

TECHNOLOGIA GŁADZENIA OTWORÓW WALCOWYCH W TARCZY TURBINY Z NADSTOPU NIKLU ZAPEWNIAJĄCA INTEGRALNĄ POWIERZCHNIĘ

Jacek MICHALSKI

W artykule przedstawiono warunki i parametry gładzenia nadstopu niklu PWA 1113, osełkami z zielonego węgliku krzemu ze spoiwem ceramicznym, zapewniającą integralność warstwy wierzchniej. Przedstawiono charakterystykę chropowatość profilu i charakterystykę chropowatości powierzchni otworów wierconych, wytaczanych oraz następnie gładzonych. Określono wartość średnicy i wysokość chropowatości profilu powierzchni otworów, w okresie trwałości oselek. Zamieszczono mikrostrukturę strefy podpowierzchniowej po tych operacjach. Parametry testu zarysowania powierzchni otworu, potwierdziły badania metalograficzne strefy podpowierzchniowej warstwy wierzchniej w tym rozróżnienie gładzenia bez odkształceń plastycznych oraz gładzenia z odkształceniami plastycznymi i białą warstwą.

1. WSTĘP

Materiałowe charakterystyki powierzchni są ważne zwłaszcza w turbinach, gdzie skazy powierzchni i wady strefy podpowierzchniowej warstwy wierzchniej mogą odgrywać kluczową rolę w trwałość elementu [1], wytrzymałości zmęczeniowej [2, 3] i odporności na korozję [4]. Gładzenie i rozwiercanie znajduje największe zastosowanie w obróbce wykończeniowej otworów walcowych w elementach z nadstopów niklu. Kluczowymi wymaganiami jakości technologicznej są; brak w strefie podpowierzchniowej odkształceń plastycznych i białej warstwy oraz odpowiednio niska wysokość chropowatości powierzchni, wartość średnicy otworu o małym polu tolerancji i małych wartościach odchyłek położenia i kształtu. Gładzenie może zwiększyć niskocyklową wytrzymałość zmęczeniową elementów z Inconelu 718 [5]. Z kolei wytrzymałość zmęczeniowa części maszyn po obróbce elektrochemicznej jest o 50% niższa niż po rozwiercaniu [3].

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Obróbki ubytkowe stopów niklu wywołują w strefie podpowierzchniowej warstwy wierzchniej odkształcenie plastyczne, pęknięcia, duże różnice mikrotwardości [6], zmianę naprężeń własnych [7], zmiany mikrostruktury, przemiany fazowe [1, 8, 9], twardą białą warstwą [10, 11, 12, 13].

Stwierdzono podczas toczenia Inconelu 713, przesyconego i starzonego o twardości 42-44 HRC, duże zwiększenie wysokości chropowatości powierzchni z zastosowaniem płytki ostrzowej zużytej z węglików wolframu (WC), pokrytej powłoką TiAlN-TiN, technologią PVD, oraz niewielkie jej zwiększenie dla płytki ostrzowej rodzaju CBN170. Wysokość chropowatości toczonej tymi płytkami jest zbliżona w początkowym okresie obróbki. Jednak występuje znacznie większe zużycie ścierny ostrzy z CBN170 niż z węglików WC. Jednocześnie ostrza z CBN170 zapewniają względnie mniejsze zwiększenie nanotwardości i odkształcenia plastycznego składników mikrostruktury materiału oraz większe zwiększenie naprężeń własnych, niż występujące podczas toczenia za pomocą płytek z WC. Wyniki uzyskano podczas skrawania z szybkością: płytkami CBN170; 200-300 m/min oraz płytkami z WC; 60-90 m/min [14]. Obrobione powierzchnie osiągają po toczeniu korzystne, dopuszczalne wartości: grubości strefy odkształcenia plastycznego powierzchni, naprężeń własnych ściskających, mikrotwardości, rozmazania materiału. Uzyskano je dla wysokich prędkości skrawania ~300 m/min, najniższych prędkość posuwu $\leq 0,05$ mm/obr i umiarkowanej głębokość skrawania $\leq 0,5$ mm w połączeniu z małym promieniem zaokrągleniem krawędzi płytek z PCBN [15].

Rozwiercanie otworu okazało się skuteczną, prostą i taną obróbką wykończeniową, usuwającą niepożądane właściwości materiału wywołane przez niewłaściwy proces wiercenia, pod warunkiem zapewnienia odpowiedniego naddatku obróbkowego materiału. Naddatek obróbkowy rozwiercania wynoszący 0,050-0,125 mm zapewnia zeskrwanie uszkodzonej strefy podpowierzchniowej warstwy wierzchniej Inconelu RR1000, otrzymanej w procesie obróbki zgrubnej wierceniem (jego wartość 0,025-0,050 mm jest niewystarczająca), pozostawiając nieznaczną warstwę odkształconą plastycznie 3-4 μm . Po wierceniu naprężenia własne są dodatnie, duże 1000-2000 MPa, większe wzdłuż tworzącej otworu, oraz przyjmują większe wartości dla większej głębokości otworu, do

badanej wartości 5 mm. Odształcenie plastyczne materiału nadstopu niklu RR1000 poddanego wierceniu jest największe wzdłuż obwodu otworu [16]. Zmiany strefy podpowierzchniowej warstwy wierzchniej podczas wiercenia Inconelu 718 wynikają z obciążenia termomechanicznego, powodującego odształcenie plastyczne i rozdrobnienie ziaren mikrostruktury metalograficznej, a są wywołane nadmiernym lokalnym ścinaniem materiału [17].

Biała warstwa po wierceniu otworów jest nieciągła, o grubości $\leq 10 \mu\text{m}$ oraz ma miejscowe zdeformowane granice ziaren [11]. W decydującym stopniu na jej powstawanie ma wpływ ciecz obróbkowa, geometria narzędzia, posuw i prędkość skrawania [17]. Głębokość zmiany struktury Inconelu 713, tzw. białej warstwy, jest zależna od prędkości toczenia i zużycia ostrza z ceramiki $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiCw}$. Biała warstwa ma niezmienną fazę γ' tj. $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ [18].

Po rozwiercaniu otworów, naprężenia własne mają zbliżoną wartość ujemną (-500) MPa, wzdłuż tworzącej i jego obwodu. Najmniejsze ujemne naprężenia stwierdzono dla promienia krawędzi skrawającej ostrzy $50 \mu\text{m}$ [19]. Axinte i Andrews [20] przypisują wzrost białej warstwy dużemu miejscowemu nagrzananiu, w wyniku oporu tarcia i niskiej przewodności cieplnej materiału.

Gładzenie osełkami z węgla krzemu zielonego, małej ziarnistości, w warunkach samoostrzenia z odpowiednim płynem obróbkowym umożliwia uzyskanie konforemnej powierzchni otworu w nadstopie niklu, Inconelu 718 [21]. Większą wydajność gładzenia uzyskuje się poprzez zastosowanie osełek z odmiennym rodzajem ścierniwa, aniżeli dla wszystkich osełek z jednego ich rodzaju [22].

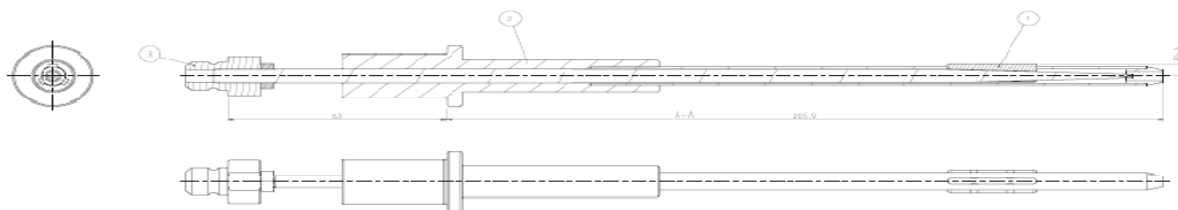
3. METODYKA BADAŃ

Materiałem tarcz turbin był żarowytrzymały nadstop niklu, wykonany technologią proszków spiekanych, poddany następnie kuciu próżniowemu, o symbolu PWA 1113. Po obróbce cieplnej granica wytrzymałości, próbek z tego materiału, wynosiła 727 MPa, umowna granica plastyczności 326 MPa, wydłużenie 45% i twardości 82 HRB. Skład chemiczny procentowy wagowo zawierał: 56,763 Ni, 16,5 Cr, 14 Co, 4,08 Mo, 4,50 Ti, 4,02 Al, 0,07 Zr, 0,007 B, 0,06 Fe.

Kołnierze tarcz turbin o wysokości 4,572 mm nawiercano nawiertakiem o średnicy 12,7 mm i kącie wierzchołkowym 90° na głębokość 2 mm. Zapewniało to późniejszą, po wytaczaniu i gładzeniu, tolerancję położenia otworu 0,05 mm. Wiercenie przeprowadzano wiertłem dwustopniowym lufowym o średnicy 6,40 mm, ze stali szybko tnącej HSS 304 bez warstwy powlekanej firmy Iscar. Prędkość obrotowa wiertła wynosiła 830 obr/min i posuw wzdłużny 1,0 m/min. Płynem obróbkowym była wodna emulsja olejowa.

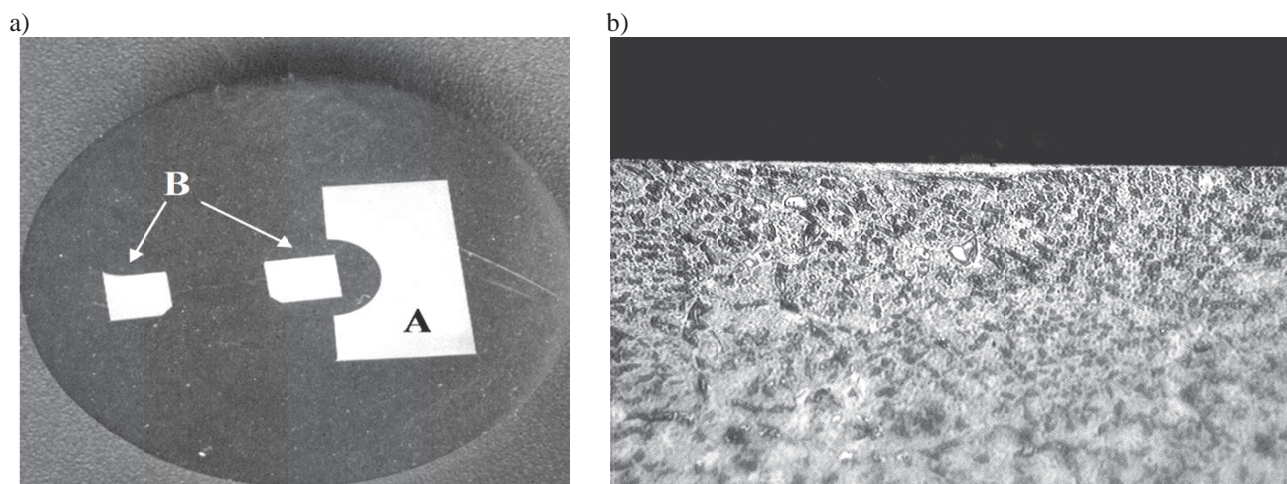
Wytaczanie otworu przeprowadzono wytaczadłem o średnicy 7,00 mm, z ostrzem z węgla spiekanego KC 7310 powlekanego metodą PVD warstwą TiAlN firmy Kennametal. W układzie narzędzia kąt przyłożenia ostrza wynosił 7° i kąt natarcia 16° . Prędkość wytaczania wynosiła 18,2 m/min, posuw 0,1 mm/obr i głębokość skrawania 0,3 mm. Fazy otworu $1/45^\circ$ i $0,3/45^\circ$ wykonano metodą wiercenia. Płynem obróbkowym była wodna emulsja olejowa. Narzędzia skrawające - wiertła i płytki ostrzowe, wymieniano na nowe po obróbce 16 otworów. Obróbkę skrawaniem przeprowadzono za pomocą centrum obróbkowego poziomego pięcioosiowego SH 8000 firmy Mori Seiki (Japonia).

Gładzenie przeprowadzono na obrabiarce pionowej MHS 840 sterowanej numerycznie firmy Sunnen Products Company. Głowica miała trzy osełki rozmieszczone na obwodzie co 120° (rys. 1).



Rys. 1. Głowica MMT021PS-Tool Sunnen AG A5197-200. Oznaczenia: 1 – korpus z osełkami, 2 – korpus łączący, 3 – rozpierek z uchwytem

Wysuwne listwy z osełkami ziarnistości 320 firmy Bates Technologies były w oprawie bakelitowej. Osełki ziarnistości 400 firmy Sunnen zostały przyklejone do stalowych korpusów - wysuwnych listew. Szerokość listew wynosiła 2,36 mm, długości 25,4 mm, wysokość 7,67 mm i kąt pochylenia powierzchni współpracującej z rozpierającym stożkiem $2^{\circ}\pm 15'$. Z kolei wysokość materiału ściernego wynosiła około 1 mm. Stosowano osełki z zielonego węgla krzemu: C320 KVA, C320 NVA, C320 OVA firmy Bates Technologies rodzaju FP4-24X1 oraz osełki C8 3, C8 5 firmy Sunnen Products Company. Średnia średnica ziaren wielkości 320 to 29 μm oraz wielkości ziaren 400 to 17 μm (według DIN ISO 6344). Twardość - miękka ma oznaczenie 3 oraz 5. Prędkość obrotowa głowicy wynosiła 590, 1000, 1041 obr/min, prędkość ruchu posuwisto-zwrotnego 65, 75, 100, 131, 200, 262 skoki/min. Taka kinematyka gładzenia powoduje kąt skrzyżowania rys gładzenia od $11,7^{\circ}$ do $72,2^{\circ}$ oraz drogę gładzenia podczas jednego skoku 180,3-25,4 mm. Długość skoku wynosiła 18,5 mm. Wybieg osełek z gładzonego otworu wynosił 19,7 mm. Oznacza to, że prędkość skrawania wynosiła od 13,5 m/min do 25,4 m/min oraz jej składowa obwodowa od 13,3 m/min do 23,4 m/min i składowa wzdłużna od 2,4 m/min do 9,7 m/min. Głowicę po zamocowaniu w gnieździe gładzarki pozycjonowano i osiowana (zapewnia to konstrukcja maszyny) do momentu uzyskania bicia promieniowego jej dolnej prowadnicy 0,05 mm. Tarcza turbiny była zamocowana w uchwycie obróbkowym, o zmiennym skokowo położeniu kątowym, wynikającym z położenia obrabianych otworów. Uchwyt tarczy turbiny zaopatrzone także w prowadnicę walcową, z którą podczas obróbki współpracował trzpień (korpus) dolny głowicy gładzarskiej. Dosuw szybki osełek do obrabianej powierzchni wynosił 1,778 mm/min. Stosowano dwie strategie dosuwu osełek do powierzchni otworu metodą przemieszczenia; jednostopniową ze stałą prędkością oraz dwustopniową o odmiennej prędkości w etapie pierwszym i drugim. Stosowano więc dosuw osełek jednostopniowy ze stałą prędkością wynoszącą 0,069, 0,07, 0,078, 0,089, 0,099 mm/min oraz dosuw dwu etapowy z odmienną prędkością. Wówczas w pierwszym etapie prędkość wynosiła 0,051, 0,069, 0,081, 0,102, 0,152 mm/min oraz w drugim 0,025, 0,041, 0,058 mm/min. Dosuw (posuw) wykończeniowy, drugiego etapu gładzenia trwał do momentu uzyskania średnicy 7,081 mm. Czyli naddatek obróbkowy na gładzenie w pierwszym etapie wynosił 0,081 mm oraz w drugim 0,082 mm.



Rys. 2. Zgłady metalograficzne otworu tarczy turbiny, a) makrofotografia, oznaczenia: A - przekrój prostopadły do osi otworu, B - przekrój wzdłuż osi otworu dwu przeciwległych jego boków, b) silnie zniekształcona plastycznie strefa podpowierzchniowa i biała warstwa, głębokość do 25 μm wzdłuż tworzącej wierconego otworu. Trawienie odczynnikami AG-21, powiększenie $\times 640$ (b)

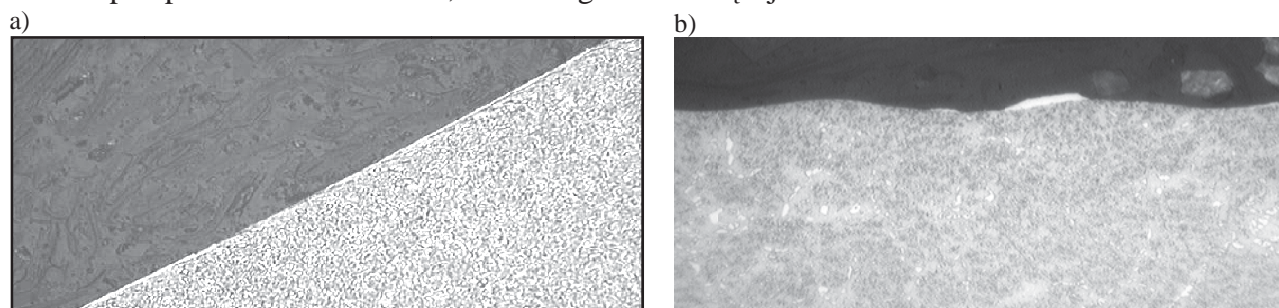
Dokonywano także badań gładzenia z łącznym naddatkiem obróbkowym 0,0864 mm, 0,1359 mm i 0,1448 mm oraz gładzenia dwustopniowego z naddatkiem obróbkowym drugiego etapu 0,0122 mm, 0,0355 mm i 0,0588 mm. Wyiskrzanie po drugim etapie gładzenia (gładzenie bez przyrostu dosuwu) trwało od 1 s do 5 s. Stosowano oleje do gładzenia: Honilo 980, Honilo 982 (lepkość kinematyczna 4,6 mm^2/s w 40 $^{\circ}\text{C}$) firmy Castrol, Ecocut HFN 5 LE i Ecocut HON 15 (lepkość

kinematyczna 4 i 4,3 mm²/s w 40 °C) firmy Fuchs, PMC 9214 (lepkość kinematyczna 7-10 mm²/s w 40 °C) firmy U.S. Oil Company, MB-30 (lepkość kinematyczna 22 mm²/s w 40 °C) i olej MAN-852-5 Honing Oil (lepkość kinematyczna 32 mm²/s w 40 °C) firmy Sunnen Products Company. Stwierdzono występowanie cząstek stałych, o wielkości powyżej 5 μm zarówno w zbiorniku chłodziwa jak i w układzie gładzarki, pomimo zastosowania filtrów o dokładności oczyszczania 5 μm. Stosowano program badań statyczny zdeterminowany selekcyjnie jednoczynnikowy. Badaniami gładzenia objęto 71 otworów.

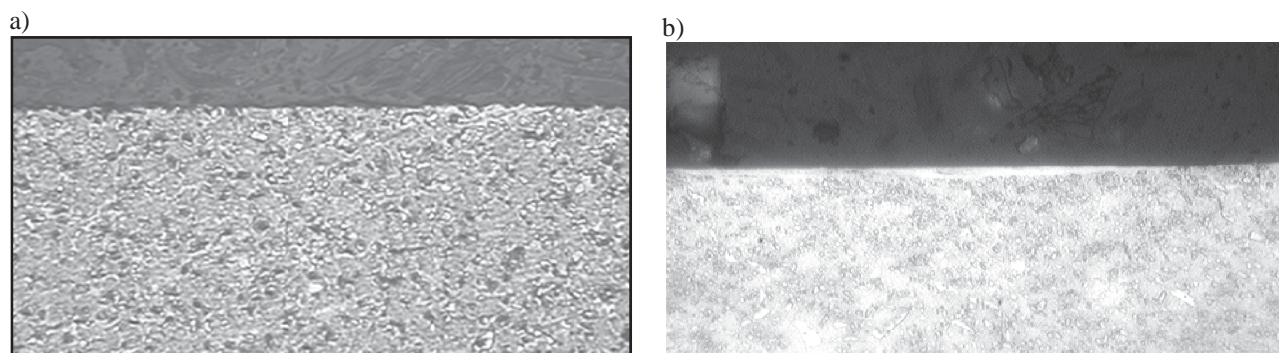
Średnicę otworów mierzono średnicówką Compact Geneva i współrzędnościową maszyną pomiarową Mitutoyo FN 1106. Pomiary okrągłości i walcowości przeprowadzono przyrządem pomiarowym Talyrond 3-PC Rank Taylor Hopson Limited. Palec pomiarowy miał promień 0,4 mm. Promień osiowy wynosił 1,2 mm. Stosowano trzpień pomiarowy efektywnej długości 63,5 mm. Rozstępy wartości powtarzanych pomiarów wzorca walcowego nie przekraczały 0,06 μm oraz ich odchylenie średnie wynosiło 0,02 μm.

Z kolei powierzchnię otworów mierzono profilometrem trójwymiarowym skanującym Talyscan 150 firmy Taylor Hobson. Korzystano z czujnika stykowego z końcówką stożkowa o promieniu 2 μm oraz programu Talymap 3D. Kwadratowy obszar pomiaru miał długości boków 1600 μm. Ścieżki pomiarowe były prostopadłe do osi otworu. Krok pomiaru wzdłuż tworzącej i obwodu powierzchni wewnętrznej otworu walcowego był jednakowy i wynosił 5 μm. Chropowatość powierzchni analizowano z zastosowaniem filtra powierzchni o granicznej długości 0,25 mm. Dyskretyzacja pionowa wynosiła 0,74 nm. Profil powierzchni wzdłuż tworzącej miał z kolei długość 2,4 mm. Krok próbkowania wynosił 0,25 μm. Chropowatość powierzchni wyodrębniono filtrem granicznym „splain Gauss” o granicznej długości λ_c=0,25 mm i λ_s=2,5 μm, przenoszenie 1:300. Dyskretyzacja pionowa wynosiła 16 nm.

Test rysy przeprowadzono urządzeniem Micro Scratch CSM Instruments z wgłębnikiem Vickersa o promieniu 200 μm. Obciążenie wynosiło 0,9 N, prędkość przemieszczania 1 mm/min. Pomiar przeprowadzono wzdłuż 1,5 mm długości tworzącej otworu.



Rys. 3. Zgłady metalograficzne wycięte wzdłuż tworzącej otworu tarczy turbiny, a) biała warstwa ciągła powierzchni wierzonej o grubości 2 μm, odkształcenie plastyczne słabe do 7 μm, zawinięcia na głębokości do 3 μm, fałdy i wyrwania pojedyncze do głębokości 1,5 μm, b) biała warstwa po wytaczaniu o głębokości do 41 μm. Trawienie odczynnikami AG-21 (a) i Kalling’a (b), powiększenie x320

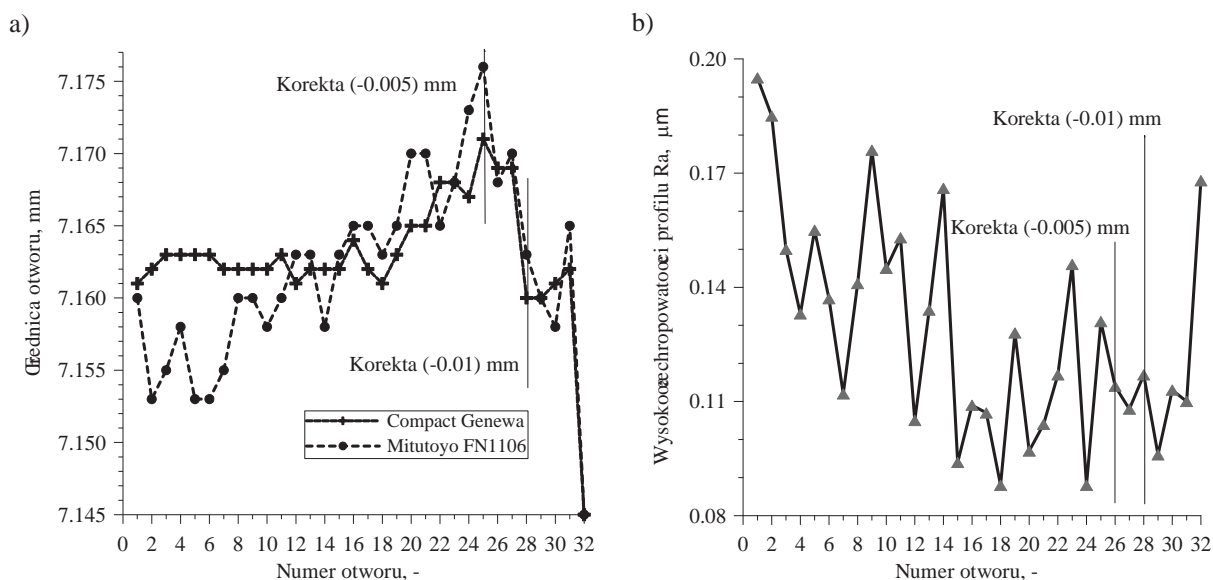


Rys. 4. Zgłady metalograficzne powierzchni gładzonej wycięte wzdłuż tworzącej otworu tarczy turbiny, a) strefa podpowierzchniowa bez wad, powiększenie x430, b) silnie zniekształcona strefa podpowierzchniowa i biała warstwa do głębokości 25 μm (gładzenie niepoprawne), powiększenie x620. Trawienie odczynnikami AG-21 (a) i Kalling’a (b)

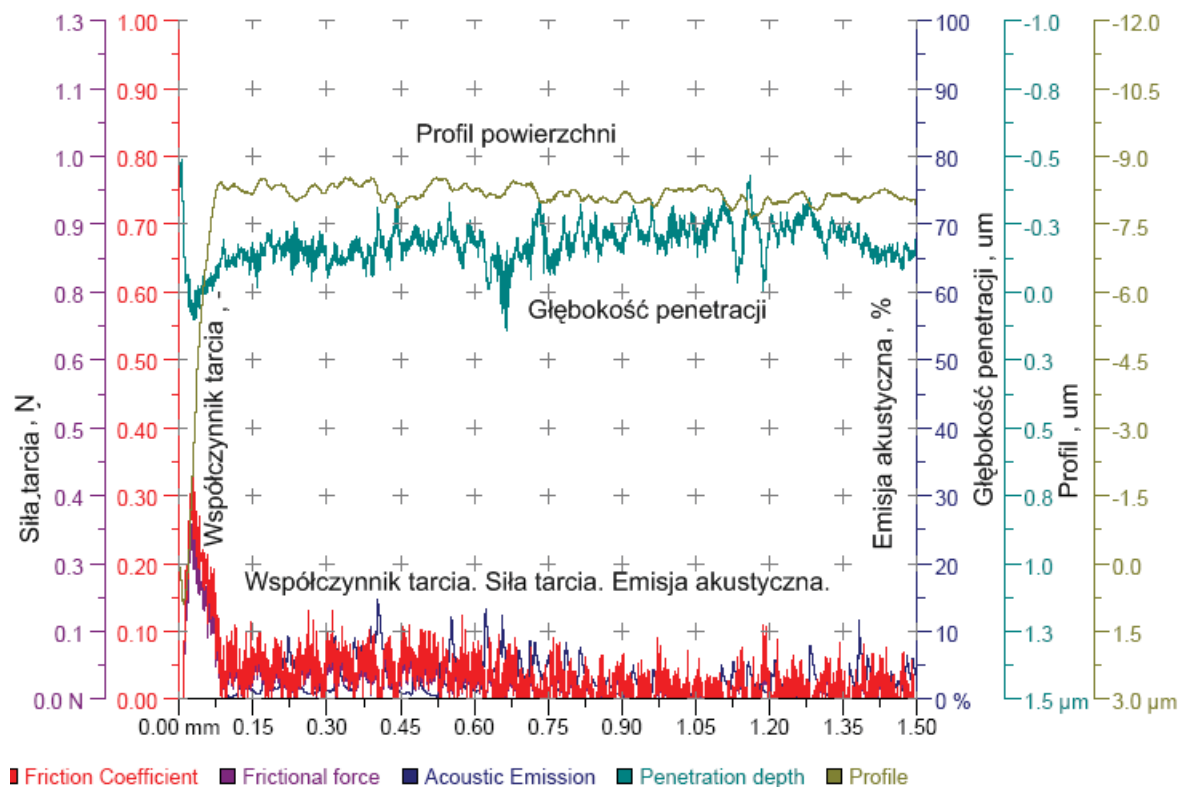
Zgłady metalograficzne szlifowane i polerowane trawiono roztworem Kalling'a zawierającego chlorek miedzi - 5g CuCl_2 , kwas solny - 100 ml HCl , alkohol etylowy - 100 ml. Stosowano także trawienie odczynnikami AG-21 składającym się z 61% kwasu mlekowego, 36% kwasu azotowego i 3% HF . Obserwacje prowadzono mikroskopem Carl Zeiss Jena, typu Neophot - 2. Z każdego otworu wykonano zgłady metalograficzne w dwu prostopadłych do siebie przekrojach, oznaczonych jako A i B na rysunku 2a.

4. WYNIKI BADAŃ

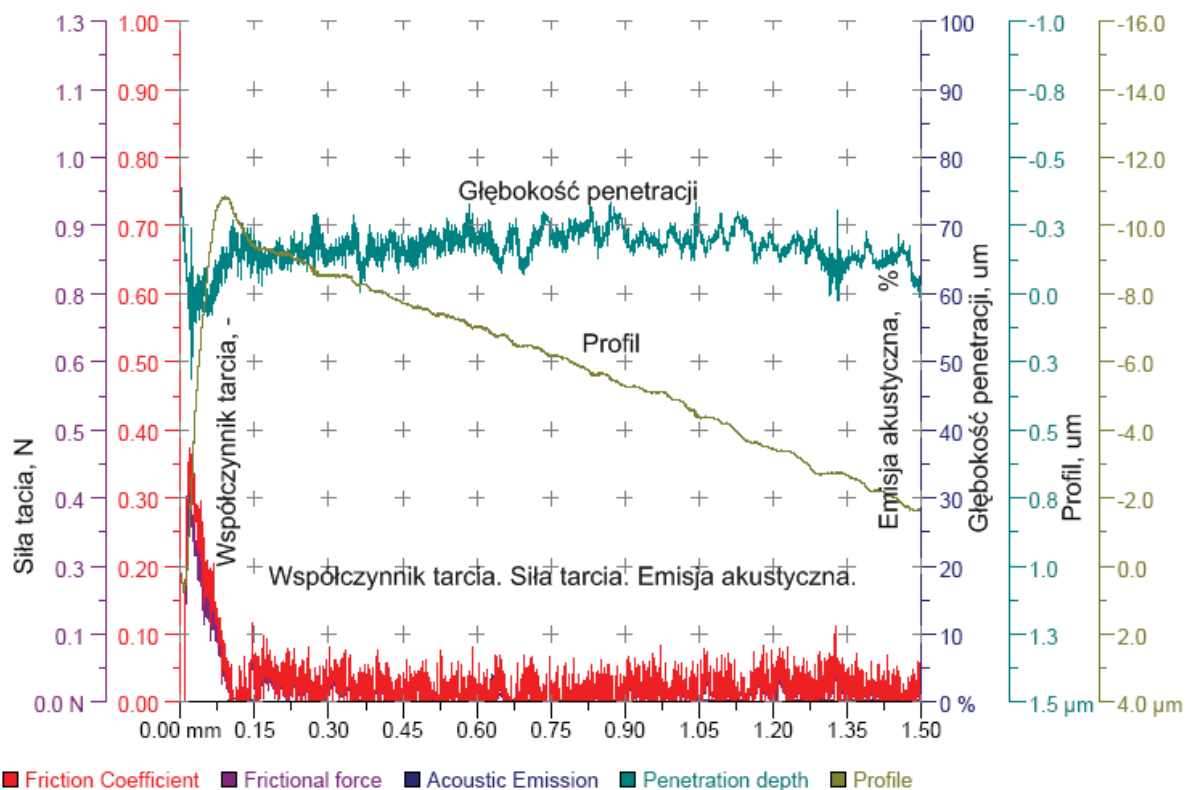
Odształcenia plastyczne i białą warstwę po wierceniu i wytaczaniu przedstawiono na rys. 2b i 3. Z kolei strefę podpowierzchniową po gładzeniu na rys. 4. Zastosowanie po wierceniu otworu ich wytaczania, wynikało z zapewnienia odchyłki położenia oraz umożliwiała samoostrzenie osełek. Ze względu na możliwość uzyskania korzystnego stanu strefy podpowierzchniowej przyjęto prędkość obrotową głowicy 1041 obr/min i prędkość ruchu posuwisto-zwrotnego 262 skoki/min. Długość skoku miała wartość 18,5 mm. Oznacza to, że prędkość skrawania wynosiła 25,4 m/min oraz jej składowa obwodowa 23,4 m/min i wzdłużna 9,7 m/min. Wybieg osełek z gładzonego otworu wynosił 19,7 mm, droga gładzenia 44,7 mm podczas jednego podwójnego skoku głowicy, kąt gładzenia $44,9^\circ$ oraz współczynnik wybiegu osełek 0,77. Zastosowano korzystny posuw jednostopniowy z prędkością 0,0686 mm/min, który trwał do uzyskania średnicy nominalnej 7,1628 mm. Posuw dwustopniowy zaś miał prędkości: pierwszy etap 0,1160 mm/min do uzyskania średnicy 7,0808 mm oraz drugi etap gładzenia 0,0254 mm/min, do średnicy nominalnej 7,1628 mm. Oznacza to że naddatek obróbkowy gładzenia wynoszący 0,1628 mm był podzielony i miał wartości: w pierwszym etapie 0,0808 mm i drugim 0,0820 mm. Stosując osełki z smarem stałym C320 KVA, C320 NVA i C320 OVA (oprawa bakelitowa) oraz cieczy obróbkowe Honilo 980, Honilo 982, Ecocut HFN 5 LE, Ecocut HON 15, PMC 9214, MB-30 zaistniała jedynie możliwość uzyskania strefy podpowierzchniowej: zniekształcenie



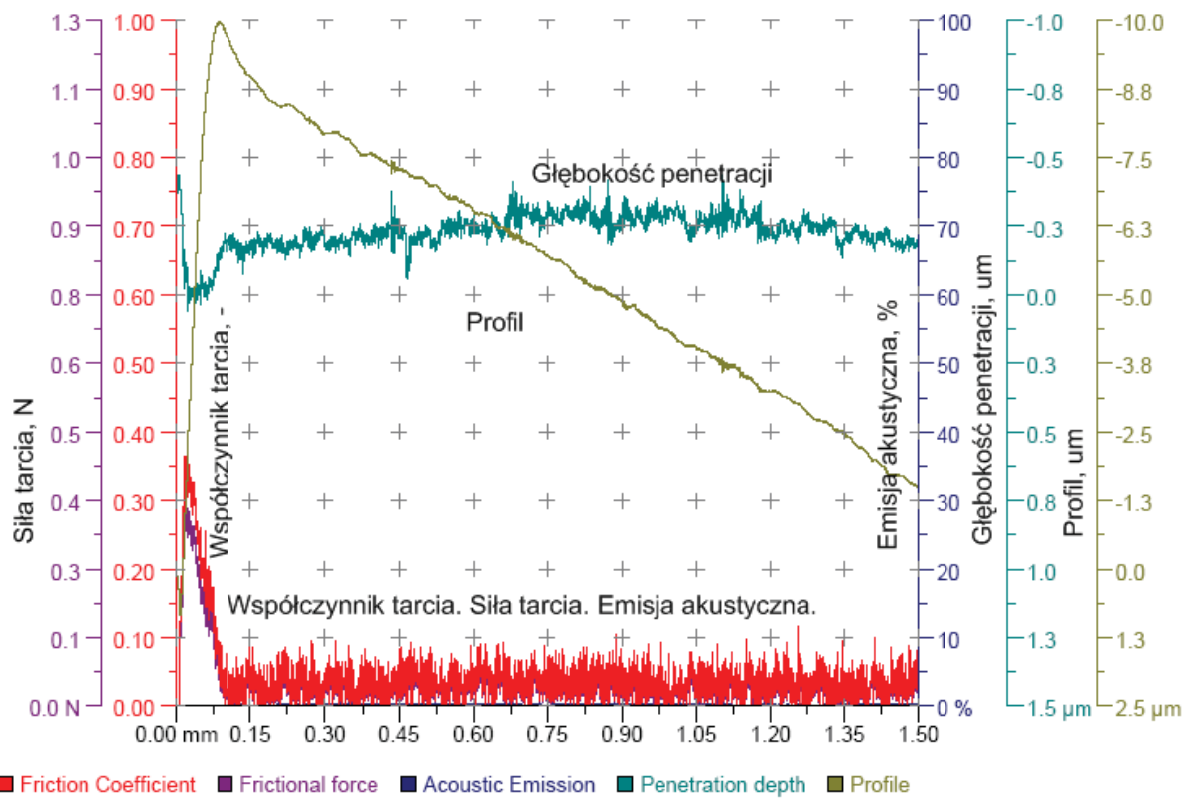
Rys. 5. Charakterystyka procesu gładzenia 31 otworów jednym kompletem trzech osełek C8 3 firmy Sunnen, a) wartości średnicy po gładzeniu zmierzonej średnicówką Compact Geneva i współrzędną maszyną pomiarową Mitutoyo FN 1106, b) wysokość chropowatości powierzchni 31 otworów określona parametrem Ra



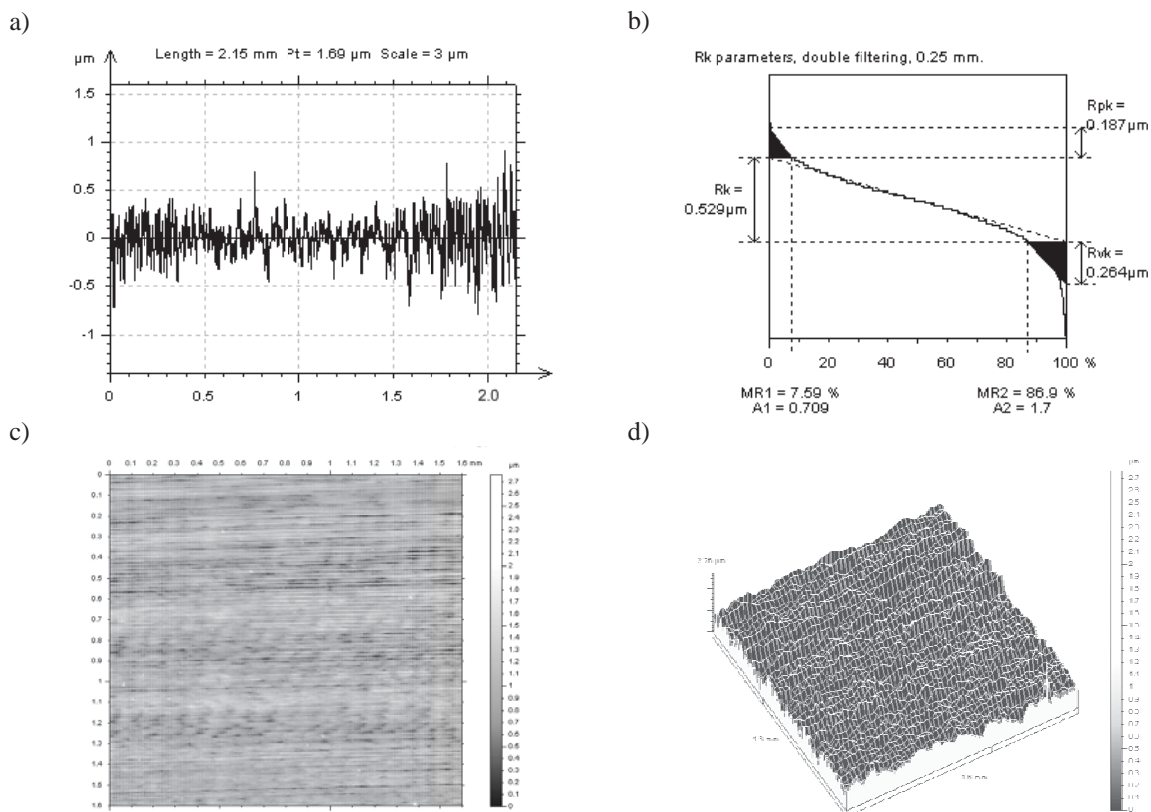
Rys. 6. Charakterystyka testu zarysowania powierzchni wierconej. Wgłębnik Rockwella o kulistym zakończeniu z promieniem 200 μm, siła obciążająca 0,9 N, długość rysy 1,5 mm



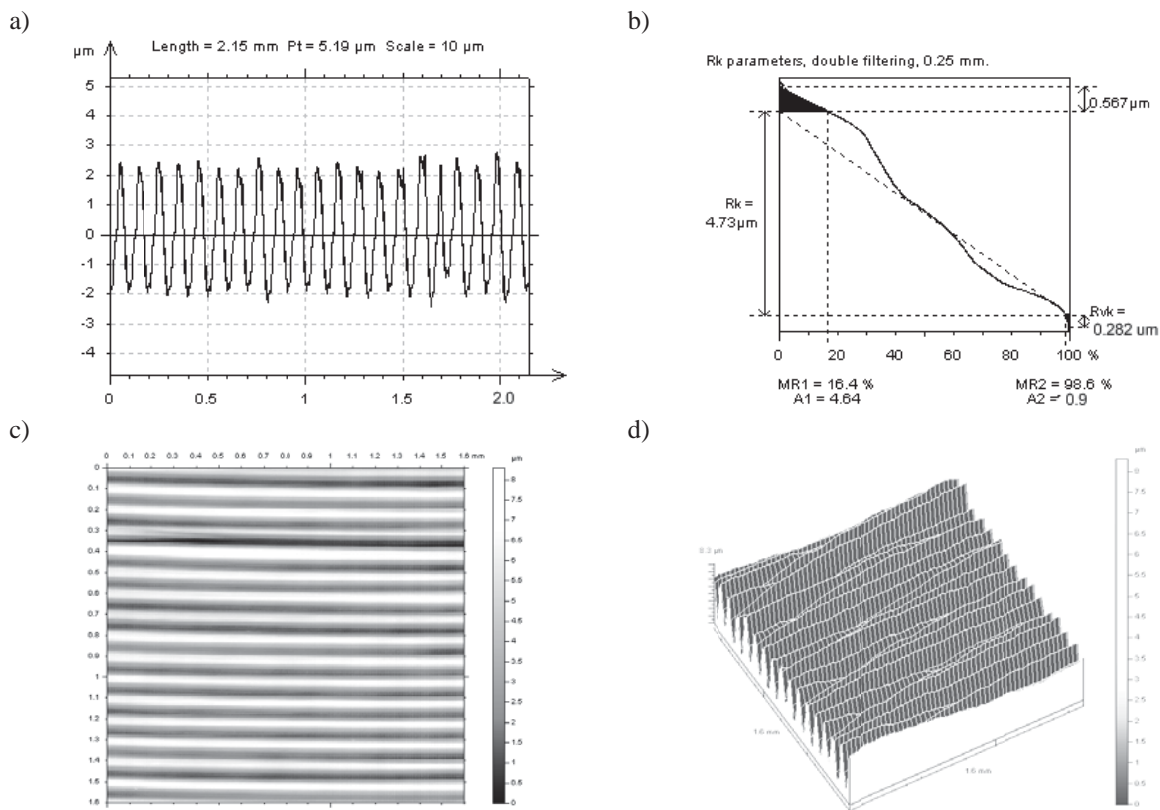
Rys. 7. Charakterystyka testu zarysowania powierzchni gładzonej poprawnie. Wgłębnik Rockwella o kulistym zakończeniu z promieniem 200 μm, siła obciążająca 0,9 N, długość rysy 1,5 mm



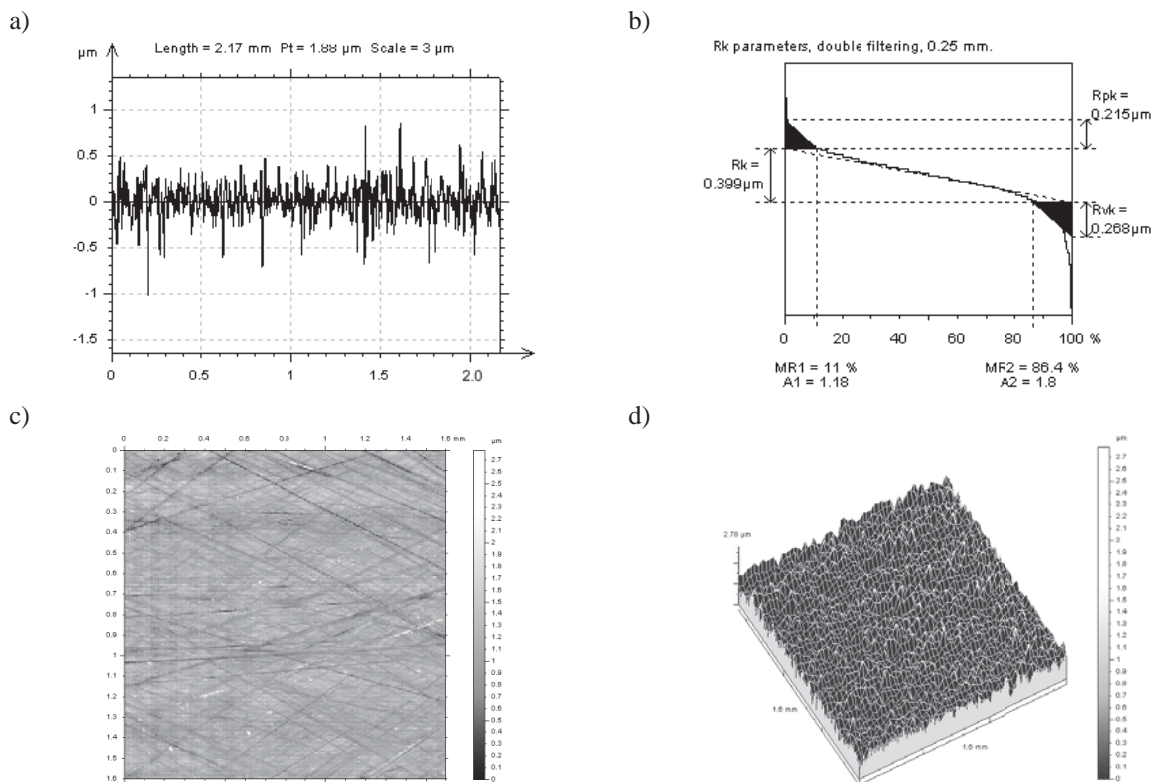
Rys. 8. Charakterystyka testu zarysowania powierzchni gładzonej z odkształceniem plastycznym i białą warstwą. Wgłębnik Rockwella o kulistym zakończeniu z promieniem 200 μm , siła obciążająca 0,9 N, długość rysy 1,5 mm



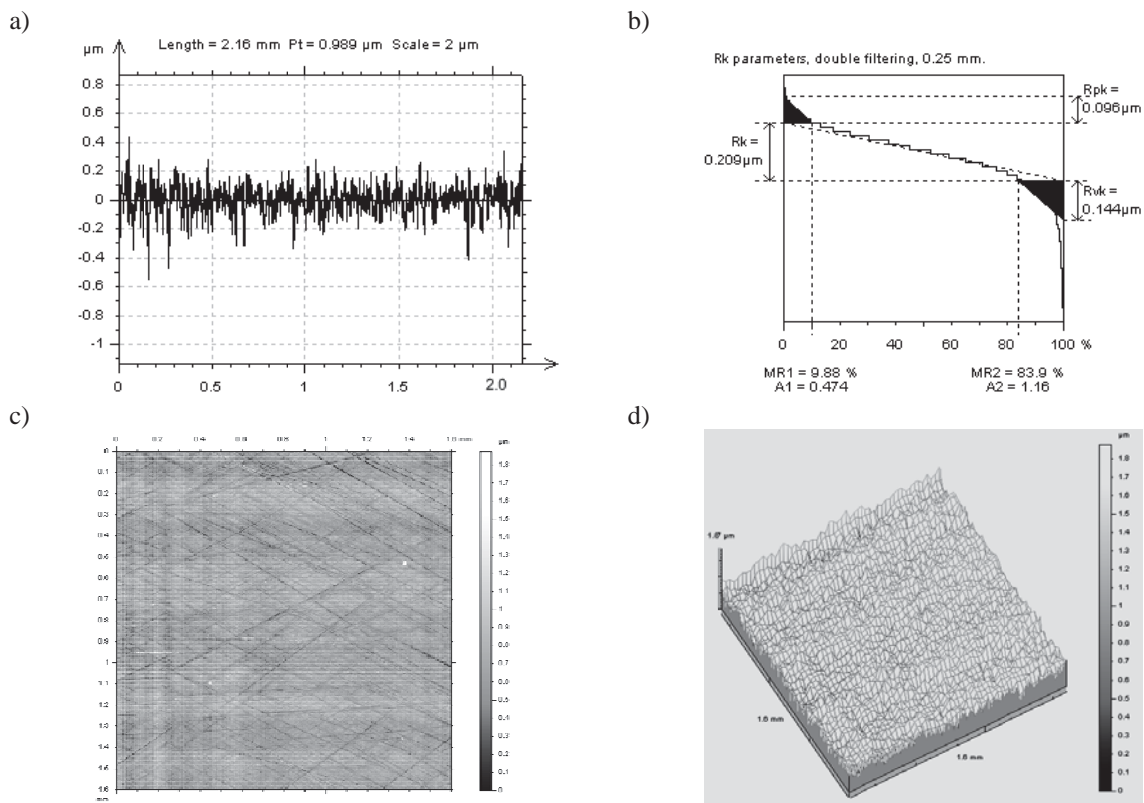
Rys. 9. Charakterystyka powierzchni otworu wierconego: profil wzdłuż tworzącej, b) krzywa Abbotta, c) topografia powierzchni, d) obraz izometryczny powierzchni



Rys. 10. Charakterystyka powierzchni otworu wytaczanego: profil wzdłuż tworzącej, b) krzywa Abbotta, c) topografia powierzchni, d) obraz izometryczny powierzchni



Rys. 11. Charakterystyka powierzchni otworu gładzonego bez odkształceń plastycznych i białej warstwy w strefie podpowierzchniowej: profil wzdłuż tworzącej, b) krzywa Abbotta, c) topografia powierzchni, d) obraz izometryczny powierzchni



Rys. 12. Charakterystyka powierzchni otworu gładzonego z odkształceniami plastycznymi i białą warstwą w strefie podpowierzchniowej: profil wzdłuż tworzącej, b) krzywa Abbotta, c) topografia powierzchni, d) obraz izometryczny powierzchni

Tabela 1. Parametry chropowości profilu powierzchni otworów z nadstopu PWA 1113

Parametry	Wiercenie	Wytaczanie	Gładzenie poprawne	Gładzenie niepoprawne
Ra, μm	0,223	1,567	0,153	0,085
Rp, μm	1,128	3,460	0,863	0,451
Rv, μm	1,034	3,300	1,055	0,564
Rq, μm	0,228	1,781	0,201	0,113
Rsk, -	-0,346	0,192	-0,408	-0,728
Rku, -	3,924	1,673	4,656	5,237
R Δ q, $^{\circ}$	4,471	7,276	4,867	3,459
Rsm, mm	0,023	0,102	0,016	0,012
Rfd, -	1,38	1,19	1,40	1,47
Rk, μm	0,691	4,163	0,164	0,244
Rpk, μm	0,382	1,579	0,194	0,111
Rvk, μm	0,247	0,507	0,274	0,169
Rmr1, %	11	29	10	8
Rmr2, %	91	98	89	86
Rpq, μm	0,325	1,411	0,183	0,095
Rvq, μm	0,275	1,184	0,378	0,211
Rmq, %	98	98	93	88

Tabela 2. Parametry chropowości powierzchni otworów z nadstopu PWA 1113

Parametry	Wiercenie	Wytaczanie	Gładzenie poprawne	Gładzenie niepoprawne
Sa, μm	0,18	1,66	0,16	0,12
Sq, μm	0,22	1,89	0,21	0,15
Sp, μm	1,78	4,16	1,67	1,20
Sv, μm	0,98	4,13	1,11	0,68
St, μm	2,76	8,29	2,78	1,88
Ssk, -	-0,23	0,12	-0,05	0,09
Sku, -	3,17	1,71	3,84	3,32

Sz, μm	1,79	8,08	2,53	
STp, % (poniżej 1 μm od najwyższego szczytu)	0	1,5	0,2	10
SHTp, μm (20%-80%)	0,38	4,12	0,34	0,25
Sds, szczytów/ mm^2	4731	1778	4189	4882
Str, -	0,0209	0,0372	0,1422	0,0689
Sal, mm	0,0142	0,0219	0,0094	0,0063
Std, $^\circ$	88,5	89	63,5	61,1
Sfd, -	2,68	2,48	2,63	2,72
Sdq, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0,0546	0,1421	0,0541	0,0468
Scs, 1/ μm	0,0132	0,0186	0,0145	0,0132
Sdr, %	0,15	0,96	0,15	0,11
Sk, μm	0,56	4,96	0,474	0,32
Spk, μm	0,15	0,89	0,187	0,14
Svk, μm	0,26	0,15	0,207	0,12
Sr1, %	8,67	20	10	11
Sr2, %	88	99	89	88

powierzchniowe słabe sporadycznie do 3,5 μm , linie odkształcenia plastycznego niewidoczne, zawinięcia lokalne do 2,5 μm , wyrwania pojedyncze do 2,5 μm .

Mniejsze wartości odkształceń plastycznych zapewniało gładzenie dwustopniowe, trwało ono także krócej. Odchyłki okrągłości i walcowości otworów wynosiły od 1 do 3 μm . Ostatecznie zastosowano olej MAN-852-5 HONING OIL oraz osetki C8 3 firmy Sunnen i powyższe parametry gładzenia dwustopniowego. Uzyskano po gładzeniu strefę podpowierzchniową nadstopu PWA 1113 bez odkształceń plastycznych i białej warstwy (rys. 4a). Olej MAN-852-5 jest mieszaniną tłuszczów zwierzęcych (olej otrzymano ze smalca - łożu) i estrów kwasów tłuszczonych. Kompletem osetek można bez wad strefy podpowierzchniowej wykonać obróbkę 31 otworów (rys. 5). Wymagana jest dla kolejnego gładzonego otworu 26, korekcja (zmniejszenie) nastawionej średnicy o (-5) μm i dla otworu 28 korekcja o (-10) μm . Z kolei następny otwór 32 ma zbyt małą średnicę 7,012-7,015 mm. Zwiększa się także wówczas wysokość chropowatości powierzchni, do wartości $R_a=0,17 \mu\text{m}$, jak również wysokość materiału ściernego listew jest bardzo mała. Cechą gładzenia kolejnych 31 otworów jest tendencja do zwiększania ich średnicy od 7,160 do 7,168 mm. Dla pierwszych 12 otworów obserwowano różnice średnic, określonych średnicówką i współrzędnościową maszyną pomiarową, co wynikało z ich odwzorowania odmiennymi promieniami kulistych końcówek pomiarowych dla zmiennej struktury geometrycznej powierzchni otworów. Ma miejsce także zmniejszanie wysokości chropowatości od $R_a=0,195 \mu\text{m}$ do $R_a=0,088 \mu\text{m}$ i trwa do kolejnego otworu 18 a następuje występuje względna stabilizacja.

Wyniki testu zarysowania zamieszczono na rys. 6, 7 i 8. Cechą charakterystyczną powierzchni gładzonej, bez wad strefy podpowierzchniowej (rys. 7), jest mała wartość współczynnika tarcia, siły tarcia i emisji akustycznej. Powierzchnia otworu wiercona i gładzona, mających białą warstwę, ma wyższe wartości tych parametrów oraz większą ich zmienność wzdłuż długości rysy.

Charakterystykę profilu i powierzchni wierconej, wytaczanej i gładzonej zamieszczono na rys. 9-12. Obejmuje ona profil wzdłuż tworzącej, krzywą udziału materiałowego z parametrami metody siecznej, topografie powierzchni i obraz izometryczny powierzchni. Wartości parametrów chropowatości profilu i powierzchni zamieszczono w tabeli 1 i 2. Cechą charakterystyczną chropowatości powierzchni jest to, że powierzchnia gładzona, integralna, ma większą wysokość chropowatości $S_a=0,16 \mu\text{m}$ ($R_a=0,15 \mu\text{m}$), krzywą udziału materiałowego zbliżoną do rozkładu normalnego Gaussa oraz mniejszy wymiar fraktalny $S_{fd}=2,63$ ($R_{fd}=1,40$) od powierzchni ze strefą podpowierzchniową odkształconą plastycznie: $S_a=0,12 \mu\text{m}$ ($R_a=0,085 \mu\text{m}$) oraz $S_{fd}=2,72$ ($R_{fd}=1,47$).

5. WNIOSKI

Gładzenie nadstopu niklu PWA 1113, bez odkształceń plastycznych i białej warstwy w strefie podpowierzchniowej, wymaga zastosowanie osetek z zielonego węgla krzemu o numerze 8 i twardości 3, według charakterystyki Sunnen Products Company. Otwory są wstępnie wiercone i

wytaczane. Prędkość obrotowa głowicy powinna wynosić 1041 obr/min i prędkość ruchu posuwisto-zwrotnego 262 skoki/min. Posuw winien być dwustopniowy z prędkością pierwszego etap 0,1160 mm/min, do usunięcia naddatku obróbkowego 0,0808 mm i drugi etap gładzenia z prędkością 0,0254 mm/min do usunięcia naddatku obróbkowego 0,0820 mm. Wyiskrzanie, po drugim etapie gładzenia, powinno trwać 5 s. Odpowiednim chłodziwem, okazał się jedynie olej MAN-852-5 HONING OIL firmy Sunnen Products Company. Podane warunki i parametry gładzenia umożliwiają uzyskanie wysokiej jakości 31 otworów jednym kompletem osełek ściernych.

Test zarysowania umożliwia ocenę jakości strefy podpowierzchniowej nadstopu niklu PWA 1113. Powierzchnia mająca w strefie podpowierzchniowej odkształcenia plastyczne i białą warstwę charakteryzuje się względnie większymi oporami tarcia i wyższym poziomem emisji akustycznej.

LITERATURA

- [1] M' Saobui R., Outerio J.C., Chandrasekarn H., Dillon O.W., Jawahir I.S.: A review of the surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing* Vol. 1, s. 203–236, 2008.
- [2] Novovic D., Dewes R.C., Aspinwall D.K., Voice W., Bowen P.: The effect of machined topography and integrity on fatigue life. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 44 (2–3), s. 125–134, 2004.
- [3] Field M., Kahles J.F., Koster W.P.: The surface effects produced in nonconventional metal removal-comparison with conventional machining techniques. *Metal Engineering Quarterly* Vol. 6, s. 32–45, 1966.
- [4] Witek L., Wierzbińska M., A. Poznańska A.: Fracture analysis of compressor blade of a helicopter engine. *Engineering Failure Analysis* Vol. 16, s. 1616-1622, 2009.
- [5] Bhowal P.R., Stolz D., Wusatowska-Sarnek A.M., Montero R.: Surface effects on low cycle fatigue behavior in IN718 alloy. 11th International Symposium on Superalloys, Superalloys 2008; Champion, PA; United States; 14 September 2008 through 18 September 2008; Code 75394, s. 417-423, 2008.
- [6] Ezugwu E.O., Tang S.H.: Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 55 (2), s. 63-69, 1995.
- [7] Li W., Withers P.J., Axinte D., Preuss M., Andrews P.: Residual stresses in face finish turning of high strength nickel based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 209 (10), s. 4896–4902, 2009.
- [8] Kwong J., Axinte D.A., Withers P.J., Hardy M.C.: Minor cutting edge-workpiece interactions in drilling of an advanced nickel-based superalloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 49 (7–8), s. 645–658, 2009.
- [9] Sadat A.B.: Surface characteristics of machined Inconel 718 nickel base superalloy using natural and controlled contact length tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 27 (3), s. 333–342, 1987.
- [10] El-Khabeery M.M., Saleh S.M., Ramadan M.R.: Some observations of surface integrity of deep drilling holes. *Wear* Vol. 142 (2), s. 331–349, 1991.
- [11] Sharman A.R.C., Amarashighe A., Ridgway K.: Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 200 (1), s. 424-432, 200).
- [12] Li J.G., Umemoto M., Todaka Y., Tsuchiya K.: A microstructural investigation of the surface of a drilled hole in carbon steels. *Acta Mater* Vol. 55 (4), s. 1397–1406, 2007.
- [13] 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 and Manufacture* Vol. 46 (2), s. 225–233, 2006.

- [14] M'Saoubi R., Larsson T., Outeiro J., Guo Y., Suslov S., Saldana C., Chandrasekar S.: Surface integrity analysis of machined Inconel 718 over multiple length scales. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61 (1), s. 99-102, 2012.
- [15] Pawade R.S, Joshi S.S, Brahmanekar P.K.; Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 48 (1), s. 15-28, 2008.
- [16] Kwong J., Axinte D.A., Withers P.J.: The sensitivity of Ni-based superalloy to hole making operations: Influence of process parameters on subsurface damage and residual stress. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 209, s. 3968-3977, 2009.
- [17] Imran V., Mativenga P.T., Gholinia A., Withers P.J.: Evaluation of surface integrity in micro drilling process for nickel-based superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 55, s. 465-474, 2011.
- [18] Bushlya V., Zhou J.M., Lenrick F., Avdovic P., Ståhl J-E.: Characterization of white layer generated when turning aged Inconel 718. *Procedia Engineering* Vol. 19, s. 60-66, 2011.
- [19] Herbert C.R.J., Kwong J., Kong M.C., Axinte D.A., Hardy M.C., Withers P.J.: An evaluation of the evolution of workpiece surface integrity in hole making operations for a nickel-based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 212 (8), s. 1723-1730, 2012.
- [20] Axinte D.A., Andrews P.: Some considerations on tool wear and workpiece surface quality of holes finished by reaming or milling in a nickel base superalloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture* Vol. 221 (4), s. 591-603, 2007.
- [21] Lin P., Lin Z.: Preliminary study on mechanism of superalloy deep-hole honing technology. *Applied Mechanics and Materials* Vol. 271 (Part 1), s. 353-356, 2013.
- [22] Zhu L., Peng H., Xiao D.: Experimental research on deep hole honing of difficult-to-cut materials based on mixture-abrasive honing stones. *Key Engineering Materials* Vol. 416, s. 461-466, 2009.

TECHNOLOGY HONING CYLINDRICAL HOLES GUARANTEED SURFACE INTEGRITY IN THE SUPERALLOY NICKEL TURBINE DISK

This paper presents the conditions and parameters honing nickel superalloy PWA 1113, sticks green silicon carbide vitrified, allowing the integrity of the surface layer. The characterization of roughness profile and characteristics of the surface roughness of the drill holes, precision boring and then honing. Determined value of diameter and height profile of the surface roughness of holes, during the life of whetstones. Posted microstructure of the subsurface after these operations. Test parameters scratching the surface of the hole, metallographic examination confirmed the subsurface to the surface layer of this distinction without plastic deformation honing and honing of plastic deformation and white layer.