

# Określenie korelacji między prędkością skrawania a parametrem chropowatości $R_a$

DARIUSZ JĘDRZEJCZYK, JAROSŁAW ROBERT MIKOŁAJCZYK\*

W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące określenia zależności matematycznej pomiędzy prędkością skrawania, a parametrem chropowatości  $R_a$ . Wykazano, że istnieje silna ujemna korelacja między w/w badanymi zmiennymi.

## 1. Wprowadzenie

Obróbka skrawaniem, mimo ciągle powstających nowych metod obróbki, w przemyśle maszynowym stanowi podstawę obróbki ubytkowej. W metodzie tej usunięta zostaje z przedmiotu obrabianego określona objętość warstwy materiału (naddatku) za pomocą narzędzia z ostrzem (ostrzami) skrawającymi. Podstawowym warunkiem kinematycznym obróbki jest względny ruch (obrotowy lub liniowy) narzędzia i przedmiotu obrabianego. Ukonstytuowana w czasie procesu technologicznego powierzchnia przedmiotu obrabianego charakteryzuje się różną strukturą geometryczną powierzchni (SGP) w zależności od rodzaju, warunków i parametrów zastosowanej obróbki. Struktura ta może być anizotropowa lub izotropowa. Do grupy parametrów opisujących SGP zalicza się następujące parametry:

- chropowatość powierzchni,
- kierunkowość powierzchni,
- falistość,
- defekty SGP.

Chropowatość jest wyznaczana na podstawie profilu powierzchni. Parametry chropowatości, określające SGP w układzie 2D zostały ujęte w normie [13], w której sklasyfikowano je w następujących grupach:

- parametry pionowe (odległościowe),
- parametry hybrydowe (mieszane),
- parametry poziome (odległościowe),
- charakterystyczne krzywe.

W grupie parametrów pionowych obliczanych na podstawie profilografu, jest parametr  $R_a$  – średnia arytmetyczna rzędnych profilu. Jest to najczęściej stosowany w praktyce przemysłowej parametr chropowatości.

Podczas procesu toczenia, który jest analizowany w niniejszej pracy, można wpływać na zmniejszenie parametru chropowatości  $R_a$  stosując:

- duże prędkości skrawania (w granicach  $120 \div 1000$  m/min),
- małe posuwy (w granicach  $0,02 \div 0,12$  mm/obr),
- małe głębokości skrawania (od  $0,05 \div 0,3$  mm).

W wyniku stosowania w/w parametrów skrawania uzyskana wartość parametru chropowatości  $R_a$  może osiągnąć wartości od  $1,25 \mu\text{m}$  do  $0,63 \mu\text{m}$  dla toczenia bardzo dokładnego [7, 9, 10]. Pojawiają się tu dwa zasadnicze pytania:

1. Czy można określić istnienie korelacji pomiędzy prędkością skrawania, a uzyskaną wartością parametru  $R_a$  dla danego sposobu obróbki skrawaniem?
2. Czy można określić liczbowo wartość zależności pomiędzy prędkością skrawania, a uzyskaną wartością parametru  $R_a$ , dla danego sposobu obróbki skrawaniem, na podstawie modelu matematycznego?

W celu odpowiedzi na wyżej postawione pytania zrealizowano niżej przedstawione badania.

## 2. Warunki badań

W niniejszych badaniach jako materiał poddany obróbce skrawaniem zastosowano wałek stalowy gatunku S235JR – Tabela 1, o średnicy  $\varnothing 30$  mm i długości 100 mm.

Obróbkę wykonano na tokarce konwencjonalnej typ TOS S32 produkcji czeskiej za pomocą noża tokarskiego imakowego prawego NNB 20×20 S10W.

\* Inż. Dariusz Jędrzejczyk, dr inż. Jarosław Robert Mikołajczyk, e-mail: jmikolajczyk@ans.pila.pl, Akademia Nauk Stosowanych im. S.Staszica, ul. Podchorążych 10, 64-920 Piła.

Tabela 1. Skład chemiczny stali S235JR [12]

Pierwiastek	Zawartość [%]
P	≤ 0,035
S	≤ 0,035
Mn	≤ 1,40
N	≤ 0,012
C	0,13
Si	0,18
Cu	≤ 0,55
Cr	0,07
Mo	0,024

Pomiary parametru  $R_a$  wykonano za pomocą profilografometru firmy Mahr model MarSurf PS10 dla każdej próbki pięciokrotnie.

Czynnikami stałymi procesu skrawania były:

- rodzaj cieczy chłodzącej,
- wydatek cieczy chłodzącej,
- głębokość skrawania  $a = 0,8$  mm,
- posuw  $p = 0,14$  mm/obr.

Parametrem zmiennym procesu skrawania była prędkość skrawania. W niniejszych badaniach zastosowano następujące wartości tej prędkości:

- $v_1 = 23,56$  m/min,
- $v_2 = 37,69$  m/min,
- $v_3 = 75,39$  m/min,
- $v_4 = 117,81$  m/min.

Dla każdej prędkości skrawania wykonano 10 prób.

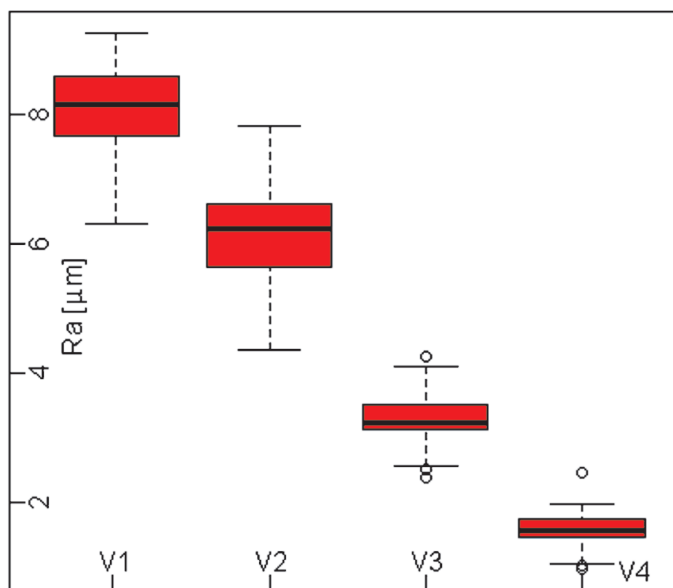
### 3. Wyniki badań

Na rys. 1 przedstawiono wykresy pudełkowe pomiarów chropowatości powierzchni parametru  $R_a$  dla danych prędkości skrawania. Natomiast w Tabeli 2 przedstawiono obliczone wybrane parametry statystyczne dla badanego parametru chropowatości. Z kolei na rys. 2 przedstawiono graficznie przebieg zmian wartości chropowatości parametru  $R_a$  dla poszczególnych pomiarów.

Wykres pudełkowy przypomina ramkę z wąsami, stąd też inna jego nazwa: wykres ramka-wąsy [1, 2, 3, 4]. Pomiędzy wąsami znajdują się prawie wszystkie obserwacje (poza wartościami odstającymi). Za odstające obserwacje uznawane są te, które odstają od kwantyli bardziej niż 1,5 IQR (1,5 to domyślna wartość argumentu 'range').

Na rys. 1 przedstawiono rozkład zmiennej liczbowej (w tym przypadku wartość parametru  $R_a$ ) za pomocą pudełek dla badanych prędkości skrawania w celu porównania rozkładu tych zmiennych. Na podstawie tego rysunku można sformułować następujące wnioski:

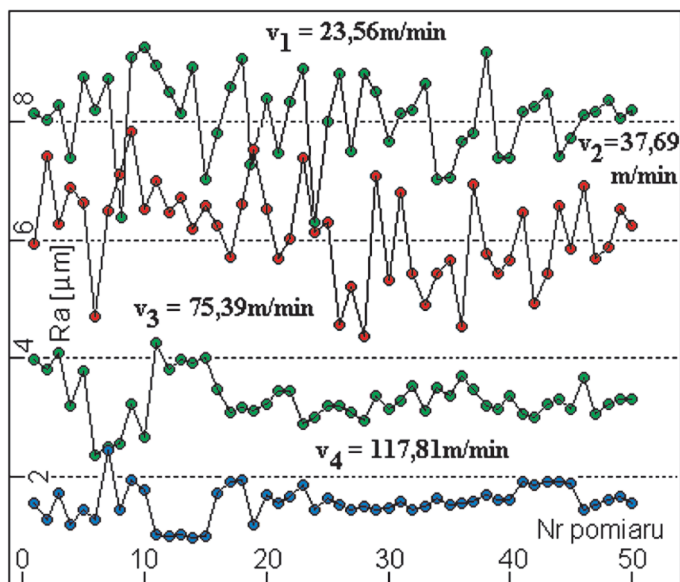
- wraz ze zwiększeniem prędkości skrawania zmniejsza się wartość parametru chropowatości  $R_a$  około 4-krotnie (z wartości ok.  $8 \mu\text{m}$  do wartości ok.  $2 \mu\text{m}$ );
- dla prędkości skrawania  $v_3 = 75,39$  m/min zanotowano trzy wartości odstające – możliwe, że są to albo błędy pomiarów (co jest raczej wątpliwe) albo zarysowania spowodowane nieodpowiednim traktowaniem próbek np. w czasie transportu;
- dla prędkości skrawania  $v_4 = 117,81$  m/min również zanotowano trzy wartości odstające, powód ich istnienia



Rys. 1. Wykres pudełkowy pomiarów wartości parametru chropowatości  $R_a$ ; prędkości skrawania [m/min]:  $v_1 = 23,56$ ;  $v_2 = 37,69$ ;  $v_3 = 75,39$ ;  $v_4 = 117,81$

Tabela 2. Wartości wybranych parametrów statystycznych dla parametru chropowatości powierzchni  $R_a$ , gdzie: Min – wartość minimalna, 1stQu. – pierwszy kwantyl, Median – mediana, 3rdQu. – trzeci kwantyl, Max – wartość maksymalna, IQR – rozstęp ćwiartkowy, s – odchylenie standardowe, Mean – wartość średnia

Prędkość skrawania	Min	1stQu.	Median	3rdQu.	Max	IQR	s	$d_1$	Mean
$v_1$	6.299	7.671	8.161	8.568	9.266	0.89625	0.6903802	0.53884	9.266
$v_2$	4.363	5.651	6.240	6.620	7.836	0.96900	0.8204341	0.66980	6.127
$v_3$	2.367	3.114	3.221	3.502	4.260	0.38825	0.4043026	0.30532	3.319
$v_4$	0.967	1.442	1.558	1.712	2.444	0.27000	0.2914197	0.21121	1.560



Rys. 2. Wykres pomiarów wartości parametru chropowości  $Ra$ ; prędkości skrawania [m/min]:  $v_1 = 23,56$ ,  $v_2 = 37,69$ ,  $v_3 = 75,39$ ,  $v_4 = 117,81$

może być podobny jak wyżej wymienionych;

– odległość między wąsami wykresu pudełkowego dla prędkości skrawania  $v_4 = 117,81$  m/min jest najmniejsza, czyli rozrzut wyników jest dla tego przypadku minimalny, co jest z punktu widzenia technologii korzystne;

– odległości między wąsami wykresu pudełkowego dla prędkości skrawania

$v_1 = 23,56$  m/min oraz dla  $v_2 = 37,69$  m/min są największe, czyli rozrzut wyników dla tych przypadków jest maksymalny, co jest z punktu widzenia technologii, np. pasowania, bardzo niekorzystne;

– rozstęp próby dla prędkości skrawania  $v_4$  jest najmniejsza i wynosi  $1,477 \mu\text{m}$  ponieważ wartość parametru  $Ra$  znacznie się zmniejszyła;

– rozstęp próby dla prędkości skrawania  $v_2$  jest największy i wynosi  $3,473 \mu\text{m}$ .

Dla wartości średnich  $Ra$  (parametr Mean) i odpowiadających im prędkości skrawania, określono następnie wartość korelacji metodą Pearsona i metodą Spearman'a (Tabela 3). Metod obliczania korelacji między zmiennymi jest wiele, tutaj zastosowano dwie najczęściej stosowane, w celu potwierdzenia prawidłowości wykonanych obliczeń korelacji [5, 6, 8, 11]. Wyniki obliczeń tymi metodami oczywiście nie mogą być identyczne, bo to są różne metody, ale powinny być zbliżone.

Pojęcie korelacji dotyczy zależności między badanymi zmiennymi, przy czym korelacja zajmuje się siłą tej zależności. Wartość korelacji mieści się w przedziale między wartościami  $-1$  oraz  $+1$ . Jeśli między zmiennymi  $X$  oraz  $Y$  istnieje ścisła zależność, wręcz zależność funkcyjna, wówczas korelacja wynosi  $-1$  lub  $+1$  (przypadki skrajne). Gdy korelacja wynosi zero, wówczas badane zmienne są nieskorelowane. Im wartość korelacji jest bliższa  $+1$  lub  $-1$ , tym korelacja jest mocniejsza [3, 4, 5].

Na podstawie obliczeń korelacji (Tabela 3) można stwierdzić istnienie silnej korelacji ujemnej pomiędzy prędkością skrawania, a wartością parametru  $Ra$ . Korelacja jest tak silna, że jest nawet funkcyjna. Ujemna jej wartość określa, że wzrostowi jednego parametru odpowiada zmniejszenie wartości drugiego parametru o pewną wartość określoną daną funkcją, czyli zwiększenie prędkości skrawania powoduje zmniejszenie wartości parametru  $Ra$ .

W celu określenia, o ile zmieniała się wartość danego parametru, zbudowano w programie R liniowy model matematyczny. Model ten ma formę równania:

$$y = -0,07591 \cdot X + 9,89714$$

gdzie:

$y$  – wartość parametru  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ]

$X$  – prędkość skrawania [m/min]

Łatwo zauważyć, że dla tak zbudowanego modelu przy prędkości skrawania  $X = 130,3799236$  m/min wartość parametru  $Ra$  wynosi zero.

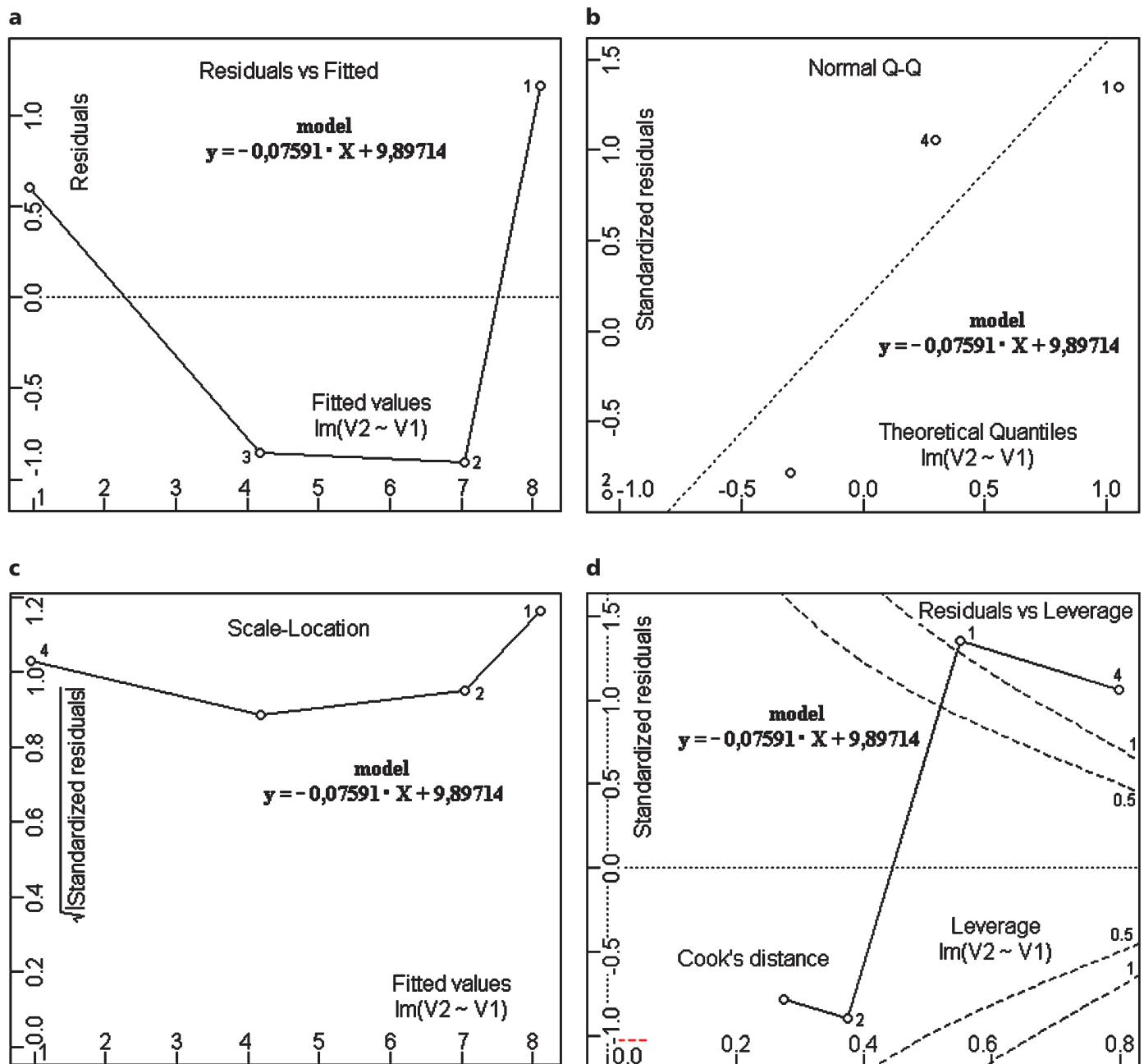
W Tabeli 4 zestawiono średnie pomiarzone wartości parametru  $Ra$  i wartości obliczone dla zbudowanego mo-

Tabela 3. Określenie korelacji między prędkością skrawania, a wartością średnią arytmetyczną parametru  $Ra$

Prędkość skrawania m/min	Mean $Ra$ $\mu\text{m}$	Korelacja Pearson	Korelacja Spearman
23,56	9,266	-0,950967	-1
37,69	6,127		
75,39	3,319		
117,81	1,560		

Tabela 4. Wartości parametru  $Ra$  dla wartości rzeczywistych i dla zbudowanego modelu liniowego

Prędkość skrawania [m/min]	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ] średnia obliczona	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ] wg modelu
23,56	9,266	8,109
37,69	6,127	7,036
75,39	3,319	4,174
117,81	1,560	0,954



Rys. 3. Wykresy diagnostyczne dla opracowanego modelu liniowego pierwszego stopnia

delu, a na rys. 3 przedstawiono wykresy diagnostyczne dla zbudowanego modelu.

Wykres 3a (o nagłówku *Residual vs Fitted*) przedstawia na osi odciętych dopasowane przez model wartości  $y$  (czyli wartości modelowe parametru  $R_a$ ), natomiast na osi rzędnych – wartości reszt.

Wykres 3b (o nagłówku *Scale Location*) przedstawia na osi odciętych wartości  $y$  dopasowane przez model (czyli wartości modelowe parametru  $R_a$ ), natomiast na osi rzędnych – pierwiastki z modułów standaryzowanych reszt.

Wykres 3c (o nagłówku *Normal Q-Q*) przedstawia na osi odciętych wartości kwantyli rozkładu normalnego odpowiadające resztom, a na osi pionowej – kwantyle empiryczne dla standaryzowanych reszt.

Wykres 3d (o nagłówku *Residuals vs Leverage*) przedstawia na osi rzędnych standaryzowane reszty, a na osi odciętych tzw. dźwignie (miary wpływu tej obserwacji na oceny współczynników modelu, ang. *leverage*) [4, 5].

Na podstawie informacji zawartych w Tabeli 4 i na wykresach – rys. 3, można stwierdzić, że model jest średnio dopa-

sowany do wartości rzeczywistych. Oczywiście można zbudować inne modele, drugiego, trzeciego, czwartego itd. stopnia i sprawdzić ich stopień dopasowania do wartości rzeczywistych, tzn. poszukiwać najlepiej dopasowanego modelu matematycznego.

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analitycznych sformułowano poniższe wnioski.

Zwiększenie prędkości skrawania znacznie zmniejsza wartość parametru chro-

powatości  $R_a$  przy stałych pozostałych parametrach obróbki, aż do wartości około  $1 \mu\text{m}$  (6÷7 klasa dokładności). Odpowiada to toczeniu bardzo dokładnemu. Toczenie bardzo dokładne stosujemy najczęściej wówczas, gdy jest to obróbka ostateczna, przy czym jest wymagana zarówno duża dokładność wymiaru obróbkowego, jak i mała chropowatość powierzchni obrabianej.

Wyznaczony model liniowy zmiany parametru  $R_a$  w zależności od prędkości skrawania w miarę wiernie oddaje przebieg tych zmian.

Wg określonego modelu liniowego dla prędkości skrawania  $v = 130,3799236 \text{ m/min}$  wartość parametru  $R_a$  wyniosłaby zero. Trudno ocenić, bez sprawdzenia tego doświadczalnie, ile w rzeczywistości wyniósłby ten parametr dla w/w prędkości skrawania. W dokumentacji technicznej tokarki TOS S32 można zauważyć, że maksymalna prędkość obrotowa wrzeciona wynosi 3200 obr/min, co umożliwiłoby uzyskanie prędkości skrawania  $v_{\text{max}} = 301,5936 \text{ m/min}$ , czyli

dla tej maszyny byłoby to realne do sprawdzenia.

#### Literatura

1. Abelson H., Sussman G.I., Sussman J.: *Struktura i interpretacja programów komputerowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2022.
2. Arnold S.F.: *The theory of lineal models and multivariate analysis*. Wiley, New York, 1981.
3. Bailey N.T.J.: *Statistical Methods in Biology*. The English Universities Press Ltd, London, 1959.
4. Bieчек P.: *Przewodnik po pakiecie R*. Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2017.
5. Bieчек P.: *Analiza danych z programem R. Modele liniowe z efektami stałymi, losowymi i mieszanymi*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
6. Cichosz P.: *Systemy uczące się*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
7. Dobrzański T.: *Uchwyty obróbkowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1967.
8. Gągolewski M.: *Programowanie w języku R. Analiza danych, obliczenia, symulacje*. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 2014.
9. Górski E.: *Obróbka skrawaniem*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1972.
10. Górski E.: *Poradnik narzędziowca*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
11. Kulczycki P.: *Estymatory jądrowe w analizie systemowej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
12. Norma PN-EN 10025-1: Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.
13. Norma PN-EN ISO 21920-2:2022-06: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Profil – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni. ■