

Badania przyrostów średnic i temperatury przedmiotów podczas gładzenia długich otworów w warunkach produkcyjnych

Experimental studies of diameter and temperature increments of workpieces during honing the long holes under production conditions

ADAM BARYLSKI
PIOTR SENDER*

W artykule przedstawiono wyniki badań ubytku materiału oraz nagrzewania się przedmiotów cienkościennych podczas gładzenia długich otworów. Analizowano wpływ podstawowych parametrów obróbkowych na wzrost temperatury przedmiotu i intensywność gładzenia. Celem badań było opracowanie modelu matematycznego ubytku materiału podczas gładzenia i przyrostu temperatury przedmiotu obrabianego, wyznaczonego w warunkach produkcyjnych.

SŁOWA KLUCZOWE: gładzenie, długie otwory, badania

This paper describes the research studies of machining and heating of thin-walled workpieces during honing. The influence of different parameter settings for machining heat generated in the system, as well as an analysis of the impact of parameters on the efficiency of the honing process are presented in the paper. The aim of the research is to develop a mathematical model of the honing process.

KEYWORDS: honing, long holes, research

1. WSTĘP

Gładzenie, stosunkowo szeroko opisywane obecnie w literaturze, np. [1-4, 7-8], jest procesem wymagającym od technologa planującego proces obróbkowy przygotowania otworu z odpowiednią dokładnością kształtu i wymiaru (z nadatkiem na obróbkę końcową) i właściwego przeprowadzenia samego procesu gładzenia. Zwykle prowadzone są w tym celu odpowiednie laboratoryjne badania doświadczalne, w ściśle kontrolowanych warunkach zewnętrznych.

Próby eksperymentalne, opisane poniżej, wykonano w pomieszczeniu nie klimatyzowanym, a honownica nie posiadała układu chłodzenia oleju. Prowadzenie badań w takich warunkach jest utrudnione ze względu na istnienie wielu czynników zakłócających.

Określenie oddziaływania parametrów obróbkowych na wynik gładzenia w warunkach produkcyjnych niesie za sobą też korzyści, m.in. możliwość poznania wpływu sterowalnych parametrów wejściowych (na określonej obrabiarce) na wielkości wyjściowe procesu.

Gładzenie nie jest obróbką łatwą do wykonania szczególnie wtedy, kiedy dotyczy to przedmiotów cienkościennych. Przedmioty o zmiennym przekroju są kłopotliwe do gładzenia [4] ze względu na zmienną wydajność na różnej grubości ściankach.

Przeprowadzono czasochłonne badania doświadczalne, podczas których określono wpływ parametrów obróbkowych na ubytek materiału oraz na nagrzewanie się przedmiotów gładzonych (rys. 10). Przed badaniami właściwymi wykonano odpowiednie badania wstępne.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

2.1. Warunki i przebieg badań

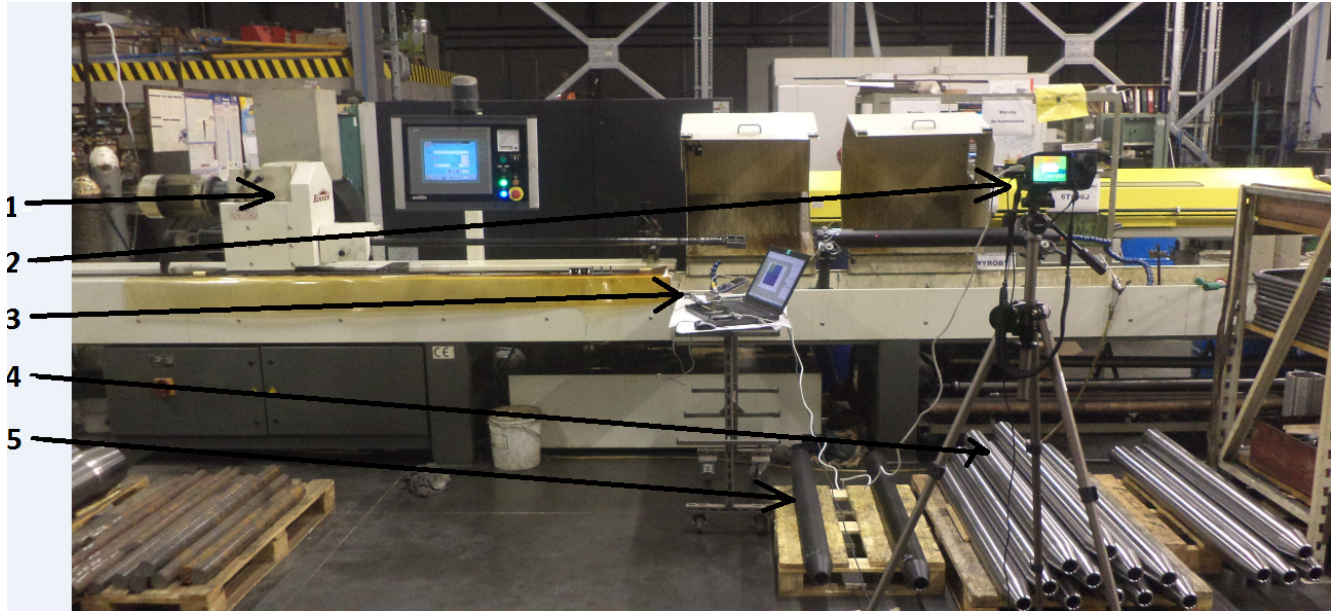
Badania własne przeprowadzono na honownicy poziomej HTH 4000-S CNC firmy Sunnen (rys. 1). Pomiar temperatury odbywał się przy pomocy kamery termowizyjnej Vigocam V50, stosując oprogramowanie THERM 2.23.2. Kamerę kalibrowano przy pomocy czujnika z sondą temperaturową ESCORT-99 (rys. 2).

Przedmiot obrabiany pokazany na rys. 3 jest częścią składową maszyny roboczej, potocznie zwanej „kretem” [6]. Cylinder wykonany ze stali 34CrNiMo6 (34-38 HRC) posiada otwór o średnicy 80 mm, średnicę zewnętrzną 96 mm.

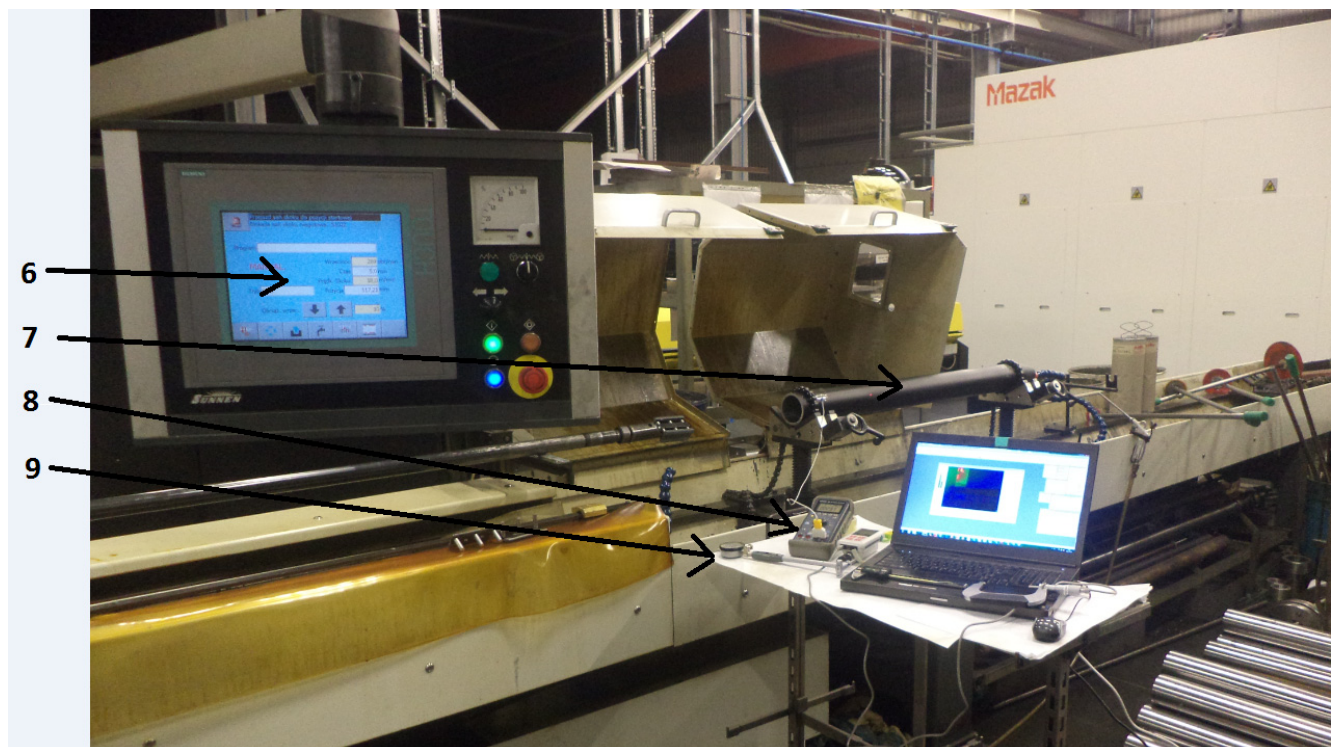
* dr hab. inż. Adam Barylski, prof. nadzw. PG, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny (abarylsk@pg.gda.pl); mgr inż. Piotr Sender, Środowiskowe Studium Doktoranckie (piotr.sender@wp.pl)

Obróbka poprzedzająca gładzenie polega na głębokim wierceniu (system STS) otworu o średnicy 79,60 mm i długości około 1100 mm. Naddatek pozostawiony na gładzenie uzależniony jest od kształtu otworu uzyskanego po wierceniu. Osełki, których użyto do badań zasadniczych mają wymiary 105x8,5x8,5 mm i oznaczenie H50A45N i H70A45N - ziarna elektrokorundu o granulacji 150, twardość 5 wg skali firmy Sunnen (rys. 5), liczba osełek w głowicy 2, liczba pilników w osełce 2 (rys. 4).

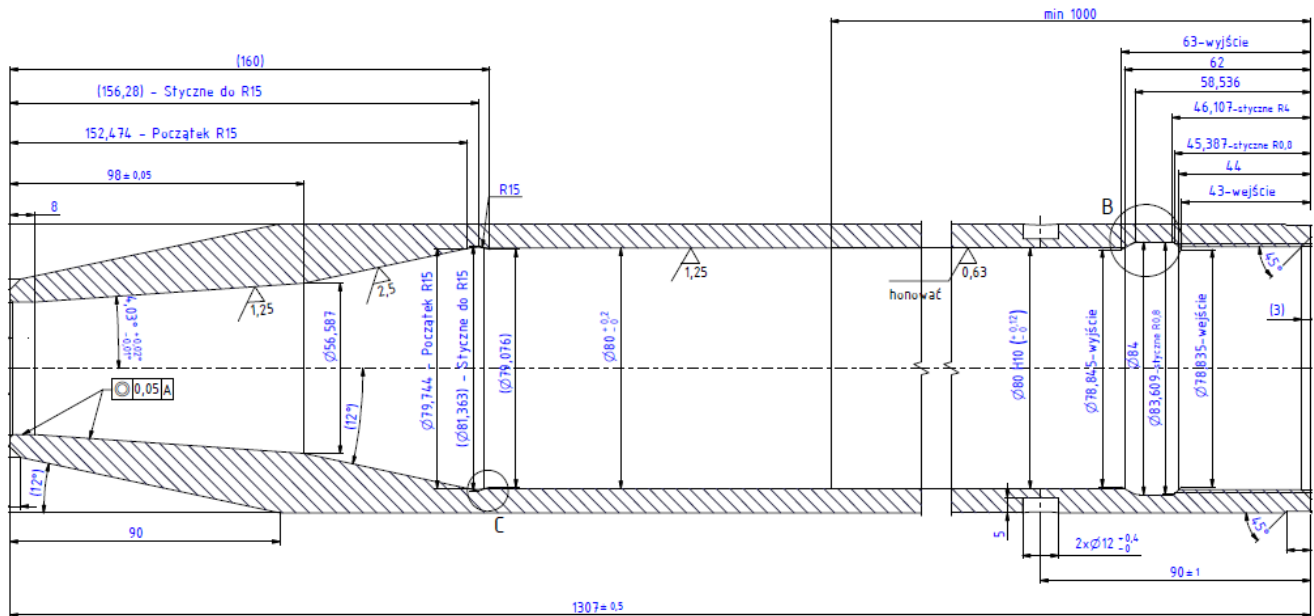
Badania główne przeprowadzono wg planu statycznego trójpoziomowego PS/DK 3² [5]. Tuleje obrabiane zostały pomalowane czarną farbą matową, ponieważ niemożliwym okazał się pomiar temperatury z użyciem kamery termowizyjnej przedmiotów błyszczących.



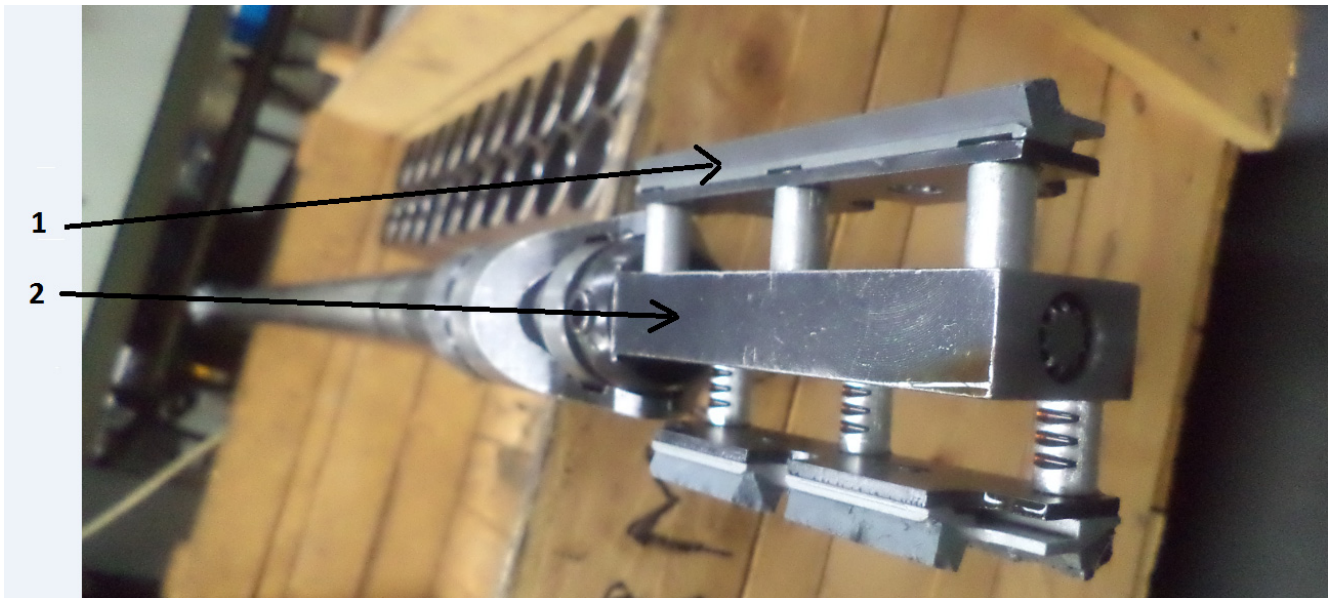
Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1 - honownica HTH 4000-S CNC firmy Sunnen, 2 - kamera termowizyjna Vigocam V50, 3 - komputer z oprogramowaniem THERM 2.23.2, 4 - przedmioty nie pomalowane, 5 - przedmioty pomalowane czarną matową farbą



Rys. 2. Stanowisko badawcze (c.d.): 6 - panel sterowania honownicy, 7 - przedmiot badany, 8 - czujnik Escort-99 z sondą temperatury, 9 - średnicówka

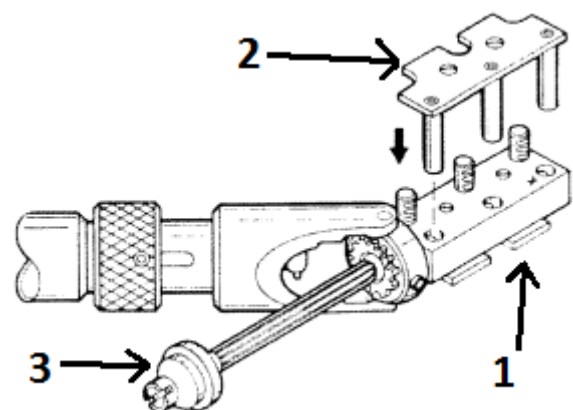


Rys. 3. Przedmiot obrabiany (średnica gładzonego otworu 80 mm, długość przedmiotu 1307 mm, długość otworu 1147 mm, długość gładzenia min. 937 mm [4])

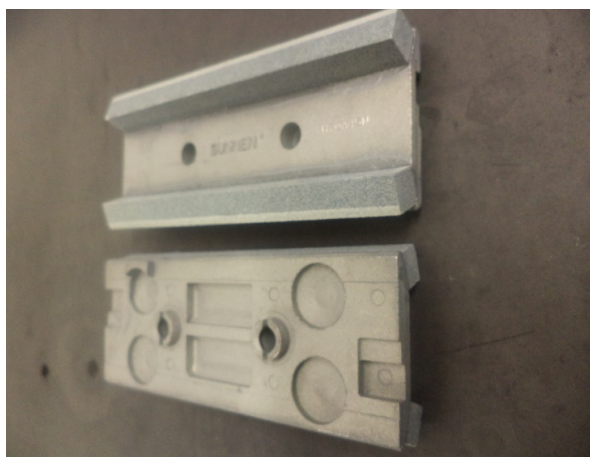


Rys. 4. Fragment stanowiska badawczego: 1 - osełka, 2 – głowica MPS-H50

Na rys. 4 przedstawiono głowicę MPS-H50, której zasada działania polega na rozsuwaniu mechanicznym osełki (rys. 6). Głowica ta może być stosowana do gładzenia otworów o średnicy w zakresie 50-76 mm, zaś po zastosowaniu podstawy osełek H70 z dłuższymi trzpieniami zębatymi (rys. 5) zakres można zwiększyć. Rozsuwanie osełek następuje poprzez wałek wielowypustowy, który zazębiając się z podstawą osełki powoduje ich obustronny ruch, nadzorowany przez sterownik (rys. 2, poz. 6).



Rys. 5. Budowa narzędzia gładzącego; 1 – głowica MPS-H50, 2 – oprawa osełek H70, 3 – wałek wielowypustowy [9]



Rys. 6. Oselka H50A45N zamocowana w głowicy MPS H50

W wyniku badań wstępnych przyjęto parametry obróbki dla badań właściwych: czas gładzenia 15 min, natężenie przepływu oleju ok. $25 \text{ dm}^3/\text{min}$, prędkość obwodowa głowicy 55 m/min, długość skoku 900 mm, wybieg oselki 10 mm oraz warunki zmienne: naciski obróbkowe, prędkość wzdłużną. W badaniach użyto oleju mineralnego Veco Ferol firmy „Modex Oil” w klasie lepkości ISO 22.

2.2. Wyniki badań

W tab. 1 przedstawiono poziomy (górnym, średnim i dolnym) dla czynników wejściowych. W tab. 2 podano uzyskany w badaniach ubytek (na średnicy otworu), średnią arytmetyczną

ubytku oraz wariancję. Poszczególne etapy gładzenia, z zastosowaniem różnych nastaw, przeprowadzane były w czasie 15 minut.

Tab. 1. Czynniki wejściowe badań (docisk - „%” możliwego obciążenia i prędkość wzdłużna [m/min])

Czynniki wejściowe	X_1 docisk [%]	X_2 prędkość wzdłużna [m/min]
poziom zerowy (0)	20	25
poziom górny (+)	30	35
poziom dolny (-)	10	15
przedział zmian	10	10
czynnik wynikowy 1	y_1 - ubytek materiału [mm] (w czasie 15 minut)	
czynnik wynikowy 2	y_2 - przyrost temperatury [°C]	

Równanie regresji ubytku materiału (1), po odrzuceniu członów nieistotnych oraz po odkodowaniu czynników wejściowych, ma postać:

$$y_1 = 0,000485X_1^2 - 0,01165X_1 + 0,12266 \quad (1)$$

gdzie: X_1 oznacza docisk w % dostępnej mocy dla wrzeciona.

Równanie jest adekwatne na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Tab. 2. Wyniki pomiarów ubytku materiału [mm] na średnicy podczas gładzenia otworu (w czasie 15 min)

Lp.	docisk X_1	prędkość wzdłużna X_2	ubytek materiału: pomiar 29.05.2014r.	ubytek materiału: pomiar 15.03.2014r.	ubytek materiału: pomiar 07.12.2013r.	\bar{y}_1	$S^2(y_1)_i$	\hat{y}_1
1	30	35	0,14	0,35	0,14	0,210	0,0147	0,20966
2	30	25	0,35	0,24	0,155	0,248	0,009558333	0,20966
3	30	15	0,19	0,21	0,1	0,167	0,003433333	0,20966
4	20	35	0,11	0,15	0,06	0,107	0,002033333	0,08366
5	20	25	0,05	0,07	0,06	0,060	0,0001	0,08366
6	20	15	0,08	0,11	0,05	0,080	0,0009	0,08366
7	10	35	0,11	0,1	0,07	0,093	0,000433333	0,05466
8	10	25	0,04	0,06	0,02	0,040	0,0004	0,05466
9	10	15	0,02	0,04	0,02	0,027	0,000133333	0,05466

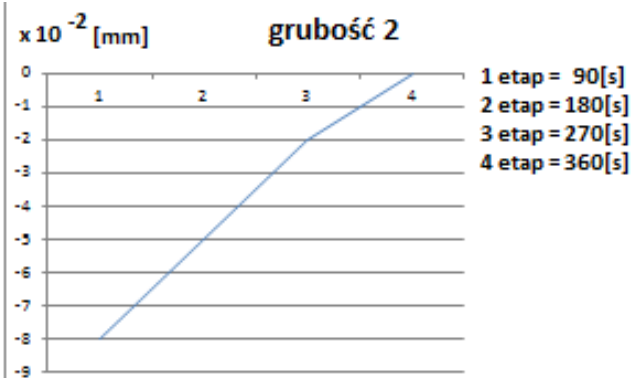
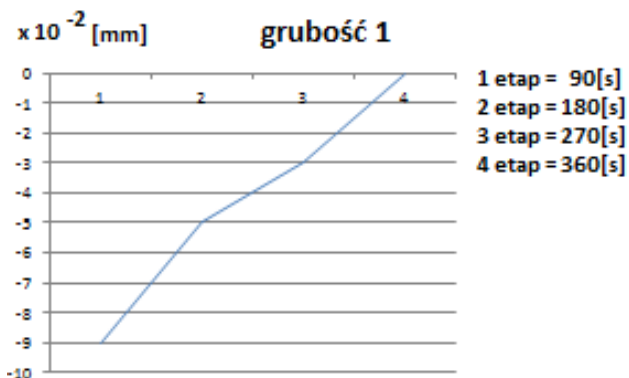
Przeprowadzono także badania elementu o zmiennej grubości ścianki. Wymiarów przedmiotu (rys. 7) nie można zaprezentować w związku z tajemnicą handlową firmy Terma Sp. z o.o. Na rys. 7 przedstawiono miejsca pomiaru ubytku dla czterech etapów gładzenia trwających po 90 sekund.

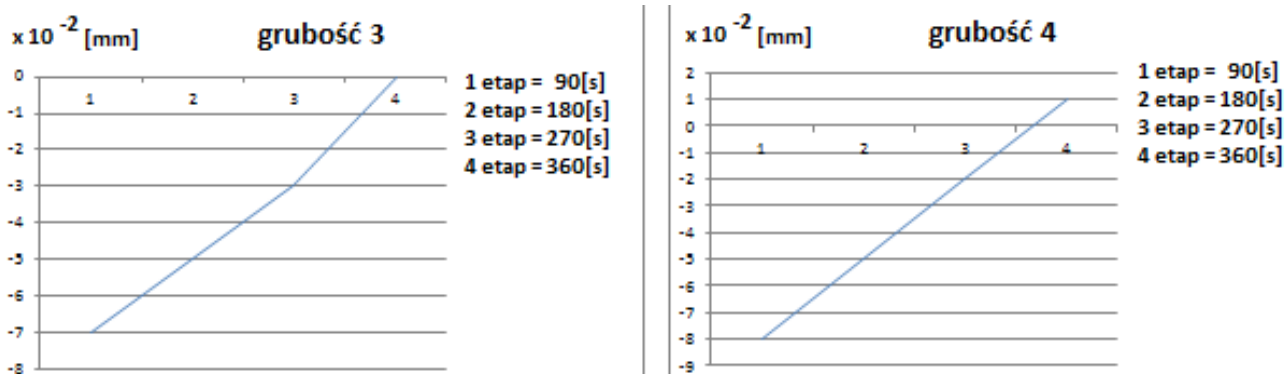
Na rys. 8 można zaobserwować, że najmniej nierównomiernym miejscem usuwania naddatku w cienkościennych tulei (w 4 etapowym i 90 sekundowym procesie gładzenia), jest przekrój z najcieńszą ścianką (grubość 1). Przekrój 4 (najgrubsza ścianka) wskazuje na liniowy przebieg usuwania naddatku.

Obróbka przedmiotów ze zmienną grubością ścianek wymaga większej liczby oscylacji osetki w przypadku ścianki o najmniejszej grubości [4,6]. Cienka ściana odkształca się sprężysto, bliższe poznanie tego problemu wymaga dalszych badań procesu gładzenia.



Rys. 7. Analizowane miejsca gładzonej tulei o zmiennej grubości ścianki (grubość $g_1 < g_3 < g_2 < g_4$)





Rys. 8. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego o różnej grubości ścianki w czteroetapowym procesie gładzenia

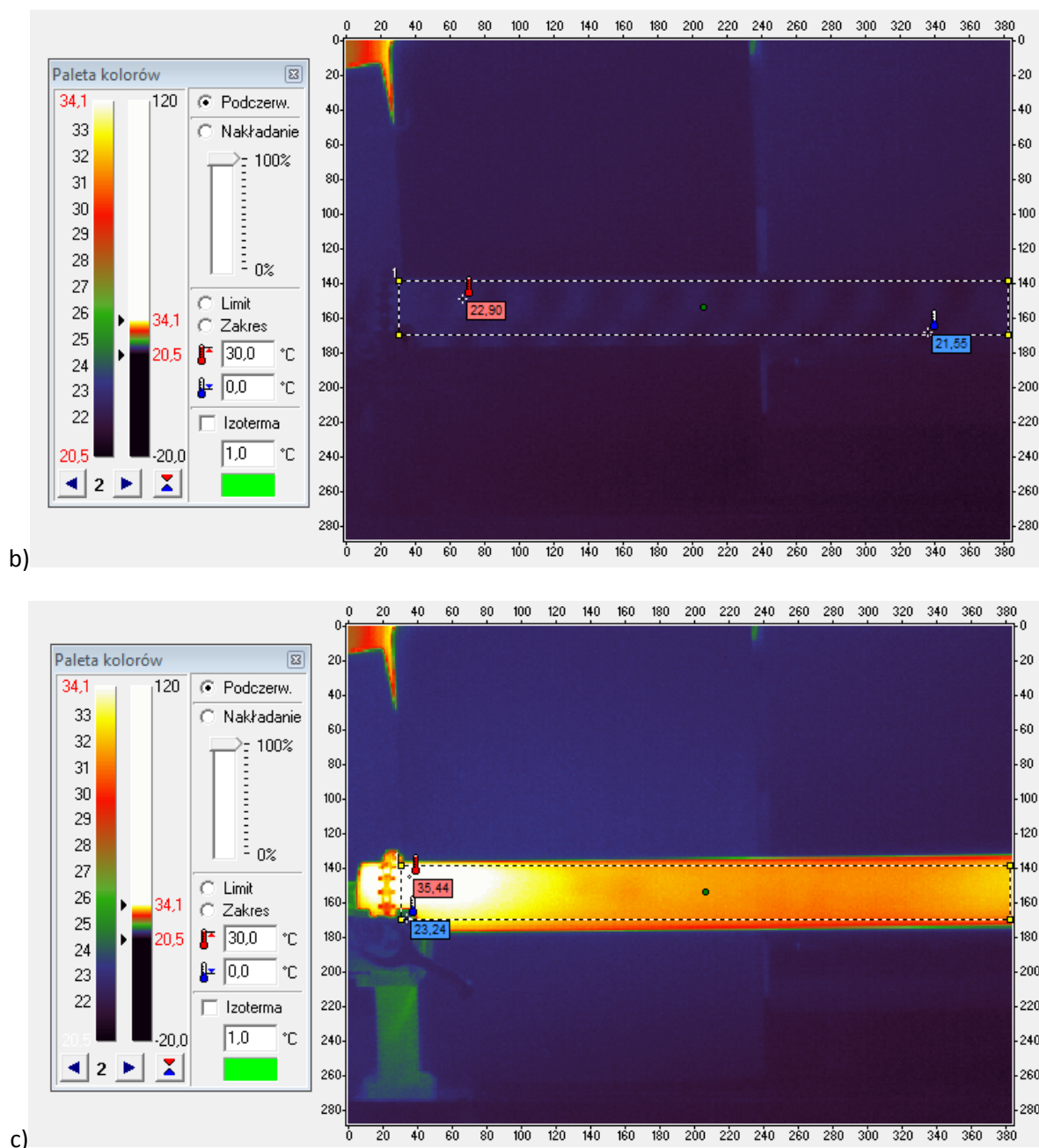
Efektom wydzielenia się ciepła wewnątrz obrabianego przedmiotu jest przewodzenie ciepła wzdłuż osi, jak również w kierunku promieniowym. Im wyższa temperatura, tym większe odkształcenia cieplne. Przedmiot, który zostanie podgrzany, przed obróbką wykańczającą musi ostygnąć, aby możliwym był wiarygodny pomiar uzyskanej średnicy.

W trakcie badań zauważono, że stosowanie zmiennej ilości oscylacji (więcej oscylacji na cieńszym przekroju) oraz mniejszy docisk wpływają korzystnie na realizację procesu gładzenia.

Większa ilość oscylacji na cieńszej ściance powoduje, że jest usuwany naddatek pomimo odkształceń sprężystych przekroju, mniejszy docisk – zatem i niższa temperatura wpływają korzystnie na kształt otworu gładzonego.

Na rys. 9 podano przykładowe obrazy pomiarowe otrzymane z kamery termowizyjnej.





Rys. 9. Widok: a) pole obejmujące zakres pomiarowy kamery termowizyjnej podczas gładzenia, b) przedmiot gładzony – początek procesu (widoczna spirala o wyższej temperaturze), c) przedmiotu po 15 minutowej obróbce (nacisk ośledek 30% wykorzystanie mocy obrabiarki, prędkość wzdłużna głowicy 35 m/min)

W tab. 3 zamieszczono wyniki badań przy użyciu kamery termowizyjnej, przy czym X_1 oznacza docisk ośledek (w % z 6 kW do wykorzystania), zaś X_2 prędkość wzdłużną głowicy (w m/min).

Równanie regresji przyrostu temperatury (2) powstającej w trakcie gładzenia (dla danych wejściowych wg tab. 3), po odrzuceniu członów nieistotnych oraz po rozkodowaniu czynników wejściowych ma postać:

$$y_2 = -0,039X_1^2 + 2,19833X_1 - 9,65 \quad (2)$$

gdzie: X_1 oznacza docisk w % dostępnej mocy dla wrzeciona.

Równanie jest adekwatne na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

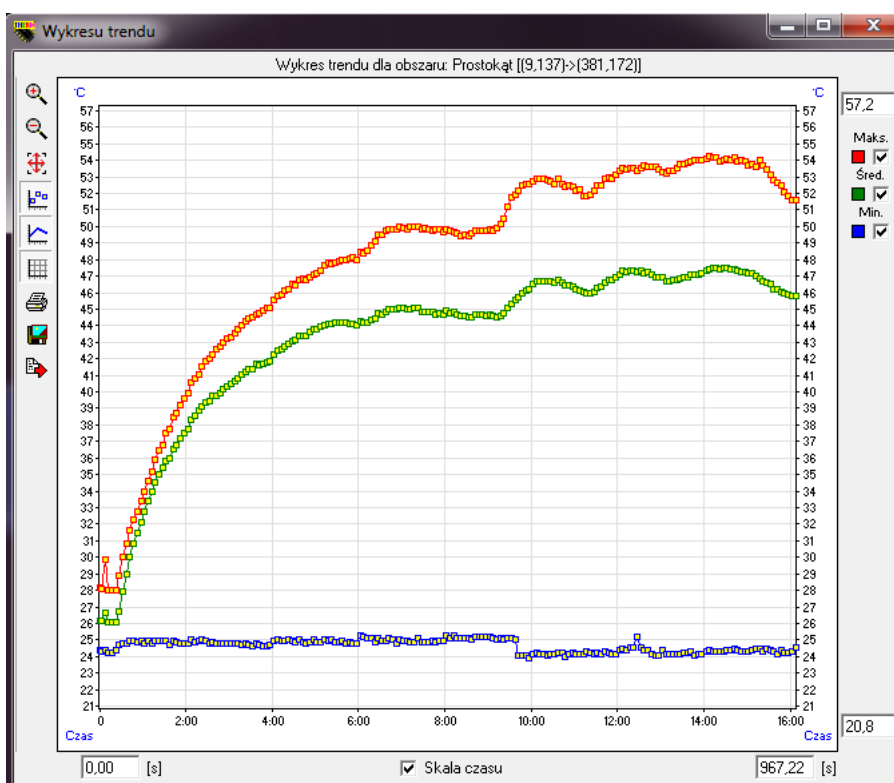
Na rys. 10 przedstawiono przyrost temperatury jednej sekwencji pomiarowej na powierzchni przedmiotu po 15 minutach gładzenia. Im większy docisk ośledek, tym wyższą temperaturę można zaobserwować na powierzchni obrabianej.

Na rys. 11 podano przykładowe profile powierzchni gładzonej (po 5 min) ośleką borazonową H50NM57XM84. Czas gładzenia 5 minut jest wystarczający do weryfikacji uzyskanego profilu chropowatości przy użyciu różnych ośledek ściernych.

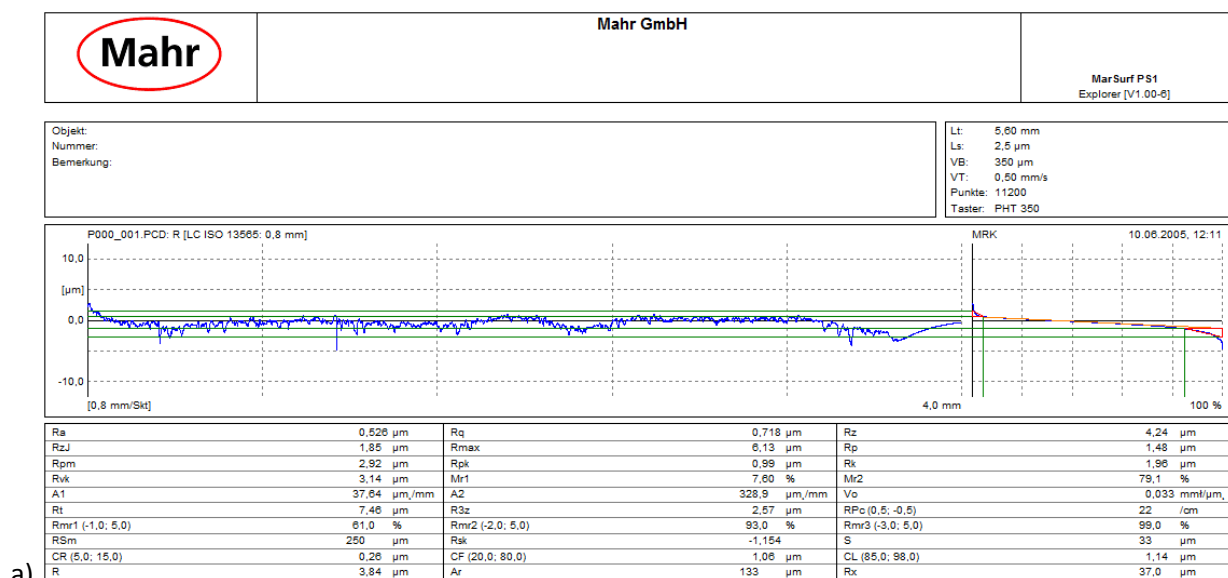
Głównym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni po obróbce jest docisk ośledek, na co wskazuje także literatura [2].

Tab. 3. Wyniki pomiarów przyrostu temperatury

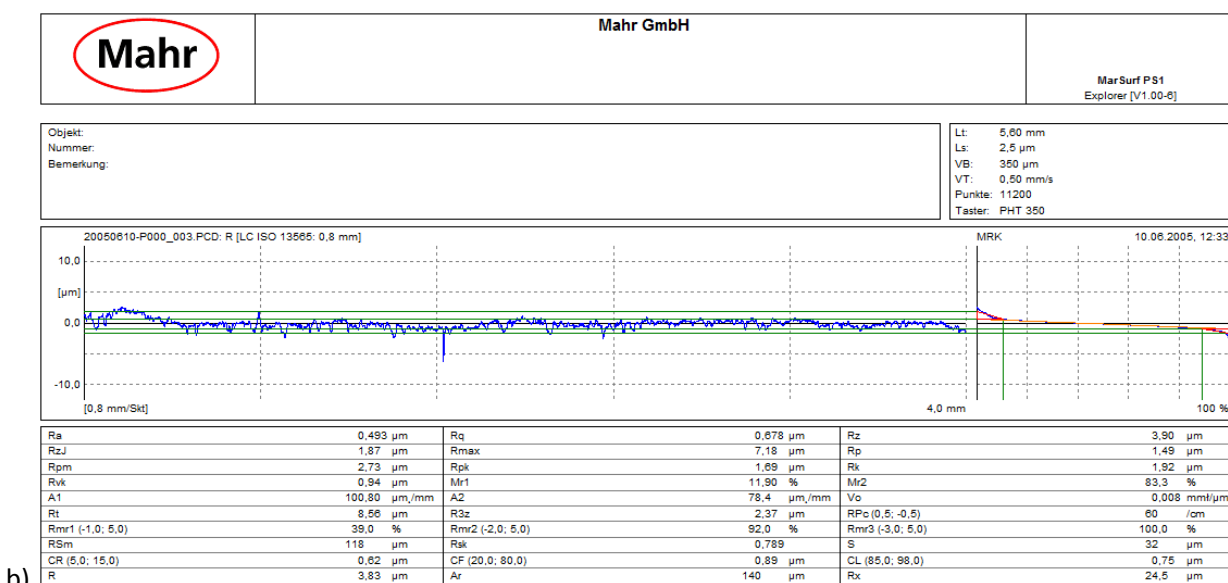
Lp.	docisk [%] X_1	prędkość wzdłużna [mm/min] X_2	przyrost temperatury: pomiar 1 [°C]	przyrost temperatury: pomiar 2 [°C]	\bar{y}_2	$S^2(y_2)_i$	\hat{y}_2
1	30	35	15,3	22,5	18,9	25,92	21,1999
2	30	25	22,2	26,5	24,35	9,245	21,1999
3	30	15	20,1	21,8	20,95	1,445	21,1999
4	20	35	21,2	18,1	19,65	4,805	18,7166
5	20	25	15,1	18,1	16,6	4,5	18,7166
6	20	15	25	16	20,5	40,5	18,7166
7	10	35	8,8	10,3	9,55	1,125	8,4333
8	10	25	5,5	9,3	7,4	7,22	8,4333
9	10	15	8,2	9,7	8,95	1,125	8,4333



Rys. 10. Przyrost temperatury przedstawiony dla jednej sekwencji filmu nagranej przy użyciu kamery Vigocam V50



a)



b)

Rys. 11. Profil chropowości powierzchni gładzonej: a) docisk oselek 30%, prędkość wzdłużna 18 m/min (Rvk 3,14 ; Rpk 0,99; Rk 1,96; Mr1 7,6%; Mr2 79,1%), b) docisk 10%, prędkość wzdłużna 18 m/min (Rvk 0,94 ; Rpk 1,69 ; Rk 1,92; Mr1 11,9%; Mr2 83,3%)

Do opisu profilu chropowości (rys. 11) użyto takich parametrów, które powiązane są z krzywą nośności Abbotta-Firestone, gdyż umożliwiają wygodny sposób interpretacji profilu (wysokość wzniesień Rpk, głębokość rys Rvk). W praktyce parametry te są też stosowane do weryfikacji warunków powstawania hydrodynamicznego smarowania [7]. Przy ich pomocy można porównać np. głębokość rys uzyskanych w gładzeniu z różnym dociskiem osełki.

3. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań na przedmiocie pokazanym na rys. 3 wynika, że istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność procesu gładzenia (wzór 1) oraz wartość przyrostu temperatury w układzie o-u-p-n (wzór 2) jest docisk oselek.

Docisk osełek w honownicy poziomej firmy Sunnen jest ustawiany w % mocy możliwej do wykorzystania w procesie. Wartość docisku stanowi tajemnicę handlową (informacja

potwierdzona przez producenta). Stanowi to istotną trudność badawczą (poznawczą).

Problematycznym dla realizacji badań warsztatowych jest też konieczność pomalowania przedmiotów gładzonych czarną farbą matową.

Analizując badania przeprowadzone na przedmiocie pokazanym na rys. 7 zaobserwowano, że wymiar końcowy otworów tolerowanych (np. H6 lub H7) dla przedmiotów ze ścianką o grubości kilku mm, lub ze zmienną grubością, uzyskać można przez gładzenie prowadzone w kilku etapach, czyli poprzez usunięcie warstwy w etapie pierwszym (obróbka wstępna), ostudzenie elementu (następny pomiar) i następnie po trzy- lub czterokrotnym gładzeniu wykończeniowym (z kontrolą wymiarową). Innym sposobem może być zadanie parametrów generujących niższy wzrost temperaturę przedmiotu, co korzystnie wpływa na stabilność kształtu otworu. Istotny wpływ na właściwy przebieg procesu ma też zamocowanie przedmiotów cienkościennych oraz występowanie czynników zakłócających, jakim jest m.in. zmienna

temperatura otoczenia. Kolejną znaczącą kwestią, zaobserwowaną podczas badań, jest nagrzewanie się całego układu o-u-p-n. Korzystnym byłoby umieszczenie w układzie chłodnicy oleju.

Postawiony cel badań, jakim było opracowanie modelu matematycznego ubytku materiału podczas gładzenia otworów i przyrostu temperatury przedmiotu obrabianego został osiągnięty. W przypadku gładzenia tulei cienkościennych należy poszukiwać kompromisu pomiędzy wydajnością obróbki i nagrzewaniem się elementu. Przeprowadzone badania mają charakter rozpoznawczy, pozwalający na uwzględnianie w przyszłej ocenie średnicy gładzonego otworu nie tylko zmian w wyniku skrawania, lecz i rozszerzalności cieplnej obrabianej tulei. Jest to istotny problem technologiczny i pomiarowy. Badania te będą kontynuowane.

LITERATURA

1. Benoit Goeldel, Mohamed El Mansori, Didier Dumur Macroscopic simulation of the liner honing process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 319–322, 2012.
2. Buj-Corralla I., Vivancos-Calveta J., Coba-Salcedo M., Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing. *Precision Engineering*, 38, 100–108, 2014.
3. Drossel, W.G., Hochmuth C., Schneider R., An adaptronic system to control shape and surface of liner bores during the honing process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62, 331–334, 2013.
4. Harasymowicz J., Wantuch E., *Obróbka gładkościowa* Politechnika Krakowska, Kraków 1994.
5. Korzyński M., *Metodyka eksperymentu*. WNT, Warszawa 2013.
6. Materiały firmy Terma Sp. z o.o. w Gdańsku, (<http://www.termamax.pl/pl/glowna>).
7. Mezghani Sabeur, Demirci Ibrahim, El Mansori Mohamed, Zahouani Hassan, Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack. *Tribology International*, 59, 240–247, 2013.
8. Pawlus P., Cieślak T., Mathia T., The study of cylinder liner plateau honing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 6078–6086, 2009.
9. Materiały firmy Sunnen, 2009 - 2014.