

Wpływ prędkości drukowania 3D na dokładność zarysu kół zębatach

BARTOSZ PRZYBYŁ, MATEUSZ KABAT, JAROSŁAW ROBERT MIKOŁAJCZYK *

Badania opisane w niniejszej pracy dotyczą określenia relacji między prędkością drukowania a wartościami odchyłek otrzymanego w procesie drukowania 3D zarysu kół zębatach. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań można stwierdzić, że prędkość drukowania ma istotny wpływ na dokładność drukowanego elementu.

WSTĘP

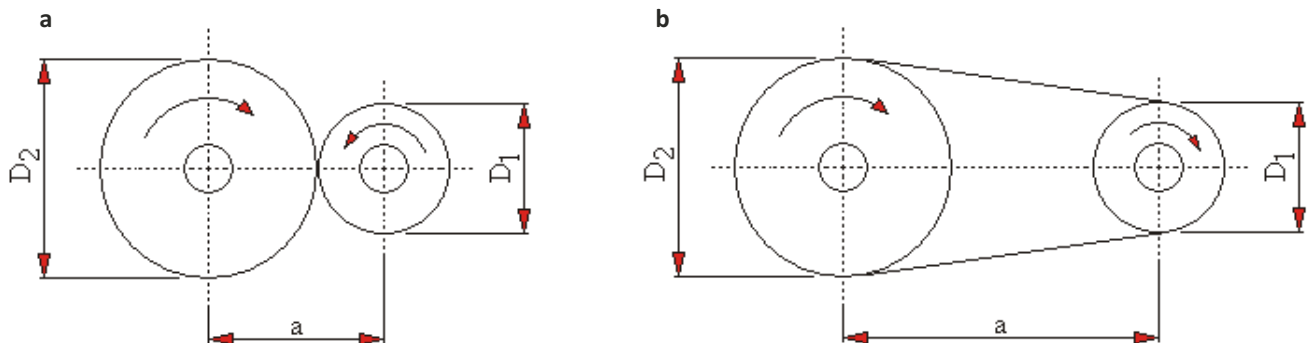
Najbardziej powszechnym ruchem występującym w wielu maszynach roboczych oraz zmechanizowanych środkach transportu jest ruch obrotowy. Napęd mechaniczny do przeniesienia ruchu obrotowego z wału czynnego na wał bierny realizowany jest za pomocą przekładni mechanicznej,

której zadaniem jest m.in. umożliwienie zmiany wartości prędkości, sił oraz momentu obrotowego.

Najprostsza przekładnia mechaniczna zbudowana jest z dwóch kół współpracujących ze sobą bezpośrednio (przekładnia cierna) lub rozsuniętych i opasanych wspólnym ciędnem (przekładnia cięgnowa) – rys. 1.

W zależności od sposobu przenoszenia ruchu obrotowego można rozróżnić następujące rodzaje przekładni:

- cierne,
- cięgnowe (wśród nich przekładnie pasowe),
- łańcuchowe,
- zębate.



Rys. 1. Przekładnie mechaniczne: a) cierna, b) pasowa [13, 14] (D_1 , D_2 – średnice współpracujących kół; a – odległość między osiami współpracujących kół)

* Bartosz Przybył – student, Katedra Inżynierii Mechanicznej, Akademia Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile, mgr inż. Mateusz Kabat – Katedra Inżynierii Mechanicznej Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile; dr inż. Jarosław Robert Mikołajczyk – Katedra Inżynierii Mechanicznej Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile; e-mail: jmikolajczyk@ans.pila.pl..

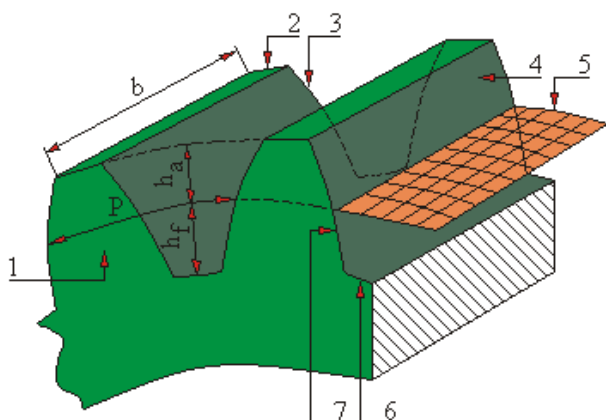
Podstawowymi częściami przekładni zębatych są koła zębate. Należą one do elementów maszyn objętych normalizacją w szerokim zakresie. Poświęcone są im m.in. normy: PN-76/M-88509/00, PN-76/M-88509/01, PN-78/M-88509/02, PN-78/M-88509/03. Na rys. 2 przedstawiono przykładowy fragment wieńca koła zębatego o zębach prostych

CORE 200 produkcji GOM GmbH – rysunki 3 i 7.

Koła zębate (obrysy zewnętrzne) zostały wydrukowane z następującymi prędkościami: 30 mm/sek; 60 mm/sek; 90 mm/sek; 120 mm/sek oraz 150 mm/sek. Materiał tworzywa konstrukcyjnego: PLA produkcji Devil Design. Wnętrze kół wyko-

WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki pomiarów wartości odchyłek zarysu drukowanego elementu otrzymane na podstawie skanów poszczególnych kół zębatych. Zestawienie w/w wyników wraz z obliczonymi w programie R [15, 17, 19, 21] wybranymi parametrami sta-



Rys. 2. Budowa i geometryczne cechy konstrukcyjne zębów [13, 14]: b – szerokość uzębienia; h_a – wysokość głowy zęba; h_f – wysokość stopy zęba; P – podziałka nominalna; 1 – czoło uzębienia; 2 – wierzchołek zęba; 3 – wręba zęba; 4 – powierzchnia boczna zęba; 5 – powierzchnia podziałowa; 6 – dno wrębu zęba; 7 – zarys zęba



Rys. 3. Wykorzystywany w badaniach skaner 3D typu ATOS CORE 200 produkcji GOM GmbH

wraz z istotnymi wielkościami opisującymi wieńce.

Uzębienia kół zębatych mogą być wykonywane metodami obróbki skrawaniem, odlewaniem, spiekaniem z proszków, wykrawaniem z blachy lub odlewane pod ciśnieniem z termoplastycznych tworzyw sztucznych. Wybór metody zależy od przeznaczenia przekładni, wymagań konstrukcyjnych oraz zastosowanych materiałów. Podstawowym jednak sposobem wykonywania uzębienia jest nacinanie zębów czy to metodą kształtową czy też metodami obwiedniowymi. Do nowych metod wykonywania kół zębatych należy zaliczyć metodę przyrostową wykorzystującą drukarkę 3D [6, 7, 9, 13, 14, 20]. W niniejszej pracy określono wpływ prędkości drukowania na dokładność zarysu przykładowego koła zębatego.

WARUNKI BADAŃ

Koła zębate wykonano na drukarce 3D typu ENDER 3 S1 produkcji firmy CREALY. Pomiarów wymiarów zarysu kół wykonano za pomocą skanera 3D typu ATOS

nano przy większych prędkościach drukowania ze względów czasowych. Widok zaprojektowanego koła zębatego przedstawiono na rys. 4. Natomiast na rys. 5 przedstawiono rysunek zaprojektowanego koła zębatego zaimplementowany do programu drukarki 3D.

Dla przedstawionego na rysunkach 4 i 5 elementu wypełnienie materiału wynosi 10%. Obrys zewnętrzny uzębienia, otworu wewnętrznego oraz rowka pod wpust wykonany przy badanych prędkościach drukowania, tzn. odpowiednio 30; 60; 90; 120 oraz 150 mm/sek. Obrys wewnętrzny wykonany przy większych prędkościach. Średnica koła zębatego $d = 66.27$ mm, moduł $m = 3$ mm.

Na rys. 6 przedstawiono orientacyjne czasy drukowania niniejszego elementu i masę zużytego materiału konstrukcyjnego.

Łączna masa filamentu zużytego do wykonania koła zębatego wynosiła: 272,49 gramów, a jego objętość to 13301,58 mm³.

tystycznymi przedstawiono w Tabeli 1 [1, 2, 4, 5, 8, 10, 12]. Na podstawie tego zestawienia można zauważyć, że wraz ze wzrostem prędkości drukowania wzrasta niestety wartość średnich odchyłek (parametr Mean) względem wartości nominalnej (zadanej). Dla prędkości drukowania $v_1 = 30$ mm/sek wartość tego parametru wynosiła 0.0964 mm, natomiast dla prędkości $v_5 = 150$ mm/sek jego wartość wynosiła aż 0.2713 mm. O ile wartości maksymalne/minimalne mogą być wartościami losowymi, a tyle wartości średnie już nie. Być może sytuacja ta jest związana np. z bezwładnością maszyny – im większa prędkość drukowania, tym większa bezwładność i tym samym większa niedokładność wytwarzanych elementów, lub z występowaniem większych drgań w układzie.

Dla prędkości drukowania $v_3 = 90$ mm/sek oraz $v_4 = 120$ mm/sek otrzymano zbliżone wartości średnich odchyłek (parametr Mean) od zarysu nominalnego – odpowiednio 0.1679 mm i 0.1663 mm. Czyli dla tej konstrukcji drukarki 3D nie ma większego raczej znaczenia czy

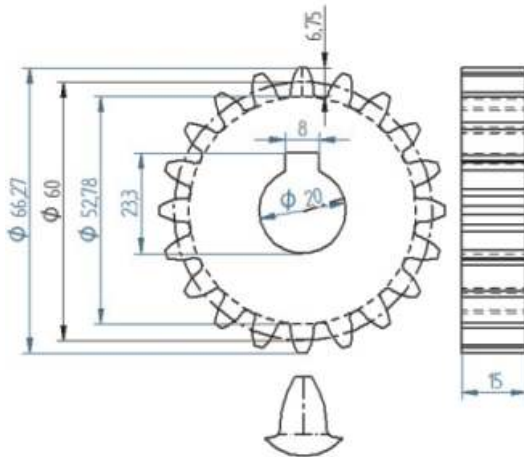
Tabela 1. Zestawienie wartości zmierzonych odchyłek dla poszczególnych prędkości drukowania oraz obliczone na ich podstawie wybrane parametry statystyczne [15, 16, 19, 21]

Lp.	Odchyłki [mm] dla $v_1=30$ mm/sek	Odchyłki [mm] dla $v_2=60$ mm/sek	Odchyłki [mm] dla $v_3=90$ mm/sek	Odchyłki [mm] dla $v_4=120$ mm/sek	Odchyłki [mm] dla $v_5=150$ mm/sek
1	-0.05	+0.01	+0.08	+0.07	+0.11
2	+0.03	-0.01	-0.07	-0.07	+0.03
3	-0.07	+0.12	+0.18	+0.21	+0.22
4	+0.01	+0.25	+0.16	-0.18	+0.23
5	0.00	-0.04	-0.19	+0.21	+0.29
6	0.00	+0.10	+0.26	+0.25	+0.29
7	-0.02	+0.21	+0.23	-0.15	+0.38
8	+0.15	+0.09	+0.27	+0.26	+0.34
9	+0.09	+0.25	+0.25	+0.25	+0.33
10	+0.24	+0.07	+0.22	+0.05	+0.24
11	+0.57	-0.04	+0.29	+0.27	+0.29
12	+0.22	+0.21	+0.30	+0.29	+0.29
13	-0.02	+0.12	+0.10	+0.23	+0.35
14	-0.03	+0.17	+0.27	+0.25	+0.15
15	+0.05	+0.17	+0.31	+0.21	+0.28
16	+0.10	+0.05	-0.06	+0.25	+0.30
17	+0.13	+0.18	+0.25	+0.26	+0.32
18	+0.13	+0.02	+0.26	+0.25	+0.20
19	+0.11	+0.37	+0.18	+0.30	+0.52
20	+0.20	+0.23	+0.21	+0.22	+0.39
21	+0.06	+0.04	-0.07	+0.20	+0.31
22	+0.09	+0.08	+0.08	+0.27	+0.38
23	+0.04	+0.06	-0.24	+0.12	+0.30
24	+0.14	+0.17	-0.01	+0.13	+0.26
25	+0.24	+0.24	+0.20	+0.15	+0.23
26	-	+0.14	+0.08	+0.21	+0.27
27	-	-	+0.44	+0.17	+0.31
28	-	-	+0.28	+0.17	+0.23
29	-	-	+0.06	+0.14	+0.29
30	-	-	+0.20	-0.04	+0.19
31	-	-	+0.26	+0.28	-0.01
32	-	-	+0.05	+0.03	+0.58
33	-	-	+0.22	+0.01	+0.39
34	-	-	+0.18	+0.10	+0.26
35	-	-	-	+0.06	+0.15
36	-	-	-	+0.30	+0.21
37	-	-	-	+0.13	+0.11
38	-	-	-	+0.46	+0.26
39	-	-	-	-	+0.31
Min	-0.07	-0.04	-0.19	-0.18	-0.01
1st Qu.	0.000	0.0525	0.08	0.1050	0.225
Median	0.09	0.12	0.2050	0.21	0.29
Mean	0.0964	0.1254	0.1679	0.1663	0.2713
3rd Qu.	0.14	0.2025	0.26	0.25	0.315
Max	0.57	0.37	0.44	0.46	0.58
Odchylenie przeciętne d_1	0.093568	0.08349112	0.1061938	0.1023546	0.07913215
Rozstęp próby R	0.64	0.41	0.63	0.64	0.59
Rozstęp międzykwartylowy IQR	0.14	0.15	0.18	0.145	0.09
Odchylenie standardowe sd	0.133569	0.1020287	0.1343848	0.1321019	0.1120427

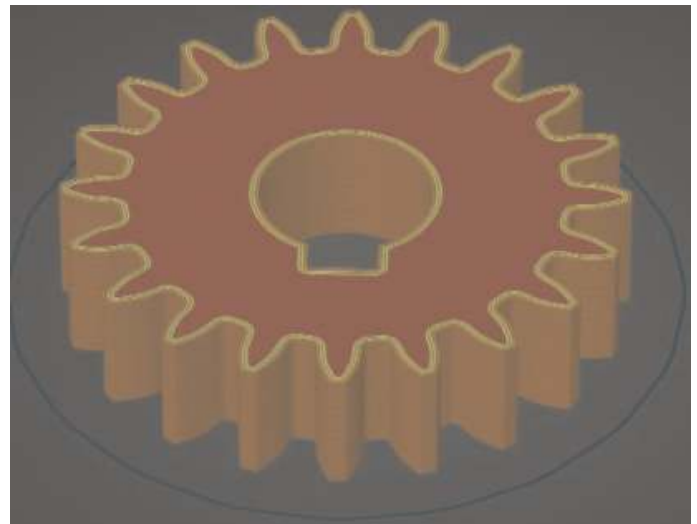
W tabeli:
Min – wartość minimalną,
1stQu. – dolny (pierwszy) kwartył próby (Q_1),
Median – mediana („wartość środkowa” Q_2),

Mean – średnia arytmetyczna,
3rdQu. – górny (trzeci) kwartył próby (Q_3);
Max – wartość maksymalna;
 d_1 – odchylenie przeciętne od wartości średniej;

R – rozstęp próby;
IQR – rozstęp międzykwartylowy (ang. *interquartile range*);
sd – odchylenie standardowe;



Rys. 4. Rysunek zaprojektowanego koła zębatego o zębach prostych; moduł $m=3$ mm



Rys. 5. Rysunek koła zębatego zaimplementowany do programu drukarki 3D

Rodzaj funkcji	Czas	Procentowo	Użyty filament
Obrys	39m	33,4%	2,23 m 6,64 g
Obrys zewnętrzny	38m	32,3%	1,12 m 3,34 g
Wypełnienie wewnętrzne	15m	12,9%	1,12 m 3,33 g
Zwarte wypełnienie	16m	13,8%	0,65 m 1,94 g
Zwarte wypełnienie górne	5m	5,3%	0,16 m 0,48 g
Wypełnienie mostu	2m	1,5%	0,22 m 0,67 g
Skard/brim	9s	0,1%	0,01 m 0,02 g
Wlasy	54s	0,8%	0,02 m 0,06 g
Szacowane czasy drukowania:			
Pierwsza warstwa:	5m		
Suma:	1h58m		

Rys. 6. Zestawienie orientacyjnych czasów oraz masy użytego materiału drukowanego koła dla poszczególnych warstw; szacowany czas druku: 1h 58 min

drukujemy z prędkością 90 mm/sek czy też z prędkością 120 mm/sek.

W niniejszej pracy nie zajęto się wartościami drgań dla poszczególnych prędkości drukowania, ale możliwe jest, że ich wartości wzrastają, co by mogło tłumaczyć wzrost niedokładności wykonania zarysu drukowanych kół zębatych.

WNIOSKI

Na podstawie analizy rezultatów przeprowadzonych badań, można sformułować następujące wnioski:

1. Jeżeli wartość średnią (parametr Mean) odchyłek zarysu względem wymiaru nominalnego dla prędkości $v_1 = 30$ mm/sek przyjmą jako 100% ($Mean_{v_1} = 0.0964 \equiv 100\%$), wówczas dla prędkości $v_2 = 60$ mm/sek parametr $Mean_{v_2} = 130.08\%$. Dla prędkości $v_3 = 90$ mm/sek parametr $Mean_{v_3} = 174.17\%$. Dla prędkości $v_4 = 120$



Rys. 7. Pomiary wydrukowanego koła zębatego za pomocą skanera 3D typu ATOS CORE 200 produkcji GOM GmbH

mm/sek parametr $Mean_{v_4} = 172.51\%$. Natomiast dla prędkości $v_5 = 150$ mm/sek parametr $Mean_{v_5} = 281.43\%$! Czyli zwiększanie prędkości drukowania 3D negatywnie wpływa na dokładność wykonywanego elementu. Można sobie zadać pytanie: jaka jest przyczyna takiego stanu rzeczy? Czy przyczyną jest rodzaj tworzywa konstrukcyjnego czy

raczej parametry techniczne danej drukarki 3D. Na podstawie tych badań trudno to tak jednoznacznie stwierdzić.

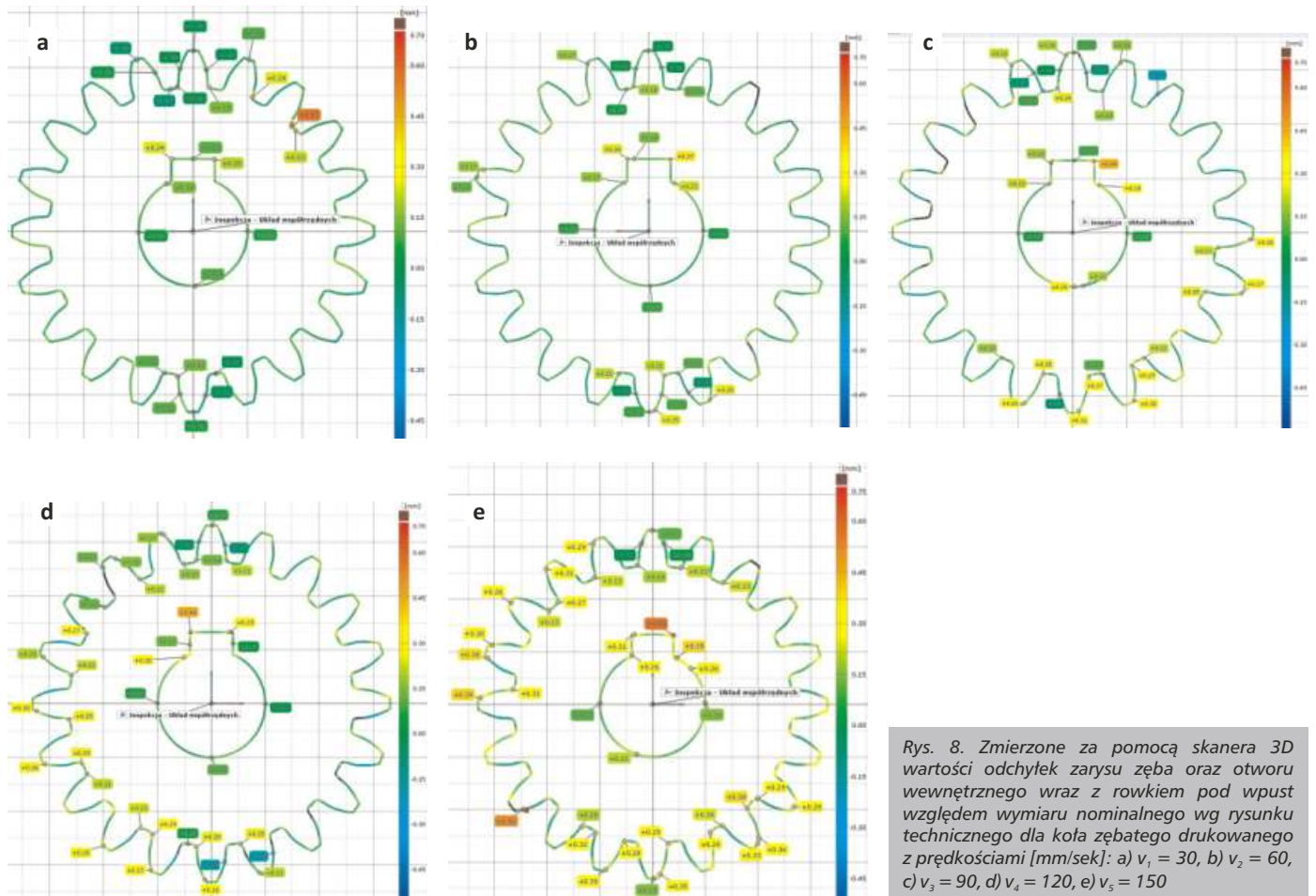
2. Rozstęp próby – parametr R – (różnica między maksymalnym i minimalnym wymiarem) dla badanych prędkości drukowania mają wartości zbliżone do siebie, odpowiednio $R_{v_1} = 0.64$ mm; $R_{v_2} = 0.41$ mm; $R_{v_3} = 0.63$ mm; $R_{v_4} = 0.64$ mm oraz $R_{v_5} = 0.59$ mm. Oznacza to, że zmiana prędkości drukowania nie ma raczej wpływu na rozstęp próby, czyli na różnicę między maksymalnym, a minimalnym zmierzonym wymiarem. Parametr ten jest raczej związany z konstrukcją danej drukarki, czyli dla danej drukarki 3D jego wartość jest taka sama.

Drukarkami typu 3D można wykonywać elementy z różnych tworzyw konstrukcyjnych, w tym z metali. Czy dla tego typu rodzajów materiałów również nastąpi wzrost niedokładności otrzymanego zarysu wraz ze wzrostem prędkości drukowania? Należy się spodziewać, że tak, ale w jakim stopniu?

Przedstawione wyżej badania oprócz wartości poznawczych mają jeszcze inny walor. Wskazują także kierunki badań jakie w zakresie obróbek przyrostowych należy prowadzić.

Literatura

1. Arnold S.F.: *The theory of lineal models and multivariate analysis*. Wiley, New York, 1981.



Rys. 8. Zmierzone za pomocą skanera 3D wartości odchyłek zarysu zęba oraz otworu wewnętrznego wraz z rowkiem pod wpust względem wymiaru nominalnego wg rysunku technicznego dla koła zębatego drukowanego z prędkościami [mm/sek]: a) $v_1 = 30$, b) $v_2 = 60$, c) $v_3 = 90$, d) $v_4 = 120$, e) $v_5 = 150$

2. Bailey N.T.J.: *Statistical Methods in Biology*. The English Universities Press Ltd, London, 1959.

3. Bendat J. S., Piersol A. G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.

4. Biecek P.: *Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.

5. Biecek P.: *Przewodnik po pakiecie R*. Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2017.

6. Caban J., Szala M., Kęsik J., Czuba Ł.: *Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive*. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe. Instytut Wydawniczy SPATIUM sp. z o.o., 2017.

7. Cichoń K., Brykalski A.: *Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle*. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Przegląd Elektrotechniczny, vol. 93, nr 3/2017.

8. Crawley M.: *The R Book*. Press Wiley-Blackwell, 2012.

9. Dodziuk H.: *Perspektywy rozwoju druku 3D. Druk 3D/AM. Zastosowanie oraz skutki społeczne i gospodarcze*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.

10. Everitt B., Hothorn T.: *A Handbook of Statistical Analyses Using R*. Chapman & Hall/CRC Computer Science & Data Analysis. 2010.

11. Gągolewski M.: *Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.

12. Gillespie C., Lovelace R.: *Wydajne programowanie w R. Praktyczny przewodnik po lepszym programowaniu*. APN Promise, Warszawa 2018.

13. Górski E.: *Obróbka skrawaniem*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 1972.

14. Górski E.: *Poradnik narzędziowca*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1980.

15. Koronacki J., Mielniczuk J.: *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2018.

16. Krzysztofiak M., Urbanek D.: *Metody statystyczne*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.

17. Krzyśko M.: *Statystyka matematyczna*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1996.

18. Luszniwicz A.: *Statystyka ogólna*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1987.

19. Morrison D. F.: *Wielowymiarowa analiza statystyczna*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.

20. Styp-Rekowski M., Matuszewski M., Oborski O., Polishchuk O.: *Miejsce technik przyrostowych w procesach wytwórczych*. Obróbka Metalu, nr 2-3/2020.

21. Żakowski W., Kołodziej W.: *Matematyka cz. II. Analiza matematyczna*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.