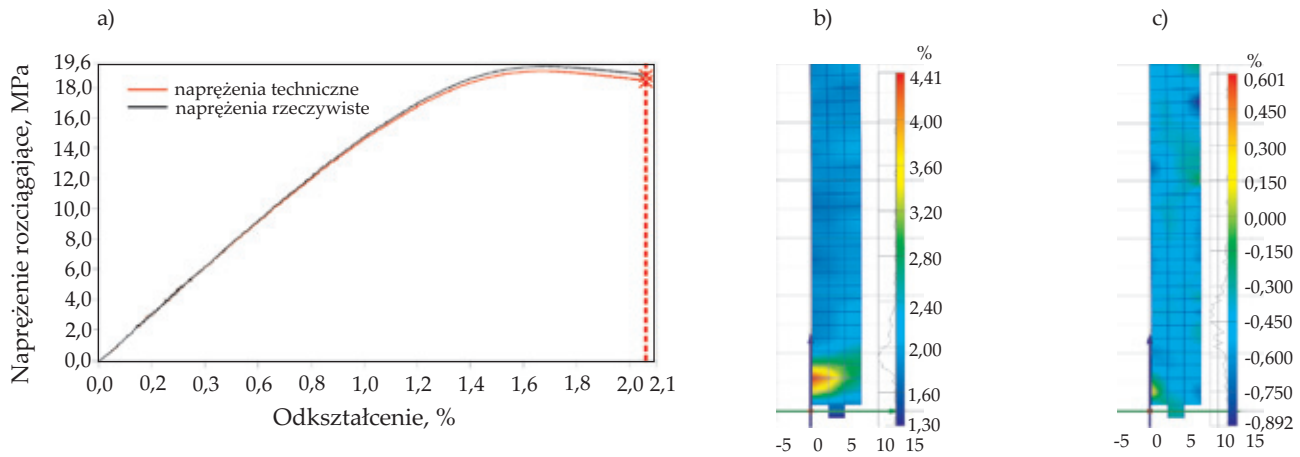
pól odkształceń na ich powierzchni. W tabeli 6 zestawiono wartości odkształceń przy zerwaniu badanych próbek, natomiast rysunki 9–13 przedstawiają pola odkształceń na przykładzie próbek wykonanych w orientacji sztorcowej, które w porównaniu z pozostałymi charakteryzowały się najlepszymi właściwościami mechanicznymi.

Wartości maksymalnych odkształceń potwierdzają ortotropowy charakter wytworzonych materiałów. Różnice wartości odkształceń przy zerwaniu próbek o danej geometrii różnie zorientowanych sięgają kilkuset procent (tabela 6). Próbka o geometrii żeberkowej charakteryzowała się najmniejszymi wartościami odkształceń w orientacji zarówno poziomej, jak i pionowej; były to wartości poniżej 1 %. Taki wynik otrzymano także w wypadku próbki o geometrii plastra miodu z orientacją sztorcową. Natomiast największymi odkształceniami przy zerwaniu, powyżej 3,5 %, odznaczała się próbka o geometrii kratowej,



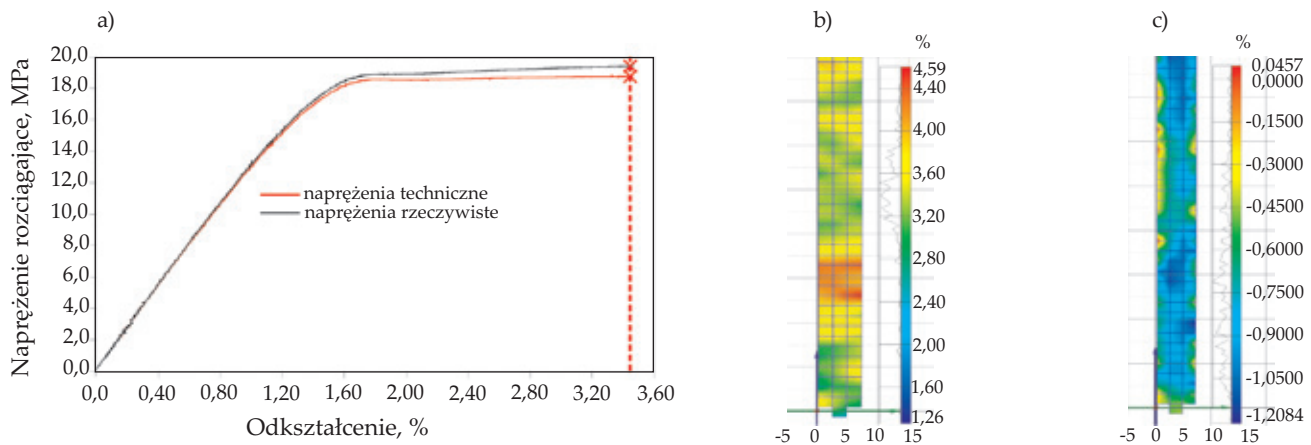
Rys. 9. a) Wykres naprężenie–odkształcenie próbki o geometrii lito-włóknistej, b) pole odkształceń pod wpływem maksymalnej siły w kierunku Y, c) pole odkształceń pod wpływem maksymalnej siły w kierunku X

Fig. 9. a) Stress–strain relationship, b) strain field under the maximum force in the Y, c) X direction for the sample with solid-fibrous geometry



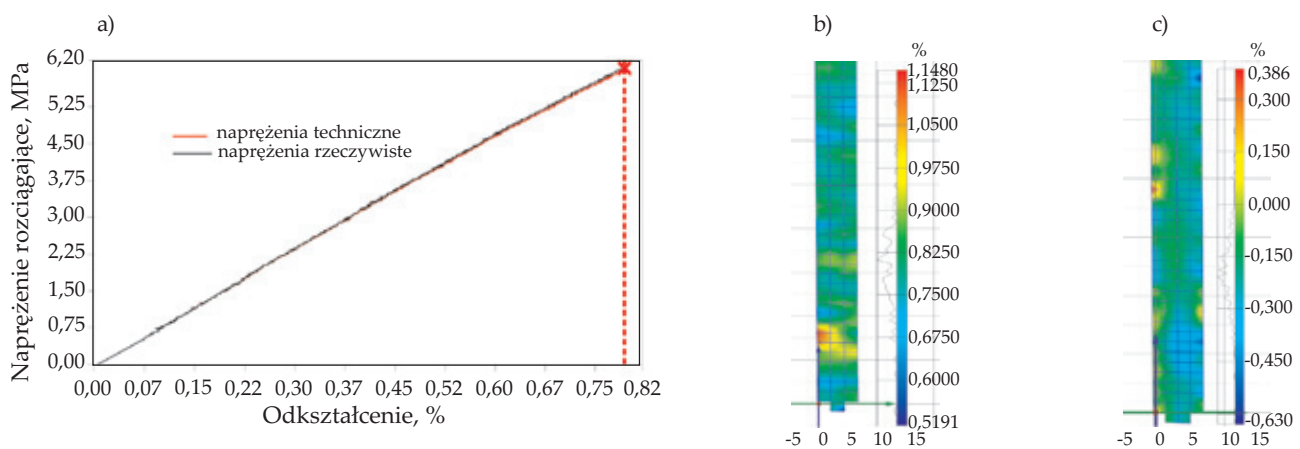
Rys. 10. a) Wykres napężenie–odkształcenie próbki o geometrii żeberkowej, b) pole odkształceń pod wpływem maksymalnej siły w kierunku Y, c) pole odkształceń pod wpływem maksymalnej siły w kierunku X

Fig. 10. a) Stress–strain relationship, b) strain field under the maximum force in the Y, c) X direction for the sample with sparse geometry



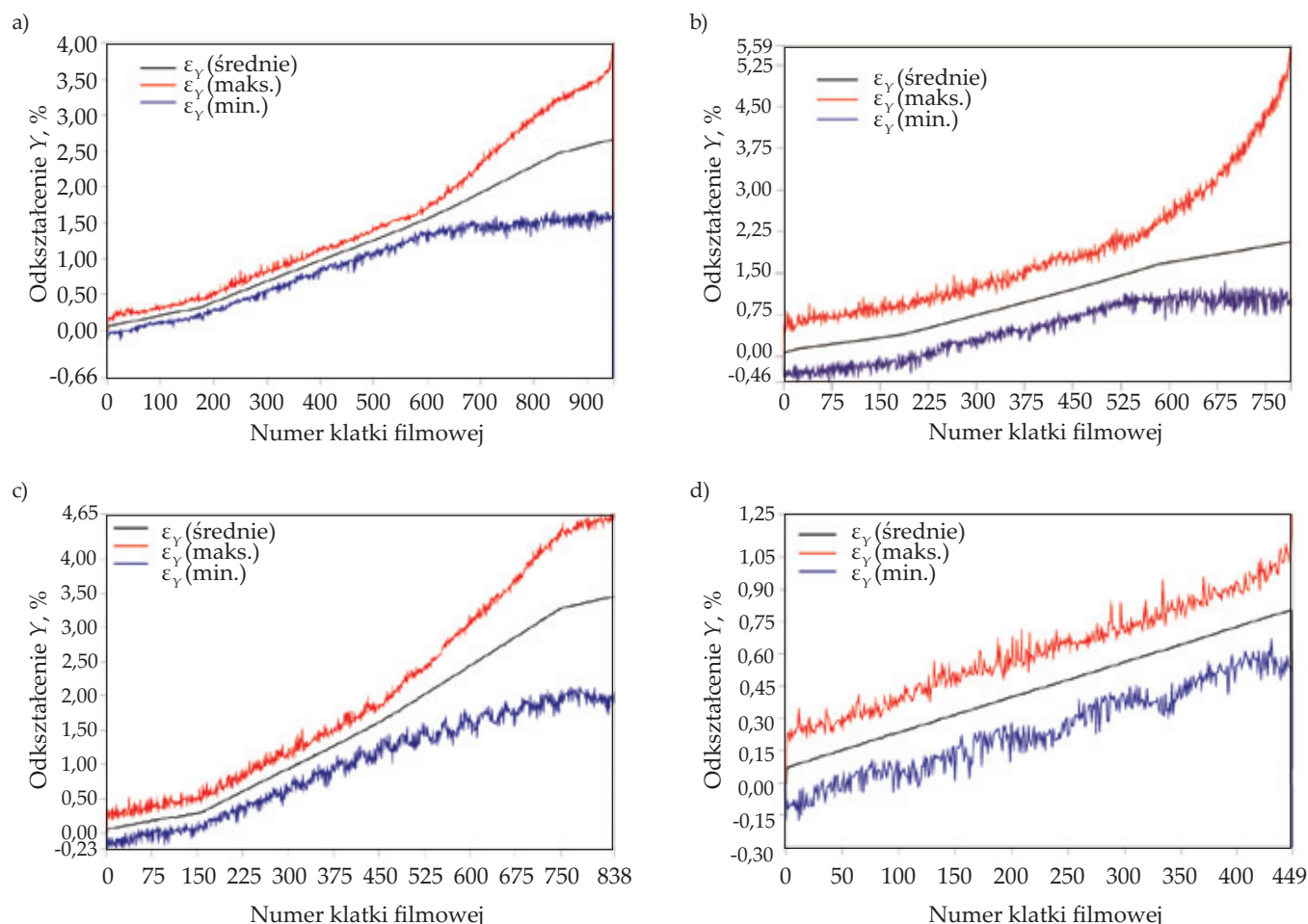
Rys. 11. a) Wykres napężenie–odkształcenie próbki o geometrii kratowej, b) pole odkształceń pod wpływem maksymalnej siły w kierunku Y, c) pole odkształceń pod wpływem maksymalnej siły w kierunku X

Fig. 11. a) Stress–strain relationship, b) strain field under the maximum force in the Y, c) X direction for the sample with sparse-double dense geometry



Rys. 12. a) Wykres napężenie–odkształcenie próbki o geometrii plastra miodu, b) pole odkształceń pod wpływem maksymalnej siły w kierunku Y, c) pole odkształceń pod wpływem maksymalnej siły w kierunku X

Fig. 12. a) Stress–strain relationship, b) strain field under the maximum force in the Y, c) X direction for the sample with honeycomb geometry



Rys. 13. Rozkład odkształceń podczas rozciągania na powierzchni próbek o orientacji na sztorc i geometrii: a) lito-włóknistej, b) żeberkowej, c) kratowej, d) plastra miodu

Fig. 13. Strain distribution during tensile test on the surface of samples with upright orientation and various geometries: a) solid-fibrous, b) sparse, c) sparse-double dense, d) honeycomb

zarówno w orientacji poziomej, jak i na sztorc. Uzyskane wyniki potwierdzają diagramy rozkładu odkształceń γ : w wypadku próbki o geometrii kratowej mieszczące się w zakresie 1,26–4,59 %, a próbki o geometrii lito-włóknistej i żeberkowej w zakresie, odpowiednio, 1,27–3,58 % oraz 1,30–4,41 % (rys. 9–12). Z kolei próbka o geometrii plastra miodu charakteryzowała się najmniejszymi wartościami odkształceń w zakresie 0,52–1,15 %, ponadto odznaczała się prostoliniowym charakterem zależności naprężenie–odkształcenie, podczas gdy pozostałe próbki wykazywały wyraźną granicę plastyczności. Potwierdza to przebieg krzywych przedstawiających maksymalne, średnie i minimalne odkształcenia, gdzie po przekroczeniu granicy plastyczności następuje nagła zmiana odkształceń, wyrażająca się w postaci charakterystycznego odchylenia krzywych (rys. 13).

PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy obrazu kształtek podczas rozciągania w różnej orientacji uzyskano komplet danych niezbędnych do określenia podstawowych stałych ma-

teriałowych modelu ortotropowego danej geometrii wewnętrznej.

Największymi wartościami naprężenia zrywającego oraz modułu Younga i modułu Kirchhoffa odznaczała się próbka o geometrii lito-włóknistej.

Spośród próbek wytwarzanych w technologii FDM w zastosowanych orientacjach najbardziej odporne na rozciąganie okazały się próbki otrzymane w orientacji poziomej.

Wyznaczone wartości maksymalnych odkształceń wytworzonych próbek potwierdzają ortotropowy charakter materiałów. Największe wartości odkształceń na powierzchni wykazywały próbki o geometrii kratowej.

LITERATURA

- [1] Bis J., Kret M., Płatek P.: „Techniki druku 3D – przykłady zastosowań”, VIII Forum Stowarzyszenia ProCAX, Siewierz 2009.
- [2] Cader M., Blicharz B.: *Mechanik* **2015**, 88 (7), 93. <http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2015.7.218>
- [3] Domingo-Espin M., Puigoriol-Forcada J.M., Garcia-Granada A.-A. i in.: *Materials & Design* **2015**, 83, 670.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>
- [4] Ning F., Cong W., Qiu J. i in.: *Composites Part B* **2015**, 80, 369.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- [5] Seyeon H., Reyes E.I., Moon K.-S. i in.: *Electronic Materials* **2015**, 44, 771.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11664-014-3425-6>
- [6] Li H., Taylor G., Bheemreddy V. i in.: *Additive Manufacturing* **2015**, 7, 64.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.003>
- [7] Mielcica M.: *Przegląd Mechaniczny* **2010**, 2, 39.
- [8] Noorani R.: "Rapid prototyping: principles and applications", John Wiley & Sons, Hoboken 2006.
- [9] Oczó K.: *Mechanik* **2006**, 79 (4), 247.
- [10] Oczó K.: *Mechanik* **2007**, 80 (2), 65.
- [11] Oczó K.: *Mechanik* **2007**, 80 (7), 217.
- [12] Oczó K.: *Mechanik* **2007**, 80 (4), 241.
- [13] Oczó K.: *Mechanik* **2009**, 82 (2), 81.
- [14] Oczó K.: *Mechanik* **2010**, 83 (2), 81.
- [15] Sęp J., Budzik G.: „Możliwości aplikacyjne technologii Rapid Manufacturing w przemyśle lotniczym”, Materiały konferencyjne I Krajowej Konferencji Naukowej „Szybkie prototypowanie: Modelowanie – Wytwarzanie – Pomiary”, Rzeszów – Pstrągowa, 16–18 września 2015, str. 169.
- [16] Skalski K., Haraburda M.: „Generatywne techniki wytwarzania w rozwoju innowacji”, Konferencja „E-narzędzia i technologie generatywne – szybka ścieżka do innowacji”, CEBBIS, Warszawa, 5 maja 2011.
- [17] Galanulis K., Reich C., Thesing J., Winter D.: "Optical Digitizing by ATOS for Press Parts and Tools", Publikacja wewnętrzna GOM, Braunschweig 2005.
- [18] Grimm T.: *Mechanik* **2010**, 83 (11), 864.
- [19] Wieczorowski M.: *Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej* **2006**, 22, 381.
- [20] Sood A.K., Asif E., Vijay T. i in.: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* **2012**, 5, 48.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.08.003>
- [21] Adamski W.: *Mechanik* **2013**, 86 (2), 1.
- [22] Cader M., Trojnecki M.: *Pomiary, Automatyka, Robotyka* **2013**, 2, 200.
- [23] Daekeon A., Kweon J.-H., Kwon S. i in.: *Journal of Materials Processing Technology* **2009**, 209, 5593.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016>
- [24] Centrum wytwórcze FORTUS 400mc, opis techniczny (14.03.2016):
<http://fortus.com.ar/spec/FORTUS400mc-0209.pdf>
- [25] Budzik G., Płocica M.: „Metodologia odnowy dziedzictwa kulturowego z wykorzystaniem innowacyjnych technologii RE i RP”, Centrum Nauko-Technologiczne, Rzeszów 2007.
- [26] Budzik G., Sobolewski B., Przeszlowski Ł.: „Szybkie prototypowanie stożkowych kół zębatych o kołowej łukowej linii zęba”, Materiały konferencyjne I Krajowej Konferencji Naukowej „Szybkie prototypowanie: Modelowanie – Wytwarzanie – Pomiary”, Rzeszów – Pstrągowa, 16–18 września 2015, str. 27.
- [27] Dane materiałowe ABS-M30 (14.03.2016):
<http://www.matweb.com/>
- [28] Golewski G.L.: *Kompozyty* **2011**, 11, 3.
- [29] Oliwa R.: *Mechanik* **2015**, 88 (12), 147.
<http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2015.12.576>
- [30] Pickerd V.: "Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events", Maritime Division DSTO, Defence Science and Technology Organisation, Australia 2013.
<http://dSPACE.dsto.defence.gov.au/dSPACE/nandle/dsto/10366>
- [31] System ATOS, opisy możliwości i parametrów technicznych (14.03.2016):
<http://www.gom.com/pl/systemy-pomiarowe/charakterystyka-systemow/atos-triple-scan.html>