

Evaluation of the cutting insert condition influence on the microstructure of surface layer after turning of Inconel 718 alloy

Ocena wpływu stanu ostrza na mikrostrukturę warstwy wierzchniej po toczeniu stopu Inconel 718

PIOTR SZABLEWSKI
TADEUSZ CHWALCZUK
TOMASZ DOBROWOLSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.12.111>

Research concerns the evaluation of the cutting insert condition on the microstructure of the surface layer after longitudinal turning of Inconel 718 alloy using carbide inserts. Value of the VB_c wear index after dry machining with variable feed f and depth of cut a_p was evaluated. White layer was observed up to 2,5 μm .

KEYWORDS: Inconel 718, white layer, inserts wear

Badano wpływ stanu ostrza na mikrostrukturę technologicznej warstwy wierzchniej po toczeniu wzdłużnym stopu Inconel 718 ostrzami węglukowymi. Oceniano wartość wskaźnika zużycia VB_c po toczeniu na sucho ze zmiennymi parametrami posuwu f oraz głębokości skrawania a_p . Zaobserwowano obecność białej warstwy na głębokości do 2,5 μm .

SŁOWA KLUCZOWE: Inconel 718, biała warstwa, zużycie ostrza

Wprowadzenie

Stopy żarowytrzymałe – takie jak Inconel czy Waspaloy – są szeroko stosowane w konstrukcjach silników lotniczych. Niestety, właściwości dzięki którym znajdują tak duże zastosowanie, przy okazji utrudniają ich obróbkę mechaniczną [1, 2]. Słaba skrawalność tych stopów objawia się m.in. krótką trwałością ostrzy skrawających, co bezpośrednio przekłada się na jakość warstwy wierzchniej (chropowatość obrobionej powierzchni, mikrostrukturę) [3].

Szczególne miejsce w ocenie stanu obrobionej powierzchni stopu Inconel 718 zajmuje pojęcie białej warstwy (*white layer*, BW). Ze względu na swoje właściwości BW stanowi często krytyczny element technologicznej warstwy wierzchniej (TWW), który wpływa na właściwości eksploatacyjne krytycznych części konstrukcji.

Biała warstwa ukształtowana w procesie obróbki mechanicznej stopu Inconel 718 po utwardzeniu wydzieleniowym to przede wszystkim nanokrystaliczne ziarna o wielkości 50÷100 nm [4], których wielkość przed obróbką wynosiła ok. 23 μm . Można również zaobserwować obszary nierównomierności powierzchni z licznymi dyslokacjami z ziarnami o wielkości ok. 200 nm. W białej warstwie występuje głównie umocniona faza γ , faza γ' $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ oraz δ typu Ni_3Nb [4].

Mechanizm powstawania białej warstwy w procesie skrawania jest związany z pojawianiem się wysokich temperatur, odkształcenia plastycznego warstwy skrawanej oraz reakcji chemicznych [5], co niewątpliwie wynika ze stanu krawędzi ostrza. Co więcej, prowadzenie obróbki używającym narzędziem wywołuje znaczne naprężenia w warstwie wierzchniej (WW) [6, 7].

Wykazano, że podczas konwencjonalnego toczenia stopu Inconel 718 przy powierzchni obrobionego materia-

łu obserwuje się naprężenia rozciągające, następnie – do określonej głębokości – naprężenia ściskające. Wartości tych naprężeń zależą od parametrów skrawania i geometrii ostrza, a przede wszystkim – od wartości promienia zaokrąglenia r_n .

Autorzy pracy [8] wykazali, że zastosowanie chłodziwa zmniejsza głębokość występowania zmian naprężeń WW w porównaniu z obróbką na sucho. Podczas toczenia wykończeniowego stopu Inconelu 718 zaobserwowano, że głębokość wpływu oddziaływania ostrza na wartości naprężeń może się różnić o 0,15 mm w przedziale prędkości skrawania $v_c = 40\div 80$ m/min. Efekt ten jest związany z mniejszą deformacją warstwy skrawanej.

W przypadku wielu gatunków stopu Inconel 718 powstanie białej warstwy podczas obróbki jest nieuniknione. Kierunkiem współczesnych badań i zagadaniem do optymalizacji powinien być taki dobór parametrów i warunków skrawania, by uzyskać białą warstwę o założonej grubości i znanym charakterze. Stan wiedzy dotyczący powstawania tej charakterystycznej strefy w stopach na osnowie z niklu jest niewystarczający. Zwłaszcza dotyczy to toczenia stopu Inconel 718 po różnych obróbkach cieplnych.

Zakres, warunki i technika badań

Badania dotyczyły toczenia wzdłużnego wałka materiału Inconel 718 w stanie przesyconym o twardości 20 HRC. Stan mikrostruktury rdzenia przedstawiono na rys. 1.

Zastosowano płytki wielostrzowe WNMG 080408-PP z promieniem naroża $r_e = 0,8$ mm i powłoką TiCN/TiN (nanoszoną metodą PVD), oprawkę DWLNR 2525 M08 i ką przystawienia główny $\kappa_r = 95^\circ$. Próby toczenia przeprowadzono na tokarce uniwersalnej TUR560; nie stosowano cieczy chłodząco-smarującej.

Zdjęcia mikrostruktur wykonano mikroskopem EPI-PHOT 200 firmy Nikon. Próbkę inkludowano w duracrylu i po wypolerowaniu trawiono odczynnikiem Kallings.

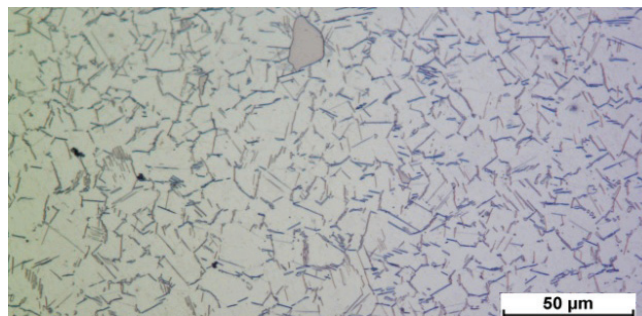


Fig. 1. Inconel 718 (20 HRC) microstructure in a transferred state
Rys. 1. Mikrostruktura Inconelu 718 (20 HRC) w stanie przesyconym

* Dr inż. Piotr Szablewski, piotr.szablewski@pwk.com.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2435-2126> – Pratt & Whitney Kalisz, Polska, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, Kalisz, Polska

Mgr inż. Tadeusz Chwalczuk, tadeusz.chwalczuk@put.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0002-4009-0552> – Politechnika Poznańska, Poznań, Polska

Mgr inż. Tomasz Dobrowolski, tomasz.dobrowolski@pwk.com.pl – Pratt & Whitney Kalisz, Polska

Chropowatość powierzchni rejestrowano na profilografometrze Hommel Tester T1000. Mierzono parametry chropowatości R_a i R_z według normy DIN, na odcinku pomiarowym $L_t = 4,80$ mm.

Analiza wyników badań

Na rys. 2–6 pokazano mikrostrukturę Inconelu 718 o twardości 20 HRC po toczeniu nowym ostrzem i ostrzami o zużyciu $VB_C = 0,12$ mm i 0,25 mm. W każdym z analizowanych przypadków można zaobserwować austenityczną mikrostrukturę stopu o wyraźnie zarysowanych granicach ziaren.

Cechą charakterystyczną stopu Inconel 718 jest obecność w strukturze twardych węglików niobu i tytanu. Wpływa to jednoznacznie na jakość obrobionej powierzchni [9]. Na rys. 2, po toczeniu nowym ostrzem, widać wyraźne odstępy związane z kinematyczno-geometrycznym charakterem odwzorowania ostrza w materiale. Na rys. 3, po toczeniu użytym ostrzem ($VB_C = 0,12$ mm), odstępy pomiedzy przejściami ostrza zanikają. Na obrobionej powierzchni pojawiają się ubytki materiału związane ze zjawiskiem adhezji pomiędzy ostrzem a wiórem oraz z efektem bocznego płynięcia materiału.

Jeszcze większe zmiany na obrobionej powierzchni następują po skrawaniu użytą płytką o $VB_C = 0,25$ mm (rys. 4 i 5). Przedstawiona mikrostruktura pokazuje nieskrawany materiał w postaci języków układających się zgodnie z kierunkiem prędkości posuwu. Natomiast

na rys. 6 widać mikropęknięcie oraz bardzo cienką (ok. $1,5 \mu\text{m}$) BW, o czym pisali m.in. autorzy pracy [10]. Warstwa ta w prezentowanych badaniach ma charakter obciążeniowy. Nie jest związana z występowaniem dodatkowych czynników chemicznych mogących wpływać na mikrostrukturę WW. Na podstawie analizy rys. 2–5 można jednoznacznie stwierdzić, że występowanie BW jest związane przede wszystkim ze stanem ostrza skrawającego. W wyniku postępującego zużycia krawędzi skrawającej nie jest możliwe uniknięcie jej generowania, tymczasem celem technologicznym powinno być unikanie nieciągłości objawiających się anomaliami powierzchni obrobionej.

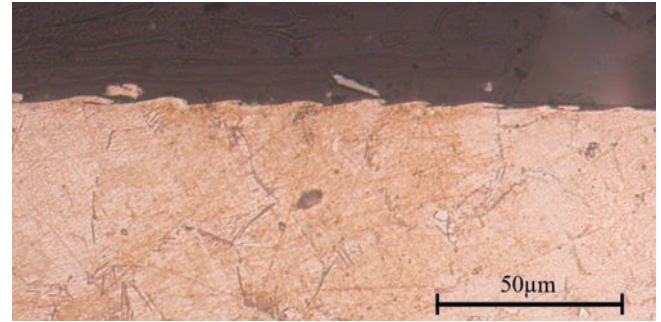


Fig. 4. Microstructure of Inconel 718 (20 HRC) after turning with WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0.05$ mm/rev, $a_p = 0.20$ mm, $VB_C = 0.25$ mm

Rys. 4. Mikrostruktura Inconelu 718 (20 HRC) po toczeniu płytką WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0,05$ mm/obr, $a_p = 0,20$ mm, $VB_C = 0,25$ mm

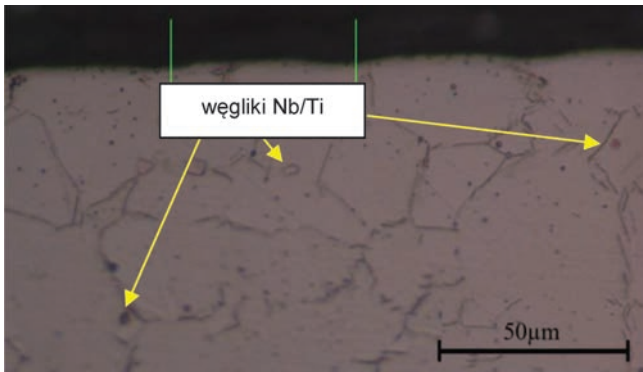


Fig. 2. Inconel 718 (20 HRC) microstructure after turning with WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0.05$ mm/rev, $a_p = 0.20$ mm, $VB_C = 0$ mm

Rys. 2. Mikrostruktura Inconelu 718 (20 HRC) po toczeniu płytką WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0,05$ mm/obr, $a_p = 0,20$ mm, $VB_C = 0$ mm

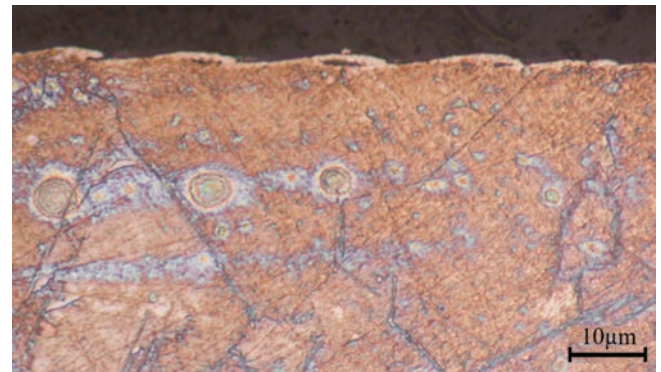


Fig. 5. Inconel 718 (20 HRC) microstructure after turning with WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0.05$ mm/rev, $a_p = 0.20$ mm, $VB_C = 0.25$ mm

Rys. 5. Mikrostruktura Inconelu 718 (20 HRC) po toczeniu płytką WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0,05$ mm/obr, $a_p = 0,20$ mm, $VB_C = 0,25$ mm

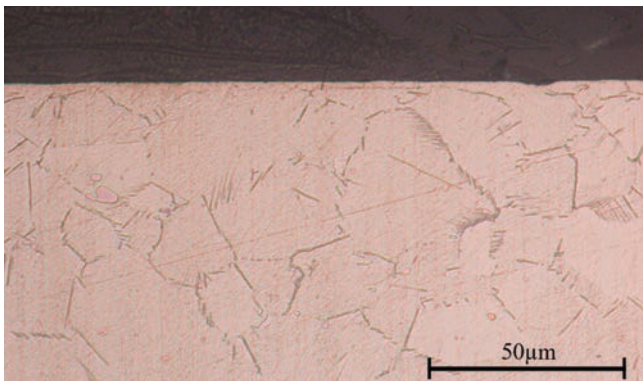


Fig. 3. Inconel 718 (20 HRC) microstructure after turning with WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0.05$ mm/rev, $a_p = 0.20$ mm, $VB_C = 0.12$ mm

Rys. 3. Mikrostruktura Inconelu 718 (20 HRC) po toczeniu płytką WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0,05$ mm/obr, $a_p = 0,20$ mm, $VB_C = 0,12$ mm



Fig. 6. Inconel 718 (20 HRC) microstructure after turning with WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0.05$ mm/rev, $a_p = 0.20$ mm, $VB_C = 0.25$ mm (visible microcracking)

Rys. 6. Mikrostruktura Inconelu 718 (20 HRC) po toczeniu płytką WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40$ m/min, $f = 0,05$ mm/obr, $a_p = 0,20$ mm, $VB_C = 0,25$ mm (widoczne mikropęknięcia)

Pod BW widać strefę odkształceń ziaren austenitu. Jest to typowy obraz związany z obciążeniem wynikającym z kontaktu ostrza z materiałem. Odkształcenie to wpływa na umocnienie TWW. Wzrost twardości powierzchni jest istotnym czynnikiem wpływającym na skrawalność stopu Inconel 718. Efekt umocnienia TWW opisano szczegółowo m.in. w pracach [3, 8].

Wartości parametrów chropowatości dla poszczególnych stanów ostrza zestawiono w tablicy, natomiast na rys. 7 zebrano profile chropowatości dla kolejnych przejść. Postępujące zużycie ostrza nie przyczyniło się do wzrostu wartości parametrów chropowatości R_a i R_z . Efekt ten można tłumaczyć zjawiskiem uplastycznienia i wgniataciem materiału nieskrawanego (będącego wynikiem pojawienia się narostu oraz bocznego płynięcia wióra). Może to być skutkiem wcześniej opisanych nieciągłości TWW.

TABLE. Roughness parameters of the machined surface of the Inconel 718 alloy with varying degrees of wear

TABLICA. Parametry chropowatości powierzchni obrabianej stopu Inconel 718 ostrzem o różnym stopniu zużycia

Wartość zużycia VB_C [mm]	R_a [μm]	R_z [μm]
0,19	0,79	3,84
0,34	0,64	3,85
0,55	0,58	3,80

Największą regularność kształtu profilu odnotowano dla powierzchni skrawanej ostrzem o najwyższym analizowanym stopniu zużycia. Charakter profilu dla początkowego stanu ostrza nie ma typowego odwzorowania ostrza związanego z kinematyką toczenia wzdłużnego. Efekt ten nie odzwierciedla się w obrazach mikrostruktury warstwy wierzchniej. Można przypuszczać, że narost na obrabianej powierzchni został usunięty w wyniku preparacji zglądu metalograficznego.

Badania wpływu wartości posuwu na zużycie ostrza skrawającego podczas toczenia materiału Inconel 718 potwierdziły, że wzrost posuwu sprzyja powstawaniu narostu na powierzchni natarcia w przy krawędzi skrawającej (rys. 8). Zmiana powierzchni styku ostrza z materiałem obrabianym sprzyjała intensyfikacji zjawiska adhezji. Problem oddziaływania narostu na jakość powierzchni obrabianej został poruszony m.in. w pracy [9].

Opisane nieciągłości WW czy też oderwane fragmenty obrabianej powierzchni, przedstawione na zglądach metalograficznych dla zużytego ostrza, wiążą się z rozwarstwieniem poszczególnych stref przypowierzchniowych.

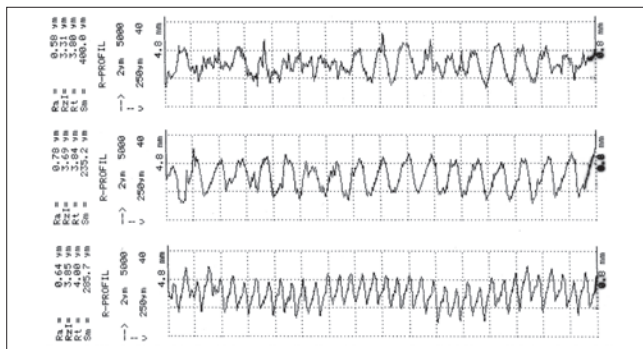


Fig. 7. Cross surface roughness profiles treated with cemented carbide IC3028: $v_c = 60$ m/min, $f = 0.105$ mm/rev, $a_p = 0.1$ mm; a) $VB_C = 0.19$ mm, b) $VB_C = 0.34$ mm, c) $VB_C = 0.55$ mm

Rys. 7. Profile chropowatości poprzecznej powierzchni obrabianej płytką z węgla spiekane IC3028: $v_c = 60$ m/min, $f = 0,105$ mm/obr, $a_p = 0,1$ mm; a) $VB_C = 0,19$ mm, b) $VB_C = 0,34$ mm, c) $VB_C = 0,55$ mm

Zaobserwowano przede wszystkim delaminację BW od odkształconej struktury austenitycznej materiału pierwotnego. Intensywność powstawania narostu na obrabianej powierzchni w początkowej fazie pracy ostrza maleje, a w tym samym momencie rośnie udział narostu na krawędzi skrawającej.

Podsumowanie

Podczas toczenia Inconelu 718 zauważono, że na ostrzach skrawających powstaje narost. Jest on uzależniony od wartości posuwu – jego wzrost powoduje wzrost narostu. Zbadane mikrostruktury pokazują niebezpieczne zjawisko powstawania mikropęknięć na obrabianej powierzchni wraz z rosnącym zużyciem na powierzchni przyłożenia.

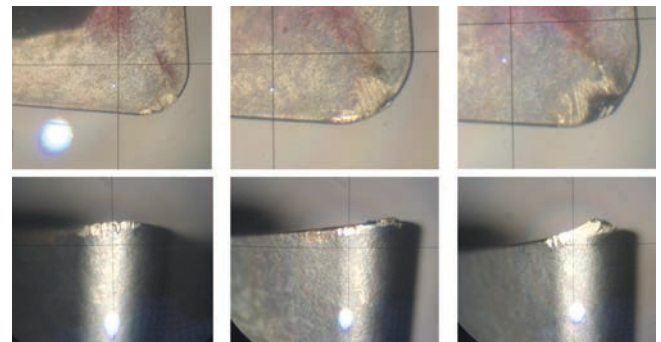


Fig. 8. IC3028 blade wear after turning Inconel 718 (20 ± 2 HRC): $a_p = 0.25$ mm, $v_c = 60$ m/min; a) $f = 0.05$ mm/rev, b) $f = 0.105$ mm/rev, c) $f = 0.21$ mm/rev

Rys. 8. Zużycie ostrza IC3028 po toczeniu Inconelu 718 (20 ± 2 HRC): $a_p = 0,25$ mm, $v_c = 60$ m/min; a) $f = 0,05$ mm/obr, b) $f = 0,105$ mm/obr, c) $f = 0,21$ mm/obr

LITERATURA

- [1] Leshock C.E., Kim J.N., Shin Y.C. "Plasma enhanced machining of Inconel 718: modeling of workpiece temperature with plasma heating and experimental results". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 41 (2001): 877–897, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00106-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00106-1).
- [2] Nalbant M., Altin A., Gökaya H. "The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys". *Materials & Design*. 28 (2007): 1334–1338, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.12.008>.
- [3] Szablewski P., Chwalczuk T. "Ocena morfologii powierzchni obrabianej stopu Inconel 718 po toczeniu wzdłużnym". *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 295, Mechanika 89, RUTMech. XXXIV, 89, 3/17 (lipiec–wrzesień 2017): 379–384, <https://doi.org/10.7862/rm.2017.34>.
- [4] Bushliya V., Zhou J.M., Lenrick F., Avdovic P., Stäl J.-E. "Characterization of White Layer Generated when Turning Aged Inconel 718". *1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), Procedia Engineering* 19, (2011): 60–66, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.080>.
- [5] Bosheh S.S., Mativenga P.T. "White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 46 (2006): 225–233, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.04.009>.
- [6] Sharman A.R.C., Hughes J.I., Ridgway K. "The effect of tool nose radius on surface integrity and residual stresses when turning Inconel 718™". *Journal of Materials Processing Technology*. 216 (2015): 123–132, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.002>.
- [7] Jafarian F., Amirabadi H., Sadri J. "Experimental measurement and optimization of tensile residual stress in turning process of Inconel 718 superalloy". *Measurement*. 63 (2015): 1–10, <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9737-3>.
- [8] Dudzinski D., Devillez A., Moufki A., Larrouquiere D., Verrouki V., Vigneau J. "A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 44, (2004): 439–456, <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9737-3>.
- [9] Mohsan A.U.H., Zhanqiang L., Padhy K.G. "A review on the progress towards improvement in surface integrity of Inconel 718". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 91, 1–4 (2017): <https://doi.org/107-125>, <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9737-3>.
- [10] Axinte D.A., Andrews P., Li W., Gindy N., Withers P.J. "Turning of advanced Ni based alloys obtained via powder metallurgy router". *Annals of the CIRP*. 55/1 (2006): 117–120, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60379-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60379-5).