

Grzegorz KRÓLCZYK
Maksymilian GAJEK
Stanisław LEGUTKO

PREDICTING THE TOOL LIFE IN THE DRY MACHINING OF DUPLEX STAINLESS STEEL

PROGNOZOWANIE OKRESU TRWAŁOŚCI OSTRZA W OBRÓBCE NA SUCHO STALI NIERDZEWNEJ DUPLEX

This paper examines the influence of cutting parameters, namely cutting speed, feed and depth of cut onto tool life in DSS turning process. The study included developing a mathematical model to determine the tool life. Verification research has been carried out on CNC lathe, hence the test plan has been adjusted to the possibility of programmable machines controlling GE Fanuc series 0 - T. The comparison of results obtained by given experimental plan was performed in industrial company.

Key words: Duplex Stainless Steel, machining, turning, tool life, RSM (Response Surface Method)

W artykule przedstawiono wpływ parametrów obróbki, a mianowicie prędkości skrawania, posuwu i głębokości skrawania na okres trwałości ostrza w procesie toczenia stali duplex. Badania obejmowały opracowanie modelu matematycznego dla określenia okresu trwałości ostrza skrawającego. Badania weryfikacyjne wykonywano na tokarce sterowanej numerycznie, stąd plan badań dostosowany został do możliwości programowych maszyny ze sterowaniem GE Fanuc seria 0 – T. Porównanie wyników przeprowadzono w warunkach produkcyjnych.

Słowa kluczowe: stal nierdzewna duplex, obróbka skrawaniem, toczenie, okres trwałości ostrza, metoda powierzchni odpowiedzi

Terminologia

a_p	Głębokość skrawania, mm	T	Okres trwałości ostrza, min
f	Posuw, mm/obr	DSS	Stal Nierdzewna Duplex
v_C	Prędkość skrawania, m/min		

1. Wprowadzenie

Według danych firm produkujących materiały konstrukcyjne stal duplex zyskuje coraz bardziej na znaczeniu, co jest odzwierciedlone przez szeroki asortyment produktów z niej wytwarzanych. Jednym z ograniczeń wydajności procesu toczenia tej stali jest zużycie ostrza skrawającego. Wg Olszaka [10] stal duplex klasyfikowana jest jako trudnoskrawalna. W ostatnich latach skrawalnością stali austenitycznych zajmowali się badacze tacy, jak Abou-El-Hossein K. A. i in., Akasawa T. i in., Charles J. i in., Ciftci I., Cunat P. J., Kosmač A. oraz Paro J. i in. [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 11], natomiast temat obróbki skrawaniem stali duplex podjęli, m.in. Bouzid Saï W. oraz Lebrun J. L. [3]. Istotne znaczenie ma przebieg procesu zużywania się ostrza, który w dużej mierze zależy od parametrów skrawania. Zużycie ostrza narzędzia skrawającego prowadzi do pogorszenia się jakości powierzchni obrabianej. Podstawowym wymogiem w zastosowaniu płytek wieloostrowych w warunkach przemysłowych jest całkowity przyrost produkcji, a nie dokładność wykonania poszczególnych części maszyn. Wg Smith'a [14], gdy zapasy oprzyrządowania są skonsolidowane, a materiały stosowane na narzędzia skrawające bardziej uniwersalne, można w warunkach przemysłowych posłużyć się

mniejszą liczbą gatunków oraz geometrii płytek. Mniejsze zapasy płytek wielostrzowych pozwalają w bardziej efektywny sposób zoptymalizować proces produkcyjny. Wymienione wyżej aspekty w połączeniu z optymalizacją prędkości skrawania, posuwu oraz głębokości skrawania, pozwalają na osiągnięcie zamierzonych celów produkcyjnych. Dzięki optymalizacji parametrów skrawania, możliwe jest pełne wykorzystanie podstawowego sprzętu, w wyniku czego można spodziewać się dużego wzrostu ogólnej efektywności produkcji. W celu określenia jakości powierzchni i właściwości wymiarowych należy stosować modele teoretyczne, dzięki którym możliwe jest prognozowanie w zależności od warunków pracy. Metoda powierzchni odpowiedzi (RSM) jest praktyczna, ekonomiczna oraz stosunkowo łatwa do zastosowania [13].

2. Metodyka eksperymentu

2.1. Materiał obrabiany i ostrze skrawające

Materiałem obrabianym była stal 1.4462 (wg DIN EN 10088-1) o strukturze ferrytyczno-austenitycznej zawierającej około 50% austenitu. Wytrzymałość na rozciąganie wynosiła $UTS = 700$ MPa, twardość Brinela - 293 HB. Skład chemiczny obrabianego materiału oraz dane techniczne narzędzia skrawającego przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Skład chemiczny stali duplex 1.4462

Pierwiastek	%C max	%Si max	%Mn max	%P max	%S max	%Cr	%Ni	%Mo	%N	Inne
Zawartość % w stali	0,03	1,00	2,00	0,030	0,020	21,0	4,50	2,50	0,10	-
						23,0	6,50	3,50	0,22	

Tabela 2. Specyfikacja narzędzia skrawającego

Ostrze	Substrat	Powłoka
T1 MM 2025	Twardość: 1350 HV3 Symbol: M25, P35	Powłoki: Ti(C,N)-(2 μm) (Górna warstwa) Al ₂ O ₃ -(1,5 μm) (Środkowa warstwa) TiN-(2 μm) (Dolna warstwa) Technika powlekania: CVD

Narzędzie skrawające o geometrii TNMG 160408 zamocowane zostało w oprawce zaciskowej ISO-MTG NL 2020-16. Na podstawie zaleceń przemysłowych wytypowano zakres parametrów skrawania dla ostrza T1: $v_C = 50 \div 150$ m/min, $f = 0,2 \div 0,4$ mm/obr, $a_p = 1 \div 3$ mm. Badania wykonywano w warunkach produkcyjnych. Program badań realizowano na tokarce sterowanej numerycznie FAMOT 400 CNC firmy Famot – Pleszew S.A.

2.2. Plan eksperymentu

Jako metodę optymalizacji parametrów obróbki stali duplex wybrano program statyczny zdeterminowany selekcyjno – wieloczynnikowy uniform – rotatabilny PS/DS – P: λ [12]. Wybór programu PS/DS – P: λ został podyktowany założeniem, iż model funkcji wielomianu drugiego stopnia będzie modelem nieliniowym, który może być zredukowany do modelu liniowego. Wybrano funkcję wielomianu drugiego stopnia, gdyż dzięki temu

w badaniach nie ma ograniczeń związanych z techniką pomiarową. Wymagana liczba punktów pomiarowych to $N = 2^3 + 6 + 6 = 20$ (Tabela 3).

Tabela 3. Kodowe oznaczenie planu badań

Lp.	Wartości zakodowane			Wartości rozkodowane rzeczywiste		
	x_1	x_2	x_3	v_c [m/min]	f [mm/obr]	a_p [mm]
1	-1	-1	-1	70	0,24	1,4
2	-1	-1	+1	70	0,24	2,6
3	-1	+1	-1	70	0,36	1,4
4	-1	+1	+1	70	0,36	2,6
5	+1	-1	-1	130	0,24	1,4
6	+1	-1	+1	130	0,24	2,6
7	+1	+1	-1	130	0,36	1,4
8	+1	+1	+1	130	0,36	2,6
9	-1,682	0	0	50	0,3	2
10	1,682	0	0	150	0,3	2
11	0	-1,682	0	100	0,2	2
12	0	1,682	0	100	0,4	2
13	0	0	-1,682	100	0,3	1
14	0	0	1,682	100	0,3	3
15	0	0	0	100	0,3	2
16	0	0	0	100	0,3	2
17	0	0	0	100	0,3	2
18	0	0	0	100	0,3	2
19	0	0	0	100	0,3	2
20	0	0	0	100	0,3	2

Realizacja programu wymaga wykonania pomiarów dla ośmiu układów (3 czynniki na dwóch poziomach, 2^3) z dodatkiem 6 punktów gwiazdnych i punktu środkowego (średni poziom) powtarzane 6 razy do określenia błędu [9].

3. Model okresu trwałości ostrza i jego aplikacyjność

3.1. Model okresu trwałości ostrza

Celem przeprowadzonych badań była próba sprawdzenia w warunkach przemysłowych wartości obliczonych funkcji określających trwałość ostrza podczas toczenia stali duplex.

Na podstawie programu PS/DS - P: λ oraz danych doświadczalnych otrzymano wielomian drugiego stopnia funkcji okresu trwałości ostrza:

$$T = f(v_c; f; a_p) = 118,438 - 0,88687 \cdot v_c - 89,9855 \cdot f - 14,439 \cdot a_p + 0,0053856 \cdot v_c^2 + 400,4555 \cdot f^2 + 6,0762 \cdot a_p^2 - 1,3131 \cdot v_c \cdot f + 0,0029556 \cdot v_c \cdot a_p - 47,6564 \cdot f \cdot a_p \quad (1).$$

Wybrane wyniki dla minimalnych i maksymalnych wartości v_c i f oraz dla średniej wartości a_p przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry badań weryfikacyjnych modelu trwałości ostrza

Parametry skrawania			T - wartości	T - wartości
v_c [m/min]	f [mm/obr]	a_p [mm]	średnie z badań	obliczone
150	0,2	2	40 min 19,4 s	42 min 27,9 s
150	0,4	2	16 min 24,4 s	14 min 04,0 s
50	0,2	2	46 min 01,4 s	49 min 06,5 s
50	0,4	2	39 min 08,5 s	46 min 58,4 s

Wyniki uzyskane na podstawie modelu są zbieżne z wynikami otrzymanymi z eksperymentu.

3.2. Weryfikacja modelu

Ocenę wyznaczonych modeli matematycznych wykonano z zastosowaniem testu t-Studenta dla porównywania dwóch wartości średnich z populacji o rozkładach normalnych i jednorodnych wariancjach. Obliczenia statystyczne wykonane zostały w programie Statistica 9.0 [15].

Założenia o normalności rozkładu sprawdzono stosując test Shapiro – Wilka dla modelu trwałości ostrza (tabela 5).

Tabela 5. Testy normalności dla modelu trwałości ostrza

Zmienna	n	W	p
Wartości średnie z badań	4	0,8251	0,1555
Wartości obliczone	4	0,7741	0,0633

Ponieważ poziom istotności p jest większy od 0,05 dla każdego z badanych przypadków, brak jest więc podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu.

Badane są dwie populacje generalne mające odpowiednio rozkłady normalne $N(m_1, \sigma_1)$ i $N(m_2, \sigma_2)$, gdzie parametry tych rozkładów są nieznane. Dane są dwie próby o liczebnościach $n_1 = 4$ i $n_2 = 4$. Na podstawie wyników prób sprawdzamy hipotezę $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$, wobec hipotezy alternatywnej $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$. Wyniki obliczeń dla modelu trwałości ostrza przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki obliczeń statystyki F dla modelu trwałości ostrza

F	1,5563
p	0,7251

Ponieważ p jest większe od 0,05 brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy o jednorodności wariancji dla badanego przypadku.

Badamy dwie populacje mające rozkłady normalne $N(m_1, \sigma_1)$ oraz $N(m_2, \sigma_2)$, odchylenia standardowe są nieznane, ale jednakowe, tzn. zachodzi $\sigma_1 = \sigma_2$. Na podstawie dwóch prób o liczebnościach $n_1=4$ i $n_2=4$ weryfikujemy hipotezę $H_0: m_1 = m_2$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: m_1 \neq m_2$. Z wyników obu prób obliczamy wartości średnie \bar{x}_1 i \bar{x}_2 oraz wariancje s_1^2 i s_2^2 , a następnie wartość statystyki t według zależności:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (2)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki obliczeń statystyki t dla modelu trwałości ostrza

t	-0,2566
p	0,8060

Poziom istotności p dla badanych modeli jest większy od 0,05, czyli brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy o równości średnich. Pokazano zatem, na poziomie istotności 0,05, że średnie wartości z badań i z modelu nie różnią się istotnie. Dlatego można uznać, iż wyznaczony model trwałości ostrza odzwierciedla zmiany przedstawione za pomocą wartości empirycznych.

4. Okres trwałości ostrza jako funkcja parametrów skrawania

W tabelach 8 - 10 przedstawiono wartości okresu trwałości ostrza T , w zależności od przyjętych technologicznych parametrów skrawania w procesie toczenia stali duplex, obliczone na podstawie równania (1).

Tabela 8. Wartości okresu trwałości ostrza T dla zależności $T = f(a_p)$ dla $v_c = 50 \div 150$ m/min i $f = 0,2 \div 0,4$ mm/obr otrzymane dla głębokości skrawania $a_p = 1$ mm, $a_p = 2$ mm, $a_p = 3$ mm

Lp.	v_c [m/min]	f [mm/obr]	$T_{(a_p=1)}$ [min]	$T_{(a_p=2)}$ [min]	$T_{(a_p=3)}$ [min]
1	50	0,2	54,702	49,108	55,667
2		0,3	54,395	44,036	45,829
3		0,4	62,098	46,972	44,000
4	100	0,2	37,768	32,321	39,028
5		0,3	30,895	20,683	22,624
6		0,4	32,032	17,054	14,229
7	150	0,2	47,761	42,463	49,317
8		0,3	34,323	24,259	26,347
9		0,4	28,894	14,065	11,387

Tabela 9. Wartości okresu trwałości ostrza T dla zależności $T = f(v_c)$ dla $f = 0,2 \div 0,4$ mm/rev i $a_p = 1 \div 3$ mm otrzymane dla prędkości skrawania $v_c = 50$ m/min, $v_c = 100$ m/min, $v_c = 150$ m/min

Lp.	f [mm/obr]	a_p [mm]	$T_{(v_c=50)}$ [min]	$T_{(v_c=100)}$ [min]	$T_{(v_c=150)}$ [min]
1	0,2	1	54,702	37,768	47,761
2	0,3		54,395	30,895	34,323
3	0,4		62,098	32,032	28,894
4	0,2	2	49,108	32,321	42,463
5	0,3		44,036	20,683	24,259
6	0,4		46,972	17,054	14,065
7	0,2	3	55,667	39,028	49,317
8	0,3		45,829	22,624	26,347
9	0,4		44,000	14,229	11,387

Tabela 10. Wartości okresu trwałości ostrza T dla zależności $T = f(f)$ dla $v_c = 50 \div 150$ m/min i $a_p = 1 \div 3$ mm otrzymane dla posuwu $f = 0,2$ mm/rev, $f = 0,3$ mm/rev, $f = 0,4$ mm/rev

Lp.	v_c [m/min]	a_p [mm]	$T_{(f=0,2)}$ [min]	$T_{(f=0,3)}$ [min]	$T_{(f=0,4)}$ [min]
1	50	1	54,702	54,395	62,098
2		2	49,108	44,036	46,972
3		3	55,667	45,829	44,000
4	100	1	37,768	30,895	32,032
5		2	32,321	20,683	17,054
6		3	39,028	22,624	14,229
7	150	1	47,761	34,323	28,894
8		2	42,463	24,259	14,065
9		3	49,317	26,347	11,387

Dane te mogą być przydatne technologom, jak także operatorom maszyn CNC.

5. Wnioski

Celem pracy było opracowanie metodyki dającej możliwość prognozowania okresu trwałości ostrza w procesie toczenia stali duplex. Prognozowanie wymaganego parametru okresu trwałości ostrza T w procesie toczenia na sucho jest istotną determinantą tego procesu. i wpływa na właściwości technologicznej warstwy wierzchniej. Wyniki niniejszego eksperymentu mogą być z powodzeniem stosowane w procesie toczenia stali duplex ostrzami z węgla spiekanego powlekanego. Sformułowano następujące wnioski:

1. Opracowano model równania drugiego stopnia prognozujący okres trwałości ostrza za pomocą metody powierzchni odpowiedzi dla toczenia stali duplex ostrzami z węgla spiekanego powlekanego.
2. Opracowane równania pokazują, że prędkość skrawania była głównym czynnikiem wpływającym na okres trwałości ostrza.
3. Przewidywane wartości oraz wartości pomiarowe są bardzo bliskie, co wskazuje, że opracowany model prognozowania okresu trwałości ostrza może być efektywnie stosowany do przewidywania trwałości narzędzia w procesie toczenia. Dzięki wykorzystaniu takich modeli można zaoszczędzić czas i koszty.

Literatura

- [1] Abou-El-Hossein K.A., Yahya Z. High-Speed End-Milling of AISI 304 Stainless Steels Using New Geometrically Developed Carbide Inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163, (2005), 596–602.
- [2] Akasawa T. et al. Effects of Free-Cutting Additives on the Machinability of Austenitic Stainless Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144, (2003), 66–71.
- [3] Bouzid Saï W., Lebrun J.L. Influence of Finishing by Burnishing on Surface Characteristics. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 12, (1), February 2003, 37.
- [4] Charles J. et al. Austenitic Chromium – Manganese Stainless Steel – A European Approach. *Materials and Applications Series*, Volume 12, Euro Inox 2010.
- [5] Ciftci I. Machining of Austenitic Stainless Steels using CVD Multi-Layer Coated Cemented Carbide Tools. *Tribology International*, 39(2006), 565–569.
- [6] Cunat P.J. *The Euro Inox Handbook of Stainless Steel. Materials and Applications Series, Volume 1, Euro Inox 2002.*

- [7] Cunat P.J. Working with Stainless Steel. Materials and Applications Series, Volume 2, EDP Sciences and Euro Inox 2009.
- [8] Kosmač A. Electropolishing Stainless Steel. Materials and Applications Series, Volume 11, Euro Inox 2010.
- [9] Montgomery D. Design and Analysis of Experiments, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2003.
- [10] Olszak W. Obróbka skrawaniem. WNT, Warszawa 2008.
- [11] Paro J. et al. Tool Wear and Machinability of X5CrMnN 18 18 Stainless Steels. Journal of Materials Processing Technology, 119, (2001), 14-20.
- [12] Polański Z. Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN, Warszawa 1977.
- [13] Sahin Y., Riza Motorcu A. Surface Roughness Model for Machining Mild Steel with Coated Carbide Tool. Materials & Design, 26 (2005), 321–326.
- [14] Smith G.T. Cutting Tool Technology, Industrial Handbook. London: Springer -Verlag, 2008.
- [15] StatSoft, Inc. (2009). STATISTICA (data analysis software system), version 9.0. www.statsoft.com

PhD. Eng. Grzegorz Królczyk

Faculty of Production Engineering and Logistics
Opole University of Technology
76 Prószkowska street, 45-758 Opole, Poland
E-mail: g.krolczyk@po.opole.pl

Prof. DSc. PhD. Eng. Maksymilian Gajek

Faculty of Production Engineering and Logistics
Opole University of Technology
76 Prószkowska street, 45-758 Opole, Poland
E-mail: m.gajek@po.opole.pl

Prof. DSc. PhD. Eng. Stanislaw Legutko

Faculty of Mechanical Engineering and Management
Poznan University of Technology
3 Piotrowo street, 60-965 Poznan, Poland
E-mail: stanislaw.legutko@put.poznan.pl