



Wydział Mechaniczny

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Grzegorz Sender

Dyscyplina naukowa: Inżynieria Mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim:

Analiza gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych

Tytuł rozprawy w języku angielskim:

Analysis of honing of cylindrical holes with variable kinematics conditions

Promotor	Drugi promotor
<i>Podpis</i>	<i>Podpis</i>
prof. dr hab. inż. Adam Barylski	
Promotor pomocniczy	Kopromotor
<i>Podpis</i>	<i>Podpis</i>

Gdańsk, 07.09.2020 r.

The author of the PhD dissertation: MSc Piotr Grzegorz Sender
Scientific discipline: Mechanical Engineering

DOCTORAL DISSERTATION

Title of PhD dissertation:

Analysis of honing of cylindrical holes with variable kinematics conditions

Title of PhD dissertation in Polish:

Analiza gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych

Supervisor <i>signature</i>	Second supervisor <i>Signature</i>
prof. dr hab. Eng. Adam Barylski	
Auxiliary supervisor <i>Signature</i>	Cosupervisor <i>Signature</i>

Gdańsk, 07.09.2020



Gdańsk, 07.09.2020 r.

OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: mgr inż. Piotr Grzegorz Sender

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Analiza gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych, do celów naukowych lub dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia 07.09.2020 r.

.....

podpis doktoranta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem prof. dr hab. inż. Adamem Barylskim, ~~drugim promotorem, promotorem pomocniczym, kopromotorem.~~

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia 07.09.2020 r.

.....

podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia 07.09.2020 r.

.....

podpis doktoranta

*) niepotrzebne skreślić

¹ Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

² Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.

Gdańsk, 07.09.2020 r.

STATEMENT

The author of the PhD dissertation: MSc Piotr Grzegorz Sender

I, the undersigned, agree/~~do not agree~~* that my PhD dissertation entitled:

Analysis of honing of cylindrical holes with variable kinematics conditions, may be used for scientific or didactic purposes¹.

Gdańsk, 07.09.2020

.....
signature of the PhD student

Aware of criminal liability for violations of the Act of 4th February 1994 on Copyright and Related Rights (Journal of Laws 2006, No. 90, item 631) and disciplinary actions set out in the Law on Higher Education (Journal of Laws 2012, item 572 with later amendments),² as well as civil liability, I declare, that the submitted PhD dissertation is my own work.

I declare, that the submitted PhD dissertation is my own work performed under and in cooperation with the supervision of prof. dr hab. Eng. Adam Barylski, ~~the second supervision of <name of the second supervisor>, the auxiliary supervision of <name of the auxiliary supervisor>, the cosupervision of <name of the cosupervisor>*~~.

This submitted PhD dissertation has never before been the basis of an official procedure associated with the awarding of a PhD degree.

All the information contained in the above thesis which is derived from written and electronic sources is documented in a list of relevant literature in accordance with art. 34 of the Copyright and Related Rights Act.

I confirm that this PhD dissertation is identical to the attached electronic version.

Gdańsk, 07.09.2020

.....
signature of the PhD student

I, the undersigned, agree/~~do not agree~~* to include an electronic version of the above PhD dissertation in the open, institutional, digital repository of Gdańsk University of Technology, Pomeranian Digital Library, and for it to be submitted to the processes of verification and protection against misappropriation of authorship.

Gdańsk, 07.09.2020

.....
signature of the PhD student

*) delete where appropriate.

¹ Decree of Rector of Gdansk University of Technology No. 34/2009 of 9th November 2009, TUG archive instruction addendum No. 8.

² Act of 27th July 2005, Law on Higher Education: Chapter 7, Criminal responsibility of PhD students, Article 226.

OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: mgr inż. Piotr Grzegorz Sender

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Analiza gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Analysis of honing of cylindrical holes with variable kinematics conditions

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Adam Barylski

Data obrony: 07.09.2020 r.

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polskim: gładzenie, kinematyka gładzenia, gładzenie przedmiotów cienkościennych, temperatura gładzenia, analiza numeryczna gładzenia, trajektoria ziarna ściernego

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: honing, kinematics of honing, honing of thin-walled workpieces, temperatures of honing, numerical analysis of honing process

Streszczenie rozprawy w języku polskim:

Jakość powierzchni otworów odgrywa istotną rolę w przemyśle maszynowym, przede wszystkim w produkcji silników spalinowych i cylindrów hydraulicznych. Badania procesu gładzenia przeprowadzono na honownicy poziomej CNC Sunnen HTH 4000S, na pionowej hydraulicznej (konwencjonalnej) honownicy WMW SZS 200 oraz na frezarce HAAS VF 3SS z oprzyrządowaniem do gładzenia f-my Honingtec. Pomiary okrągłości i walcowości otworów po gładzeniu wykonywano na maszynie współrzędnościowej (pomiarowej) CNC Zeiss Contura, pomiary parametrów profilu chropowatości wykonywano m.in. za pomocą przyrządu Mitutoyo SJ-210. W pracy zweryfikowano wpływ parametrów obróbki na przebieg procesu gładzenia i stwierdzono, że metodą umożliwiającą uzyskanie zarówno dobrej jakości powierzchni jak i niższej o 35,2% temperatury przedmiotu gładzonego oraz mniejszej o 12,77% odchyłki walcowości (w porównaniu do gładzenia tradycyjnego) jest gładzenie ze zmienną kinematyką. Zmienny posuw głowicy gładzącej wpływa korzystnie na zmniejszenie odchyłki walcowości oraz umożliwia zmniejszenie wartości parametrów profilu chropowatości gładzonej powierzchni. Najmniejszy przyrost temperatury podczas gładzenia otworu walcowego o średnicy $d = 100$ mm występuje przy gładzeniu wykonywanym ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $20 \div 80$ obr/min. Zmienna prędkość obrotowa, w zakresie wartości maksymalnej ilości obrotów głowicy poniżej 100 obr/min, zmniejsza wysokość temperatury powstającej podczas obróbki. Gładzenie przeprowadzane ze zmianą prędkości obrotowej w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min powoduje wzrost temperatury gładzonej powierzchni o blisko 23°C /minutę. Wyższa prędkość obrotowa głowicy powoduje wyższą temperaturę gładzonego przedmiotu oraz szybsze zużycie narzędzia ściernego. Podczas gładzenia ze zmianą prędkości obrotowej w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min zużycie narzędzia występuje



w czasie poniżej 1 minuty. Przyrost temperatury gładzonego przedmiotu w największym stopniu uzależniony jest od wartości ciśnienia roboczego nacisku osetki ścierniej do obrabianej powierzchni gładzonego otworu. Największy wpływ na wydajność gładzenia ma wielkość ciśnienia nacisku osetki do powierzchni obrabianego otworu. Większa wartość nacisku osetki do powierzchni gładzonej powoduje większą odchyłkę walcowości. Podczas gładzenia przedmiotów cienkościennych, z różną grubością ścianek, wydajność obróbki w przekrojach o różnych grubościach jest różna.

Niższa wartość sumy promieni krzywizny trajektorii ziarna ściernego, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną kinematyką, wpływa na obniżenie temperatury, na zmniejszenie odchyłki walcowości oraz na poprawę parametrów profilu chropowatości przedmiotu gładzonego.

Szczegółowa znajomość wpływu krzywizny ścieżki ziarna ściernego na proces obróbki może przynieść wiele korzyści w opracowaniu nowych metod gładzenia otworów cylindrycznych, zwłaszcza w przypadku przedmiotów cienkościennych o różnych grubościach przekroju gładzonego otworu.

Dalsze badania powinny umożliwić wprowadzenie do programów sterujących pracą nowoczesnych honownic CNC możliwości programowania kształtu trajektorii ziarna ściernego za pomocą funkcji matematycznej, opisującej ruch głowicy gładzącej.

DESCRIPTION OF DOCTORAL DISSERTATION

The Author of the PhD dissertation: MSc Piotr Grzegorz Sender

Title of PhD dissertation: Analysis of honing of cylindrical holes with variable kinematics conditions

Title of PhD dissertation in Polish: Analiza gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych

Language of PhD dissertation: polish

Supervision: prof. dr hab. Eng. Adam Barylski

Date of doctoral defense: 07.09.2020

Keywords of PhD dissertation in English: honing, kinematics of honing, honing of thin-walled workpieces, temperatures of honing, numerical analysis of honing process, abrasive grain path

Keywords of PhD dissertation in Polish: gładzenie, kinematyka gładzenia, gładzenie przedmiotów cienkościennych, temperatura gładzenia, analiza numeryczna gładzenia, trajektoria ziarna ściernego

Summary of the dissertation in English:

Surface quality of holes plays an important role in machine manufacturing industry especially in the production of car engines and hydraulic cylinders. Investigations of honing process were carried out on horizontal CNC Sunnen's honing machine HTH 4000S, on vertical conventional honing machine WMW's SZS 200 and on CNC milling machine of Haas VF 3SS with equipment of Honingtec company for honing. Measurements of cylindricity of holes was done on CNC coordinate measuring machine Zeiss Contura, measuring of roughness was done using surface roughness measurement instrument of Mitutoyo SJ-210. The influence of variable kinematics of honing process has a positive impact for many aspects of performing of efficient and accurate honing process. It was found that the best method for obtaining both good surface quality and less temperature of the honing workpieces and less deviation of shape of the cylinders is honing with variable kinematics. Variable feed of honing head affect the minimization of cylindricity deviation of holes of machined workpiece about 12,77% (compared to traditional honing) and can allow for reducing the surface roughness profile parameters. The smallest increase of temperature of machined workpiece with diameter of $d = 100$ mm occurs with variable rotation speed of honing head in the range from $20 \div 80 \text{ min}^{-1}$. The machined workpiece temperature increase for honing conducted with variable kinematics condition is less about 35,2% compared to traditional honing process. Variable rotation speed of honing head in the range of lower speeds, below 100 min^{-1} , affect the reduction of temperature generated during honing. The change of rotation speed of honing head in the range from $n = 100 \div 200 \text{ min}^{-1}$ results in an increase in the temperature of the machined surface by nearly $23^\circ\text{C} / \text{minute}$. The higher value of V_c speed made the higher temperature of the machined workpiece and faster wear of the abrasive



whetstone. In the range of higher revolution speed of honing head, in the range from $n = 100 \div 200 \text{ min}^{-1}$, the total whetstone usage may occur in about 1 minute. The increase of the machined volume of the machined material of honed workpiece (increase in production efficiency) is most affected by the honing pressure. Higher honing pressure value is affected in a greater deviation of cylindricity of honed holes. In a four-stage honing process of cylinder liners with different workpiece's wall thicknesses the machining efficiency of the material during honing process is different on each wall's thickness.

A lower value of the sum of the radii of curvature of the abrasive grain trajectory, for honing performed with variable kinematics, reduces the temperature, reduces the cylindrical shape deviation and improves the parameters of the roughness profile of the honed workpiece.

Detailed knowledge of the impact of the curvature of the abrasive grain trajectories on the machining process can bring many benefits in the development of new methods of honing process of cylindrical holes, especially in the case of thin-walled workpieces with different cross-section thicknesses of honed holes.

Further research should make it possible to verify the legitimacy and benefits of introducing into the control of modern CNC honing machines the possibility of programming of the trajectories of abrasive grains, using a mathematical function describing the motion of the honing head.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A [m] – amplituda ruchu ziarna w kierunku promieniowym
- B [m] – amplituda ruchu ziarna w kierunku osiowym
- d [mm] – średnica gładzonego otworu
- F_{az} [N] – składowa promieniowa siły całkowitej
- F_{ax} [N] – składowa osiowa siły całkowitej
- F_c [N] – siła skrawania wypadkowa (całkowita)
- G_s [μm] – wielkość ziarna wg FEPA
- L [m] – długość skoku głowicy w ruchu posuwisto-zwrotnym
- L_{fr} [m] – długość trajektorii ziarna uzyskanej dla czasu gładzenia t_{fr}
- L_{wyb} [m] – długość wybiegu osełki
- n [obr/min] – prędkość obrotowa głowicy
- n_{ax} [s^{-1}] – częstość skoku głowicy w ruchu posuwisto-zwrotnym
- p [MPa] – docisk osełki do powierzchni gładzonego otworu
- Q [$\text{cm}^3 / \text{mm}^2 \text{s}$] lub [mm / min] – wydajność gładzenia
- R_a [μm] – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości wg PN-EN ISO 4287
- R_k [μm] – wysokość rdzenia profilu chropowatości wg ISO 13565-2
- R_n ($n \in N^+$) [m] – promień krzywizny krzywej (trajektorii ziarna ściernego)
- R_o [m] – promień gładzonego otworu
- R_{pk} [μm] – wysokość najwyższego wzniesienia profilu chropowatości wg ISO 13565-2
- R_{vk} [μm] – głębokość najniższego wgłębienia profilu chropowatości wg ISO 13565-2
- T [$^{\circ}\text{C}$] – temperatura w układzie *OUPN*
- t [min] lub [s] – czas gładzenia
- t_{fr} [min] – czas gładzenia, przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, potrzebny do uzyskania kanału olejowego o długości L_{fr}
- t_1 - okres ruchu ziarna w kierunku poziomym na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu
- t_2 - okresy ruchu ziarna w kierunku pionowym na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu



V_{ax} [m/min] – prędkość liniowa osiowa głowicy w ruchu posuwisto-zwrotnym

V_{az} [m/min] – prędkość obwodowa głowicy

V_c [m/min] – prędkość skrawania wypadkowa

α [°] – kąt gładzenia

β [°] – kąt skrzyżowania rys obróbkowych ($\beta = 2\alpha$)

φ_1 [rad] – kąt przesunięcia fazowego na rozwiniętej powierzchni otworu w kierunku poziomej osi X

φ_2 [rad] – kąt przesunięcia fazowego na rozwiniętej powierzchni otworu w kierunku pionowej osi Y

SPIS	11
1. ANALIZA LITERATURY ZWIĄZANEJ Z TEMATEM PRACY	13
1.1. Zagadnienie gładzenia otworów walcowych	13
1.2. Rodzaje tekstur powierzchni współpracujących	20
1.3. Kinematyka gładzenia otworów.....	33
1.3.1. Gładzenie otworów walcowych ze stałą kinematyką.....	33
1.3.2. Gładzenie otworów walcowych ze zmienną kinematyką	37
1.4. Wpływ parametrów gładzenia na wyniki obróbki.....	52
1.4.1. Wpływ kąta gładzenia na warunki eksploatacji silników spalinowych	55
1.4.2. Wpływ wielkości ziarna ściernego na profil chropowatości powierzchni po gładzeniu	62
1.4.3. Wpływ parametrów procesu na wydajność gładzenia.....	64
1.4.4. Wpływ parametrów obróbkowych na odchyłki kształtu gładzonego otworu.....	65
1.4.5. Wpływ parametrów procesu gładzenia na przyrost temperatury przedmiotów gładzonych.....	69
1.5. Podsumowanie analizy literatury	71
2. HIPOTEZA PRACY, CELE NAUKOWE I ZAKRES BADAŃ	72
3. PROBLEMATYKA SERYJNEJ OBRÓBKI CYLINDRÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH.....	73
4. BADANIA GŁADZENIA OTWORÓW WALCOWYCH	83
4.1. Modele planów eksperymentów użyte w badaniach wstępnych.....	85
4.1.1. Plan badawczy dla 3 czynników, trójpoziomowy PS/DK 3 ³	85
4.1.2. Plan badawczy dla 2 czynników, trójpoziomowy PS/DK 3 ²	93
4.2. Badania wstępne	95
4.2.1. Gładzenie na honownicy CNC Sunnen HTH 4000S	95
4.2.1.1. Przyrost temperatury przedmiotu obrabianego dla stałej i zmiennej kinematyki gładzenia	108
4.2.1.2. Odchyłka kształtu walcowości tulei cylindrowych silników spalinowych gładzonych bez zmiany parametrów obróbki	112
4.2.1.3. Wnioski z badań wstępnych.....	115
4.2.2. Symulacje komputerowe.....	116
4.2.2.1. Odształcenia przedmiotów cienkościennych o stałej grubości przekroju.....	121



4.2.2.2.	<i>Odkształcenia przedmiotów cienkościennych o zmiennej grubości przekroju.....</i>	124
4.2.2.3.	<i>Symulacja odkształceń termicznych w procesie gładzenia.....</i>	127
4.2.2.3.	<i>Wnioski z przeprowadzonych symulacji gładzenia.....</i>	136
4.3.	<i>Badania zasadnicze eksperymentalne.....</i>	137
4.3.1.	<i>Gładzenie na centrum frezerskim pionowym CNC HAAS VF-3SS.....</i>	137
4.3.1.1.	<i>Wykonywanie pomiarów na maszynie współrzędnościowej CNC Zeiss Contura</i>	141
4.3.1.2.	<i>Badania gładzenia ze stałymi parametrami kinematycznymi</i>	142
4.3.1.3.	<i>Wnioski z gładzenia ze stałymi parametrami kinematycznymi.....</i>	156
4.3.1.4.	<i>Badania gładzenia ze zmiennymi parametrami kinematycznymi.....</i>	157
4.3.1.5.	<i>Wnioski z gładzenia ze zmiennymi parametrami kinematycznymi</i>	168
4.3.2.	<i>Gładzenie na honownicy hydraulicznej konwencjonalnej WMW SZS 200</i>	168
4.3.2.1.	<i>Przyrost temperatury przy gładzeniu ze stałymi warunkami kinematycznymi.....</i>	170
4.3.2.2.	<i>Przyrost temperatury oraz parametry profilu chropowatości przy gładzeniu ze zmiennymi warunkami kinematycznymi.....</i>	172
4.3.2.3.	<i>Wnioski z gładzenia ze zmiennymi warunkami kinematycznymi</i>	183
5.	KRZYWIZNA TRAJEKTORII ZIARNA ŚCIERNEGO PRZY GŁADZENIU OTWORÓW WALCOWYCH	184
5.1.	<i>Promień krzywizny trajektorii ziarna ściernego.....</i>	185
5.2.	<i>Analiza promienia krzywizny trajektorii ruchu ziarna</i>	187
6.	WNIOSKI KOŃCOWE	201
6.1.	<i>Wnioski poznawcze</i>	201
6.2.	<i>Proponowane kierunki dalszych badań</i>	203
	WYKAZ ILUSTRACJI	216
	WYKAZ TABEL.....	226
	DODATEK	227

1. ANALIZA LITERATURY ZWIĄZANEJ Z TEMATEM PRACY

1.1. Zagadnienie gładzenia otworów walcowych

Gładzenie jest metodą obróbki ścierniej stosowaną głównie do dokładnego kształtowania otworów walcowych, zapewniającą oprócz małej wartości parametrów profilu chropowatości powierzchni (np. R_a 0,01 μm) również małą wartość odchyłki kształtu (okrągłość i walcowość rzędu $1 \div 5 \mu\text{m}$) oraz umożliwiającą uzyskanie dużej dokładności wymiarowej średnic gładzonych otworów [1, 18, 30, 37, 40, 58, 86, 108, 117, 145, 152, 162, 163, 179, 205]. Grubość zdejmowanych warstw materiału podczas gładzenia wynosi od 0,01 mm do kilku milimetrów [58]. Gładzenie obecnie stosowane jest nie tylko do obróbki wykończeniowej w celu poprawy jakości powierzchni otworu [139, 163], który do gładzenia może być przygotowany za pomocą różnych metod obróbkowych [156], ale również do obróbki zgrubnej [203]. Gładzenie jest używane zarówno do obróbki stali w stanie miękkim i zahartowanym, jak również do materiałów nieżelaznych (brąz, mosiądz, stopy aluminium) w zakresie średnic otworów od 0,015 mm [133] do ok 2 m i dla długości od kilku dziesiątych milimetra do 20 m [4, 6, 58, 73, 133, 153, 178].

Cabanettes [19], Deepak [27], Graboń [59] i Zahouani [197] wskazują na kluczową rolę gładzenia dla tulei cylindrycznych stosowanych w silnikach spalinowych ze względu na uzyskiwaną strukturę rys na obrabianej powierzchni, wpływającą na wielkość zużycia oleju [154] i zmniejszenie efektu docierania się współpracujących części [3, 10], jak również na redukcję ilości toksycznych związków emitowanych do otoczenia w trakcie eksploatacji silników spalinowych [83, 84, 85, 91, 95, 96, 113, 131, 132, 146, 172, 187]. Gładzenie jest stosowane do uzyskania żądanych mikro i makro właściwości użytkowych powierzchni cylindrów skrzyni korbowej, współpracującej z pierścieniami tłokowymi [33, 37, 39, 41, 43, 158]. Proces gładzenia przeważnie składa się z kilku etapów: z gładzenia zgrubnego, wykończeniowego oraz z gładzenia plateau, w których kolejno gładzony otwór uzyskuje ostateczny kształt, wymiar oraz chropowatość powierzchni. Dwuetapowe gładzenie zapewnia większą odporność współpracujących części na zużycie ściernie niż gładzenie jednoetapowe [142]. Sabri [146, 147] opisuje gładzenie składające się z 3 etapów: z gładzenia zgrubnego, wykończeniowego oraz z gładzenia plateau. Trzeci etap gładzenia, tzw. gładzenie plateau, ma na celu usunięcie wierzchołków profilu chropowatości. Zhang [203] omawia zalety gładzenia czteroetapowego, w którym występują dwa zabiegi zgrubne i dwa wykończeniowe, umożliwiające uzyskanie wyższej jakości otworu. Gładzenie zapewnia w zespole tłok - cylinder mniejszy współczynnik tarcia niż szlifowanie [95] oraz zmienia stan naprężeń w warstwie wierzchniej powierzchni obrabianej na głębokości do 100 μm [12].

Zmniejszenie o 5% współczynnika tarcia w zespole tłok-cylinder wpływa na redukcję o 1% siły tarcia występującej w silniku spalinowym [90]. Zavos [198] omówił zalety teksturowania pierścieni tłokowych cylindra, co powoduje redukcję o 10% ÷ 27% współczynnika tarcia w zespole tłok-cylinder. Yousfi [188] wskazuje, że na zmniejszenie współczynnika tarcia w zespole tłok - pierścienie - cylinder silnika spalinowego wpływa także stosunek kąta skrzyżowania siatki rys do głębokości



kanału olejowego oraz stosunek kąta skrzyżowania siatki rys do ilorazu głębokości i szerokości kanału olejowego. Szczegółowo do istotnych zagadnień gładzenia wprowadza również Pawlus [132, 133]. W literaturze opisano także systemy monitorujące, nadzorujące oraz symulujące zużywanie gładzi cylindrów, ułatwiające poznanie współpracy powierzchni gładzonych podczas ich eksploatacji [31, 32].

Do obróbki przedmiotów posiadających otwory poprzeczne, lub dla dodatkowej poprawy jakości powierzchni po gładzeniu konwencjonalnym, można stosować gładzenie elastyczne przeprowadzane z użyciem pasty ścierniej zawierającej kształtki ściernie, gładzenie z użyciem szczotek [5, 11] lub gładzenie elektroerozyjne [130].

Gładzenie prowadzić można na honownicy, a także na frezarce [155, 157], tokarce i wiertarce [183]. Ważne jest, aby obróbkę przeprowadzano na obrabiarce zapewniającej brak niekontrolowanych drgań głowicy gładzącej [129, 167, 168]. Jest wielu dostawców narzędzi [4, 11, 110, 148, 175], maszyn obróbkowych [7, 22, 28, 38, 87, 121, 144, 161, 176, 178], oraz nowych metod gładzenia [47 ÷ 51, 70].

W zależności od konstrukcji honownicy możliwa jest korekta odchyłek kształtu i położenia gładzonego otworu (tab. 1).

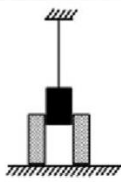
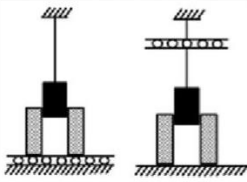
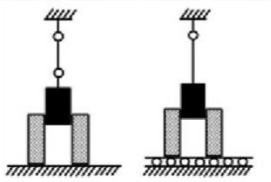
Możliwe jest gładzenie przedmiotu nieruchomego za pomocą obracającej się głowicy oraz przedmiotu ruchomego za pomocą głowicy nieobrotowej [14]. Najczęściej spotykanym układem kinematycznym jest gładzenie przedmiotu nieruchomego za pomocą przegubowej i obrotowej głowicy gładzącej [8, 9, 118, 155].

Poniżej scharakteryzowano sześć sposobów zamocowania przedmiotu obrabianego i głowicy gładzącej, charakteryzujące się różną ilością stopni swobody wykorzystywanych do procesu gładzenia (tab.1):

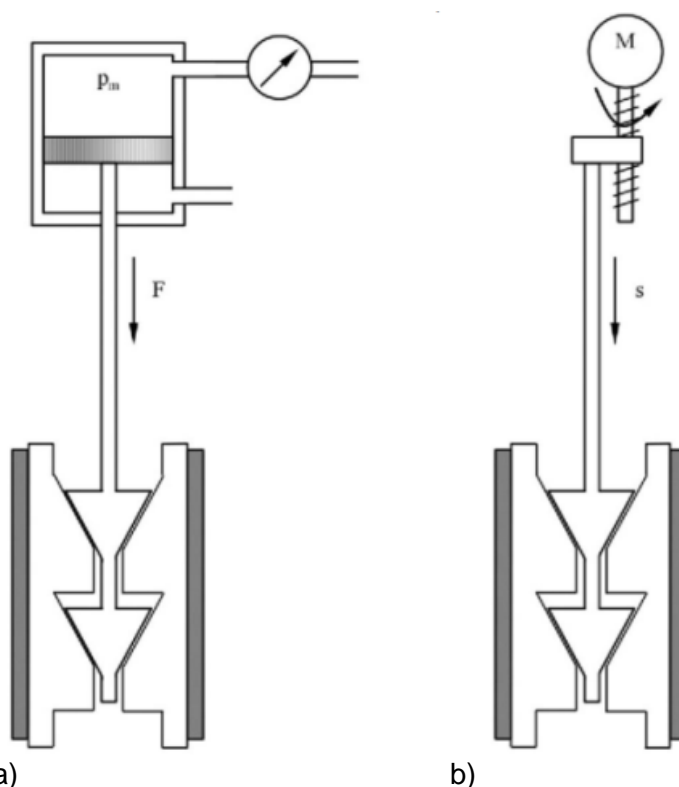
- 1 - sztywne zamocowanie głowicy i przedmiotu umożliwiające oprócz poprawy okrągłości, walcowości i położenia kąowego również korektę umiejscowienia otworu w płaszczyźnie obróbki,
- 2 - przesuwne zamocowanie przedmiotu i sztywne prowadzenie głowicy, umożliwiające korektę okrągłości oraz kąowego położenia otworu,
- 3 - sztywne zamocowanie przedmiotu i przesuwne prowadzenie głowicy, umożliwiające korektę okrągłości oraz kąowego położenia otworu,
- 4 - przegubowe zamocowanie głowicy i sztywne zamocowanie przedmiotu, umożliwiające korektę okrągłości i walcowości gładzonego otworu,
- 5 - uchylnie zamocowanie przedmiotu i przesuwne zamocowanie głowicy, umożliwiające korektę okrągłości i walcowości gładzonego otworu,
- 6 - sztywne zamocowanie głowicy i wahliwe zamocowanie przedmiotu obrabianego, umożliwiające korektę okrągłości i walcowości gładzonego otworu.



Tab. 1. Stopnie swobody pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym [165]

● możliwe ○ nie możliwe			
Korekcja pozycji	●	○	○
Korekcja położenia kątownego osi otworu	●	●	○
Korekcja okrągłości i walcowości	●	●	●

Na rys. 1 pokazano metody sterowania ruchem głowicy gładzącej za pomocą cylindra hydraulicznego (tzw. sterowanie siłowe) oraz za pomocą serwosilnika (tzw. sterowanie położeniem). Sposób prowadzenia głowicy wpływa m.in. na możliwość nadzorowania kształtu trajektorii ziarna ściernego. Wysuw osetki może odbywać się za pomocą sterowania siłowego lub w sposób precyzyjny za pomocą sterowania położeniem pokazano na rys. 1.

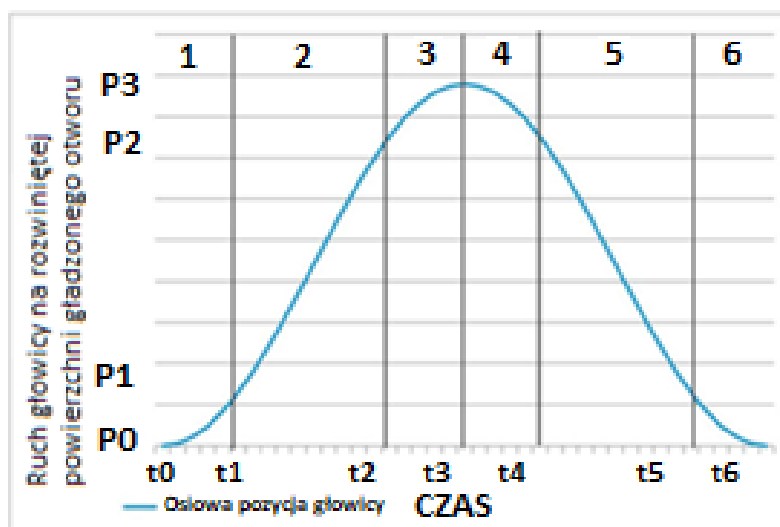


Rys. 1. Możliwości sterowania ruchem głowicy: a) sterowanie siłowe, b) sterowanie położeniem [165]

Na rys. 2 pokazano trajektorię głowicy na rozwiniętej płaszczyźnie powierzchni otworu gładzonego dla jednego pełnego cyklu obróbkowego (osiowy ruch głowicy w obu kierunkach), podzielonego na 6 przedziałów czasowych od t_1 do t_6 . Stała prędkość wypadkowa skrawania podczas gładzenia występuje pomiędzy czasami $t_1 \div t_2$ i $t_4 \div t_5$ (odpowiednio dla punktów opisujących położenie głowicy $P_1 \div P_2$ i $P_2 \div P_1$).

Wykres z rys. 2 prezentuje fazy procesu gładzenia z tradycyjną kinematyką (ze stałą wartością parametrów obróbkowych). Punkty P0 oraz P3 odpowiadają punktom zwrotnym dla kierunku ruchu osiowego głowicy.

Podczas ruchu głowicy w górę punkt P0 jest początkiem ruchu a punkt P3 końcem, podczas ruchu w kierunku przeciwnym punkt P3 jest początkiem ruchu a punkt P0 końcem.



Rys. 2. Fazy procesu gładzenia przy ruchu w głowicy w górę: P0 – początek drogi skoku, P3 – koniec drogi skoku głowicy, fazy procesu gładzenia przy ruchu w głowicy w dół: P3 – początek drogi skoku, P0 – koniec drogi skoku głowicy [151]

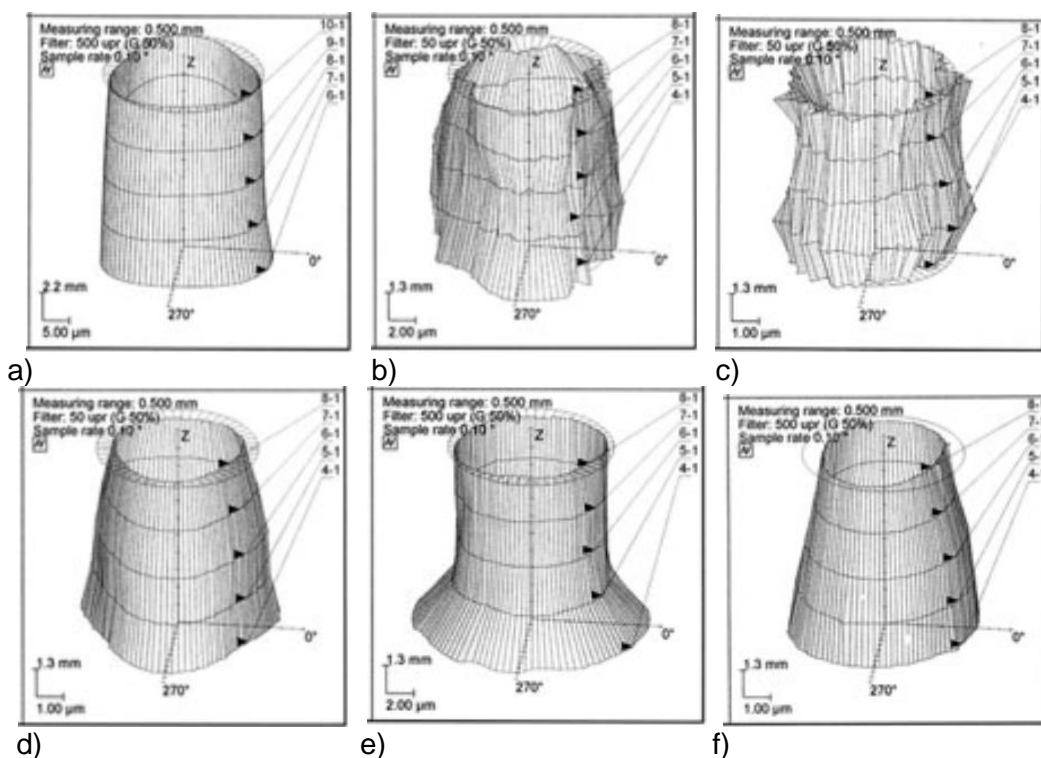
Singh [158] porównał wybrane metody obróbki wykończeniowej i stwierdził, że gładzenie jest metodą najbardziej odpowiednią do końcowej obróbki otworów. Guo [71] porównał szlifowanie z gładzeniem i stwierdził iż szlifowanie, ze względu na bardziej inwazyjny przebieg procesu, powoduje większy wzrost twardości na powierzchni obrabianej niż gładzenie. Szulc [162] wyszczególnia wśród zalet gładzenia wydajność procesu, oraz krótki czas montażu części do obróbki ze względu na przegubowe połączenie głowicy z wrzecionem.

W celu poprawy jakości otworu producenci maszyn do gładzenia zaproponowali także metodę gładzenia kształtowego, charakteryzującą się wykonywaniem otworu z założoną odchyłką walcowości, zanikającą w trakcie użytkowania urządzenia [34 ÷ 36, 47], wskutek występującego nagrzewania układu OUPN powodującego pojawienie się „odchyłki termicznej” (eksploatacyjnej) [1, 8, 56, 184, 185], redukującej założoną odchyłkę wykonawczą.

Tradycyjnym sposobem poprawy odchyłki walcowości otworu jest gładzenie z różną długością wybiegu osetki, kiedy to w zależności od długości wybiegu osetki uzyskiwane są różne odchyłki walcowości [89, 179]. Stosować można również gładzenie ze zmienną częstotliwością

oscylacji głowicy [118] lub za pomocą stosowania zmiennej kinematyki procesu [6, 119, 155, 157], jak również z użyciem specjalnego oprzyrządowania mocującego [127].

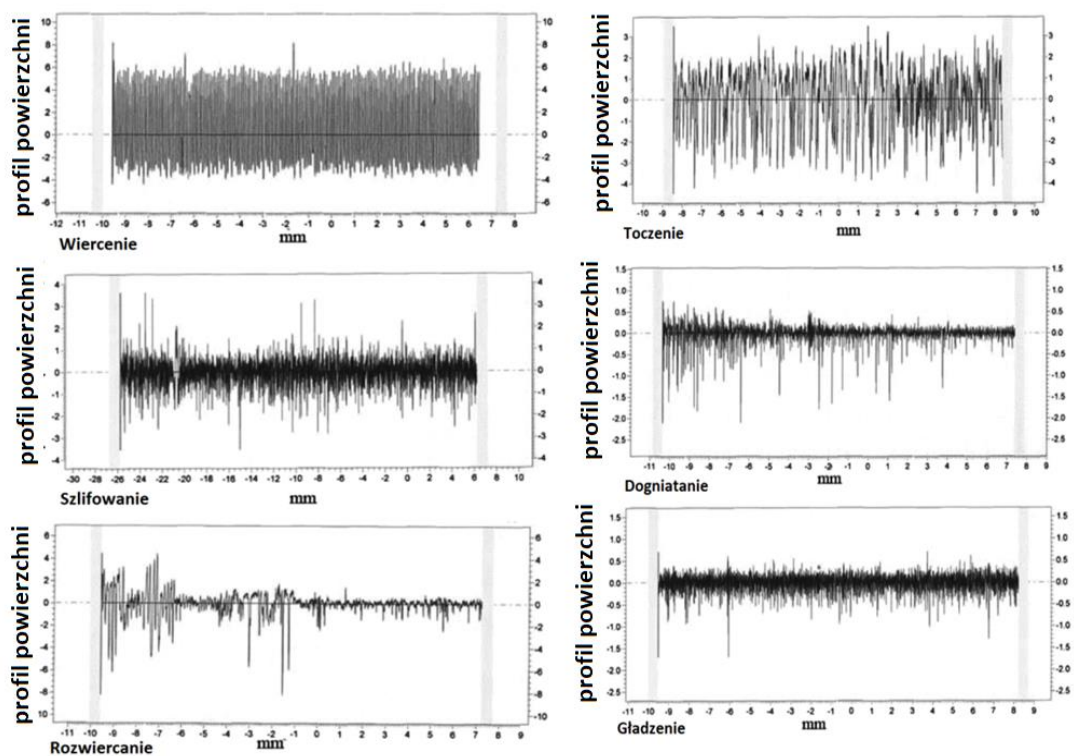
Na rys. 3 pokazano odchyłki walcowości otworu wykonanego za pomocą różnych procesów technologicznych. Gładzenie w porównaniu do innych metod obróbkowych (nagniatania, toczenia, wiercenia, szlifowania, rozwiercania) umożliwia otrzymanie wysokiej dokładności kształtu otworu (rys. 3) jak również zapewnia uzyskanie małej chropowatości powierzchni obrabianej (rys. 4).



Rys. 3. Porównanie odchyłki walcowości otworu uzyskiwanej dla różnych metod obróbkowych: a) gładzenie, b) wiercenie, c) toczenie, d) szlifowanie, e) nagniatanie, f) rozwiercanie [1]

W przypadku współpracy pary ciernej posiadającej profile chropowatości z wysokimi wierzchołkami nierówności będzie następował proces docierania naturalnego. W czasie współpracy wierzchołki obu powierzchni będą wzajemnie redukować swoją wysokość. Efekt zmniejszania się wysokości profilu chropowatości (zmniejszanie parametru profilu chropowatości R_{pk}) widoczny będzie poprzez wzrost wymiarów średnic uzyskanych podczas obróbki. Gładzenie Plateau [2, 3, 10, 11, 27, 37, 75, 106] jest stosowane w celu wyeliminowania procesu naturalnego docierania się współpracujących elementów, wzajemnie trących o siebie podczas pracy urządzenia [177].

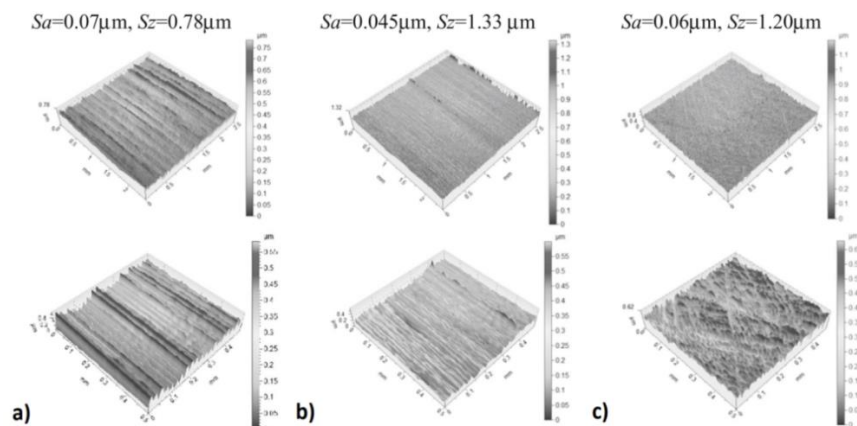
Na rys. 4 pokazano profile chropowości powierzchni uzyskane za pomocą różnych metod obróbkowych. Powierzchnie uzyskane w procesie wiercenia i toczenia posiadają największą wysokość wzniesień profilu chropowości R_{pk} . Profil powierzchni wierczonej osiąga wartość tego parametru 8 μm , wartość wysokości wzniesień profilu powierzchni toczonej dochodzi do 3 μm . Powierzchnia rozwiercana miejscami uzyskuje wartość R_{pk} 4 μm . Kolejne procesy charakteryzują się wytwarzaniem powierzchni z najniższymi wartościami R_{pk} : szlifowanie 3 μm , dogniatanie 0,5 μm i gładzenie 0,5 μm (rys. 4).



Rys. 4. Profile chropowości powierzchni uzyskane w różnych metodach obróbkowych [1]

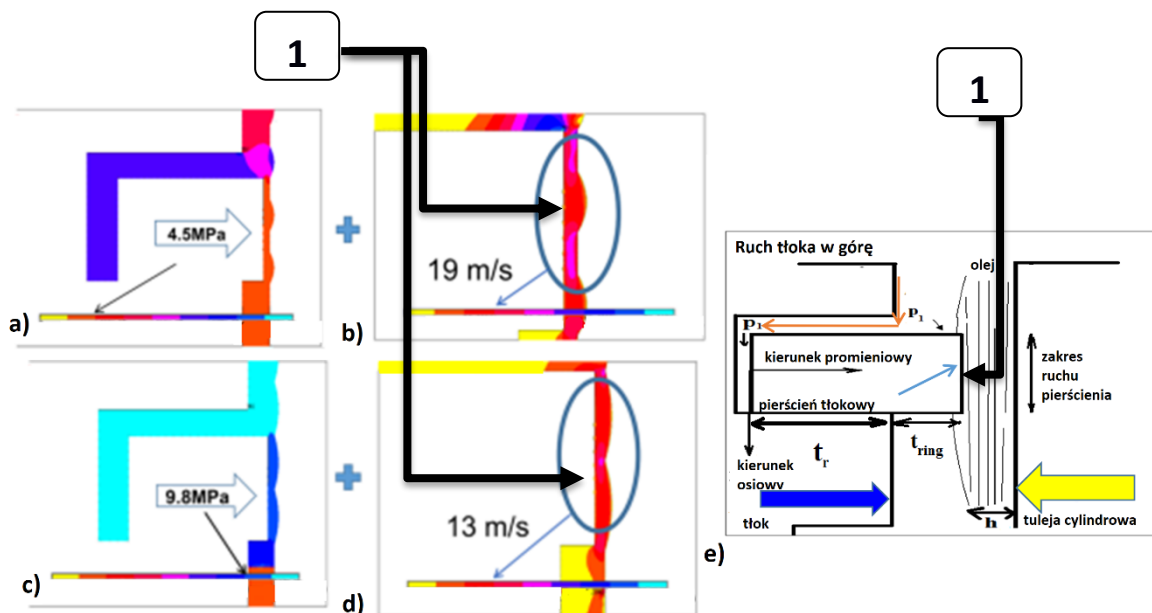
W zależności od użytej metody obróbki powierzchnia obrabiana uzyskuje charakterystyczną teksturę (rys. 5). Tekstura powierzchni gładzonej zawierać może sieć mikrokanalów lub zasobników punktowych olejowych.

Na rys. 5 zestawiono przykładowe parametry struktury geometrycznej powierzchni toczonej, szlifowanej i wierconej.



Rys. 5. Zestawienie wybranych powierzchniowych parametrów chropowatości: a) powierzchnia toczonej, b) powierzchnia szlifowana, c) powierzchnia gładzona [68]

W zależności od rodzaju tekstury powierzchni uzyskiwane są różne warunki pracy (prędkość, ciśnienie) przepływającego oleju w kanałach olejowych (rys. 6). Powierzchnia gładzona, w porównaniu do powierzchni wavecut (powierzchni posiadającej teksturę w kształcie fal), zapewnia wzrost ciśnienia w kanałach olejowych oraz zmniejsza o 31% prędkość przepływu oleju [198], a także powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia współpracujących powierzchni ciernych o 22% po zastosowaniu dodatkowego gładzenia (oprócz powierzchni cylindra) powierzchni pierścienia tłokowego (teksturowaną powierzchnię pierścienia zaznaczoną za pomocą cyfry 1 na rys. 6 [198]).

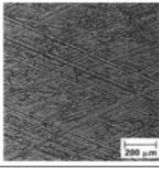
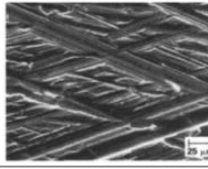
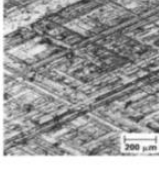

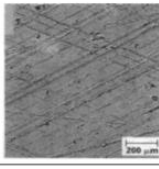
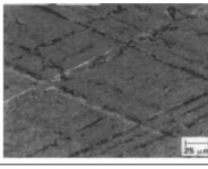
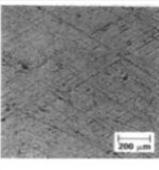
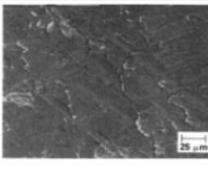
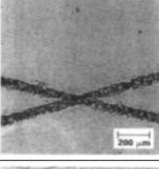
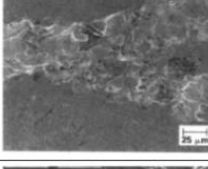
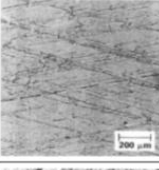
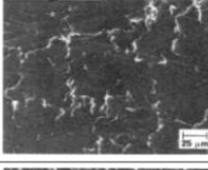
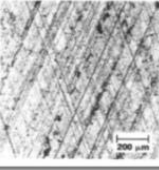
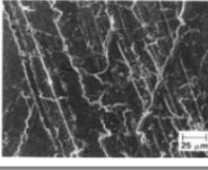


Rys. 6. Przykładowe porównanie warunków hydrodynamicznych dla wybranych tekstur powierzchni cylindra i pierścienia tłokowego: a) powierzchnia cylindra szlifowana „wavecut” i gładka powierzchnia pierścienia, b) powierzchnia cylindra szlifowana „wavecut” i gładzona powierzchnia pierścienia, c) powierzchnia cylindra gładzona i gładka powierzchnia pierścienia, d) powierzchnia cylindra gładzona i gładzona powierzchnia pierścienia, e) schemat współpracy pierścienia z cylindrem; cyfra 1 wskazuje teksturowaną powierzchnię pierścienia tłokowego [198]

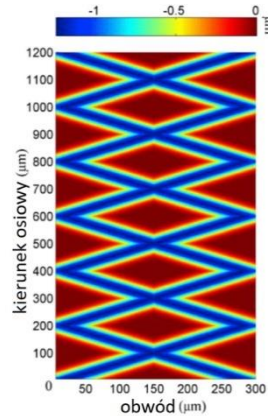
1.2. Rodzaje tekstur powierzchni współpracujących

W tab. 2 zestawiono metody obróbkowe kształtujące powierzchnię gładzi cylindrów spalinowych. Przedstawione sposoby obróbki zostały scharakteryzowane i opisane przez Kurzyńę [105]. Oprócz krótkiej charakterystyki metod, tabela przedstawia informacje o możliwych do uzyskania parametrach profilu chropowatości powierzchni.

Tab. 2. Metody kształtowania powierzchni gładzi cylindrów spalinowych [105]

Charakterystyka procesu honowania	Obrazy struktury		Wybrane parametry chropowatości
Standardowe Honowanie dwuetapowe narzędziami o różnej ziarnistości			$R_a = 0,8 \mu\text{m}$ $R_z = 8 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°
Plateau trzyletapowe Po dwóch etapach stosuje się trzeci, który usuwa szczyty nierówności i wytwarza powierzchnię nośną. W wyniku tego procesu powstają na powierzchni w regularnych odstępach głębsze rysy stanowiące zasobniki oleju			$R_a = 0,6 \mu\text{m}$ $R_z = 6 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°
Brush honing (honowanie szczotkowe) W trzecim etapie drobnoziarniste osetki usuwają z powierzchni gładzi jedynie cząstki luźno związane z podłożem			$R_a = 0,7 \mu\text{m}$ $R_z = 7 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°
Honowanie strumieniowe W czwartym etapie za pomocą strumienia cieczy o ciśnieniu około 12 MPa usuwa się cząstki bardzo słabo związane z podłożem, a w wyniku wypłukiwania cząstek węglików powstają zagłębienia stanowiące zasobniki oleju			$R_a = 0,4 \mu\text{m}$ $R_z = 5 \mu\text{m}$ Kąt honowania 40 – 50°
Obróbka laserowa Na powierzchni po honowaniu wykonuje się promieniami lasera zagłębienia w postaci linii, które stanowią zasobniki oleju. Po teksturowaniu laserowym powierzchnię honuje się bardzo drobnoziarnistymi osetkami			$R_a = 0,1 \mu\text{m}$ $R_z = 1 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°
Gładkie honowanie Trzeci etap obróbki jest wykonywany bardzo drobnoziarnistymi osetkami diamentowymi. Powierzchnia jest zbliżona do powierzchni uzyskanej po dotarciu silnika			$R_a = 0,35 \mu\text{m}$ $R_z = 3,5 \mu\text{m}$ Kąt honowania 30 – 60°
Gładkie honowanie spiralne W celu obniżenia zużycia oleju rysy honownicze przecinają się pod kątem około 135°			$R_a = 0,45 \mu\text{m}$ $R_z = 4 \mu\text{m}$ Kąt honowania ok. 135°

Na rys. 7 pokazano teoretyczny sposób dystrybucji oleju oraz grubość warstwy oleju znajdującego się w rysach olejowych, których zadaniem jest równomierne zasilanie w środek smarny współpracujących powierzchni (rys. 14). W literaturze odnaleźć można także badania profilu ciśnienia oleju w zależności od głębokości kanałów olejowych [10].

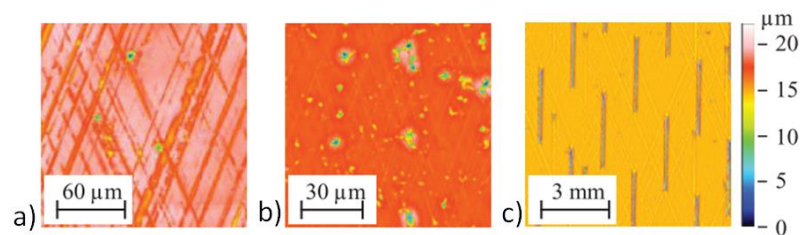


Rys. 7. Grubość warstwy oleju smarowego w kanałach olejowych [76]

Na rys. od 8 ÷ 13 zilustrowano możliwe sposoby teksturowania powierzchni roboczej cylindra silnika, które poddawane były badaniom eksperymentalnym wpływu rodzaju tekstury na parametry profilu chropowatości, uzyskane po określonym czasie współpracy pary ciernej. Powierzchnia z teksturą plateau, z kątem gładzenia $\alpha = 45^\circ$ (rys. 8) po 1200 h pracy uzyskała parametr $R_{vk} = 0,3 \div 0,5 \mu\text{m}$. Po tym samym czasie pracy powierzchnia gładzona z kątem $\alpha = 140^\circ$ (rys. 8) posiada parametr $R_{vk} = 1,0 \div 2,0 \mu\text{m}$ [149], co wskazuje na mniejsze zużycie się powierzchni z kątem gładzenia $\alpha = 45^\circ$.

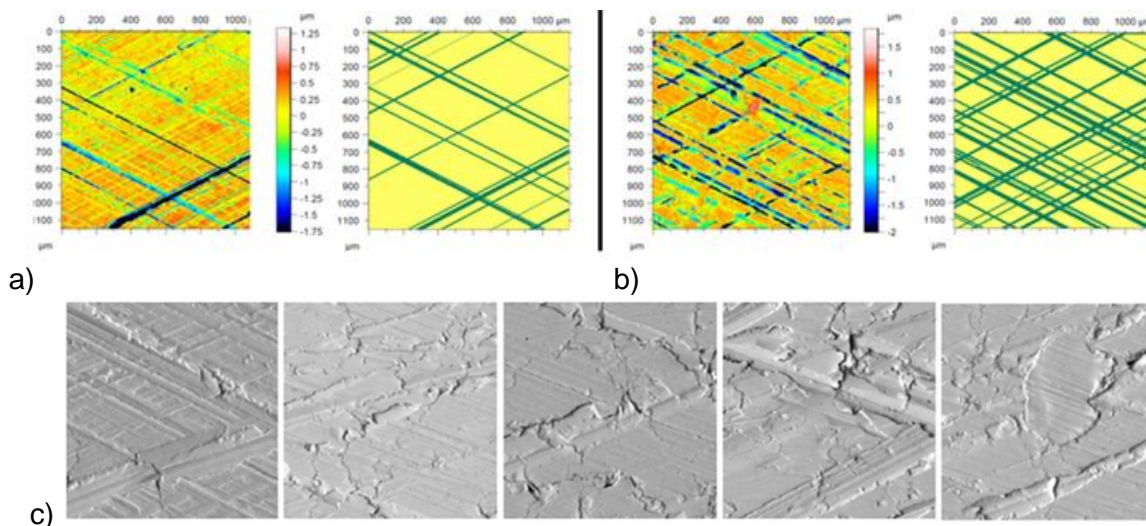


Rys. 8. Przykład tekstur cylindra z kątem gładzenia: a) 45° , b) 140° , c) powierzchnia gładzona z siatką zasobników punktowych wykonanych za pomocą lasera [149]



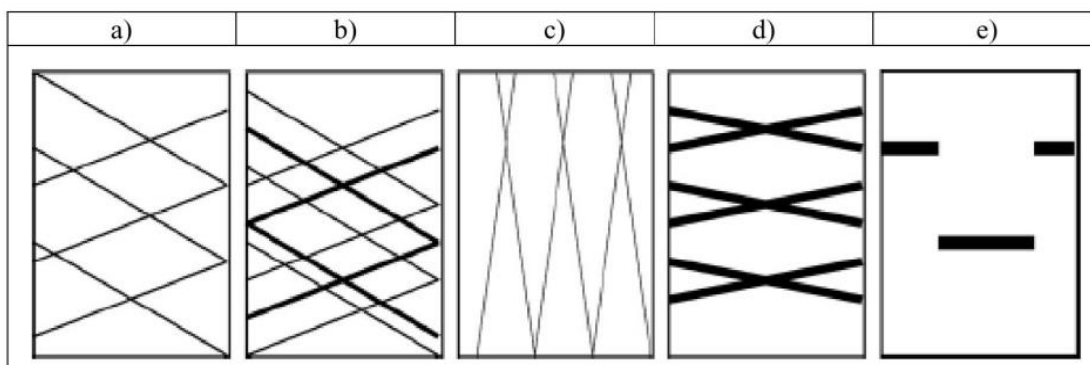
Rys. 9. Przykład tekstur cylindra: a) gładzenie plateau, b) gładzenie warstwy AlSi, c) teksturowanie laserowe [91]

Dimkowski [32] i Wang [172] omówili zagadnienie weryfikacji materiału obrabianego zalegającego w kanałach olejowych i blokującego przepływ oleju. Na rys. 10 pokazano teksturę powierzchni gładzonej uzyskaną za pomocą narzędzia ceramicznego *PHC* oraz za pomocą narzędzia diamentowego *PHD* oraz przykładowe zdjęcia powierzchni z zalegającymi w kanałach olejowych fragmentami materiału obrabianego.



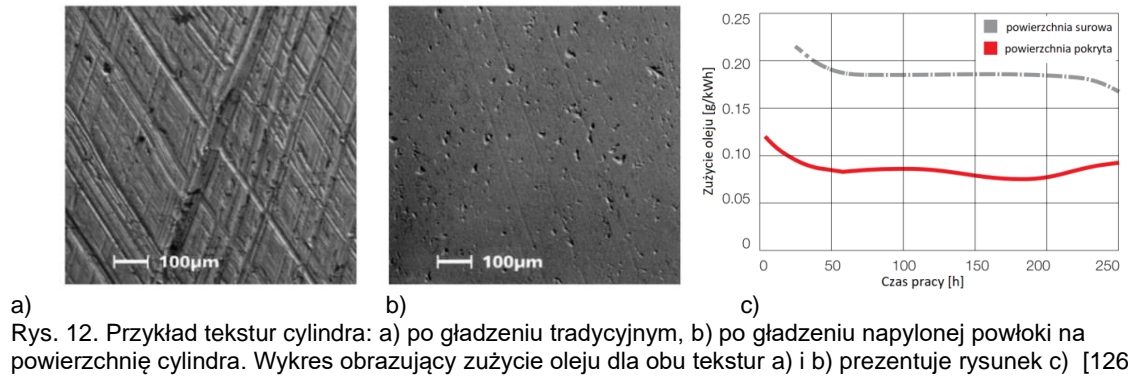
Rys. 10. Przykład tekstur powierzchni cylindra i rozmieszczenia kanałów: a) wykonanych narzędziem ceramicznym *PHC*, b) uzyskanych za pomocą narzędzia diamentowego *PHD*, oraz c) zdjęcia powierzchni z zalegającymi w kanałach olejowych fragmentami materiału obrabianego otworu [125]

Kształt siatki rys jest uzależniony od wartości stosowanych parametrów obróbkowych, głównie od prędkości obrotowej i prędkości skoku głowicy (rys. 11).



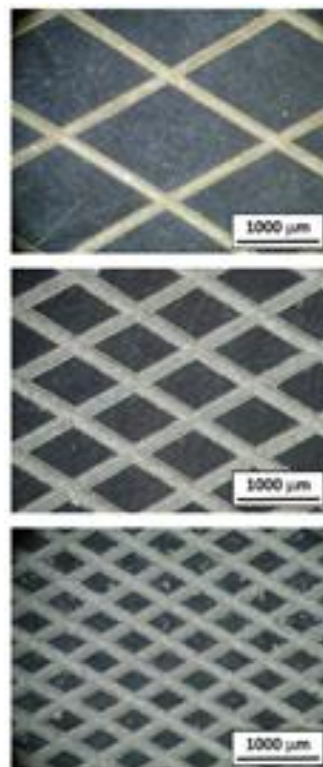
Rys. 11. Metody gładzenia otworów walcowych: a) gładzenie tradycyjne jedno zabiegowe, b) gładzenie plateau $\alpha = 45^\circ$, c) gładzenie spiralne $\alpha = 130^\circ$, d) gładzenie laserowe, e) teksturowanie laserowe [67]

Na rys. 12 pokazano powierzchnie uzyskane po gładzeniu: a) konwencjonalnym, b) gładzeniu napyłonej warstwy *SUMEBore* o grubości $0,12 \div 0,15$ mm [126].



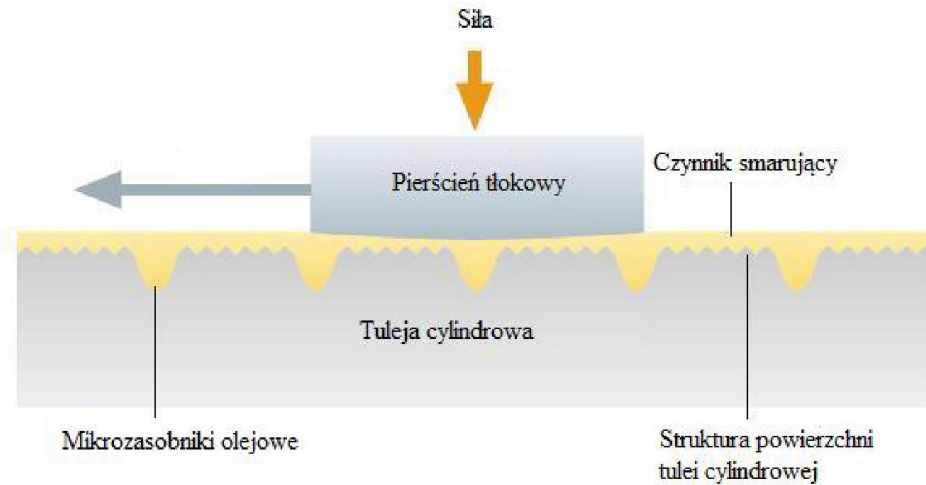
Zaletą stosowania warstw nanoszonych za pomocą plazmy na powierzchnię cylindrów silnika jest zmniejszenie ilości zużywanego oleju (rys. 12) jak również poprawa odprowadzania ciepła z powierzchni roboczych podczas pracy zespołu tłok - cylinder [126].

Kształt tekstury powierzchni cylindra może również być zmieniany za pomocą gęstości rozmieszczenia ścieżek ziarn skrawających na powierzchni obrabianej (rys. 13). Zbyt blisko występujące obok siebie rowki utworzą szerszy kanał olejowy [125].



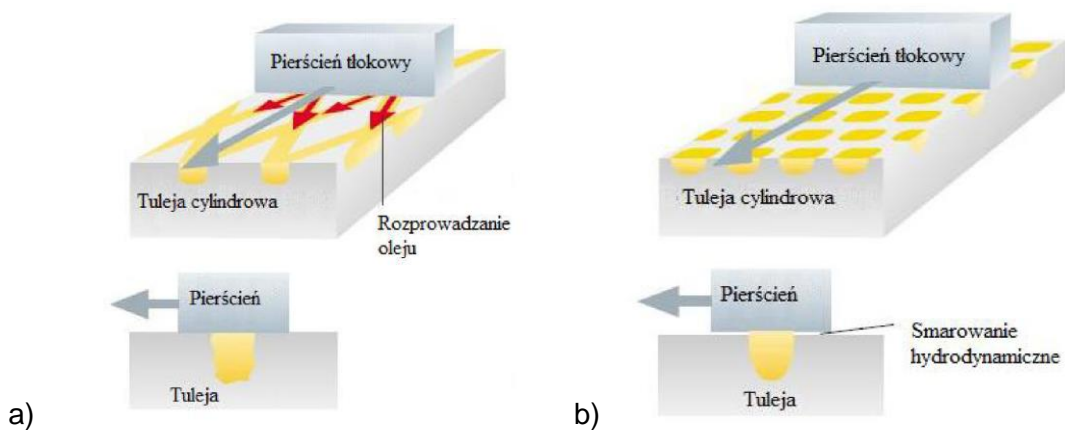
Rys. 13. Przykład tekstur powierzchni cylindra z różną gęstością ścieżek dystrybuujących olej smarny [140]

Na rys. 14 zobrazowano warstwę oleju oddzielającą pierścień tłokowy od powierzchni cylindra. Zasobniki olejowe od momentu rozruchu silnika dostarczają środek smarny pomiędzy współpracującą powierzchnią pierścienia tłokowego oraz powierzchnię gładzi cylindra.



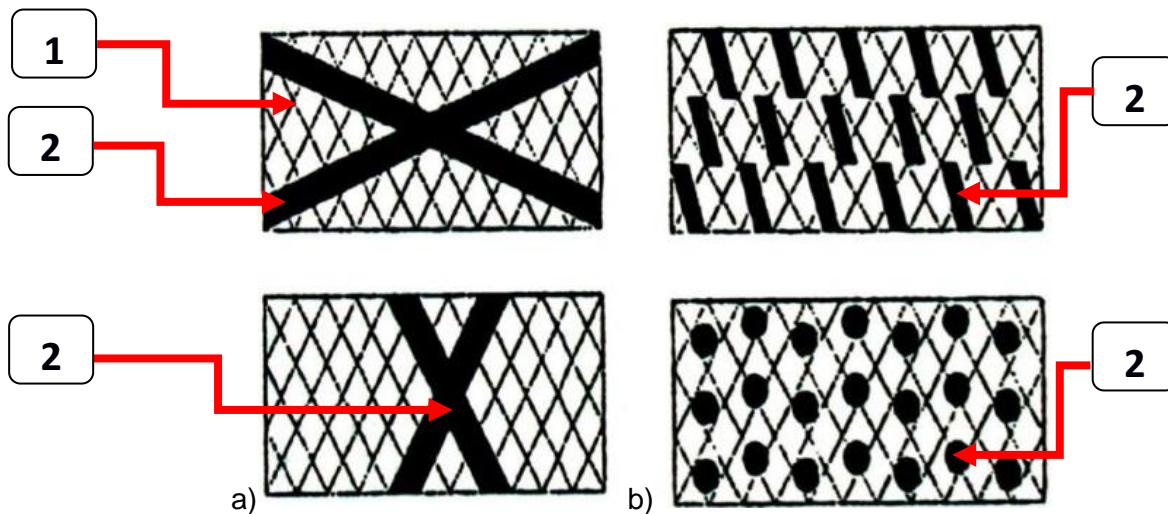
Rys. 14. Schemat współpracy pierścienia tłokowego z gładzią cylindra [123]

Mikrozasobniki olejowe mogą mieć kształt rys prostoliniowych (rys. 15 ÷ 17), rys krzywoliniowych (rys. 35 ÷ 49), zasobników punktowych (rys. 16, rys. 18 ÷ 22) oraz linii o skończonej długości (rys. 16, rys. 18).



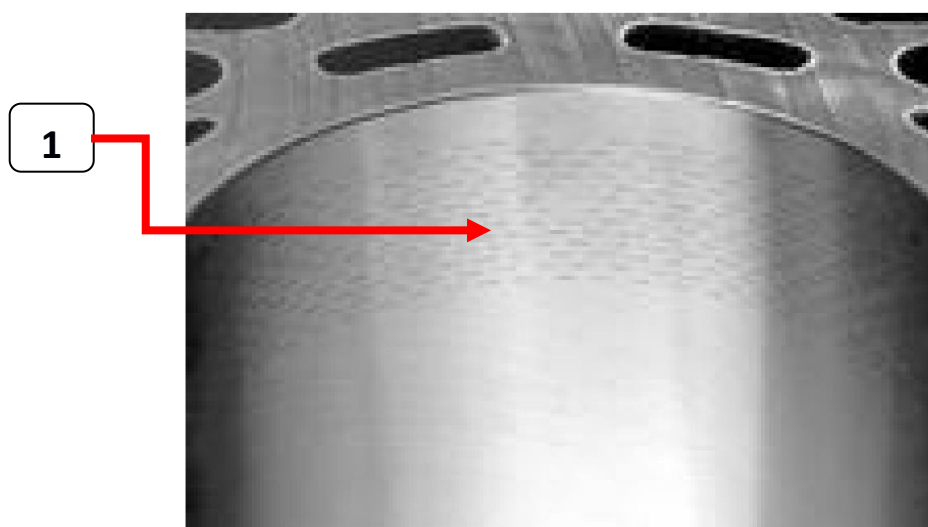
Rys. 15. Schemat współpracującego pierścienia tłokowego z gładzią cylindra posiadającą mikrozasobniki olejowe w kształcie: a) rys prostoliniowych, b) zasobników punktowych [123]

Kanały i mikrozasobniki olejowe, wykonane za pomocą lasera, mogą tworzyć na powierzchni gładzonego otworu różne wzory (rys. 16).



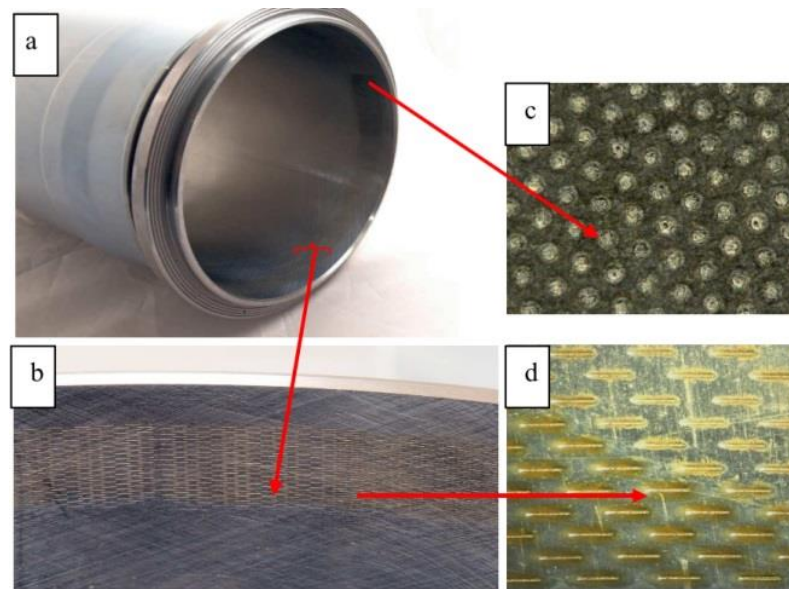
Rys. 16. Przykład tekstur cylindrów gładzonych i teksturowanych za pomocą lasera: a) siatka rys, b) zasobniki liniowe i punktowe; cyfra 1 wskazuje siatkę rys otrzymaną po gładzeniu, cyfra 2 wskazuje dodatkową teksturę wykonaną za pomocą lasera, wytworzoną w górnej części cylindra [77]

Kurzyna [105] opisał teksturowaną powierzchnię gładzi tulei cylindrów silników spalinowych (rys. 17). Szczególnie istotnym dla żywotności elementów współpracujących w parze cierniej tłok - cylinder jest zastosowanie na powierzchni cylindra tekstury w postaci mikrozasobników olejowych, ze względu na występujące większe zużycie cylindra szczególnie w jego górnej części [100].



Rys. 17. Przykład tekstury górnej części cylindra. Za pomocą cyfry 1 wskazano mikrozasobniki olejowe wykonane z użyciem lasera [105]

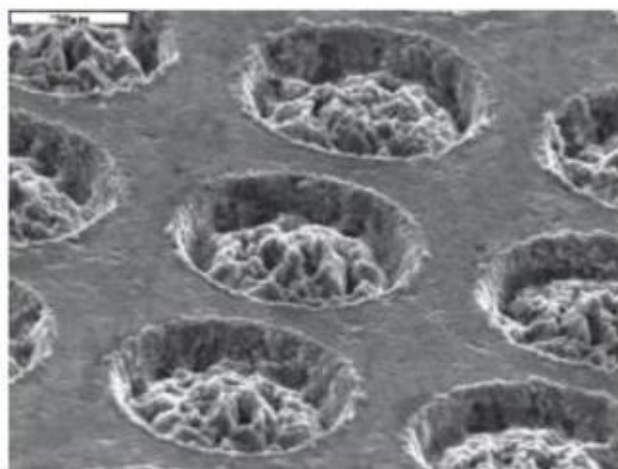
Napadłek [122] zaprezentował różne wzory tekstury powierzchni wykonywanych za pomocą lasera, w postaci zasobników olejowych w kształcie punktów i rys, umiejscowionych w górnej części gładzi tulei cylindrowej (rys. 18).



Rys. 18. Przykład tekstur górnej części cylindra: a) widok tulei cylindrowej, zaś b), c), d) tekstury laserowe [122]

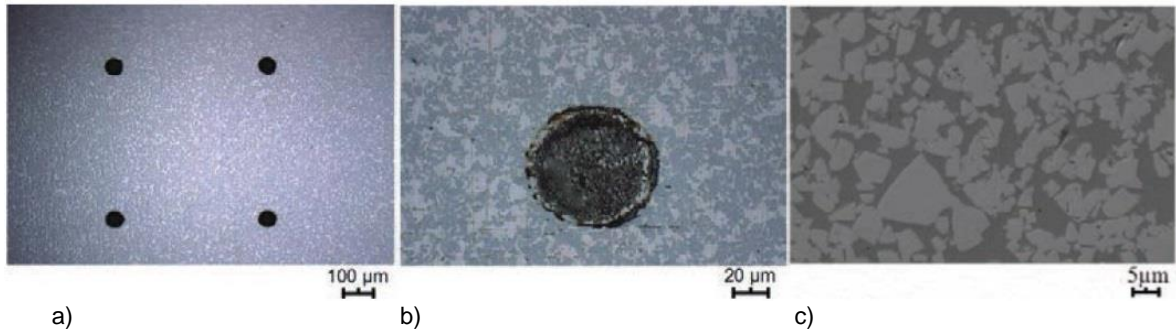
Na rys. 19 ÷ 21 pokazano przykłady tekstur gładzi cylindrów posiadających mikrozasobniki olejowe w postaci kieszonek okrągłych wykonanych za pomocą lasera [72, 75, 77, 98, 140], na rys. 22 z użyciem nagniatka [60, 103] a na rys. 27 wykonane przy pomocy narzędzia mechatronicznego.

Punktowe mikrozasobniki olejowe (rys. 19) zapewniają obecność oleju pomiędzy powierzchniami pierścieni tłokowych oraz cylindra bezpośrednio po rozruchu silnika. Teksturowany, oprócz gładzi cylindra, może być również pierścień tłokowy [199].



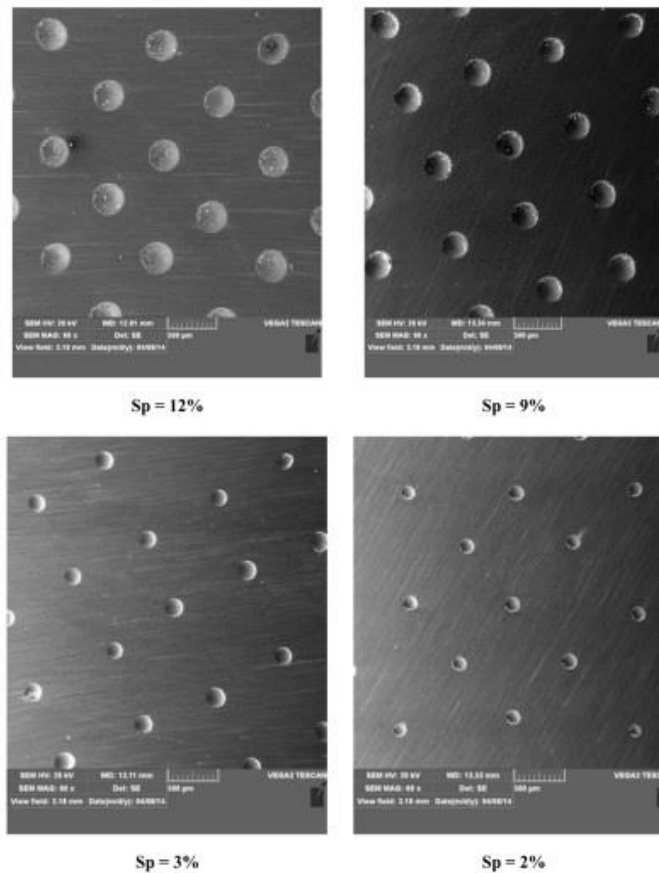
Rys. 19. Przykład tekstury laserowej gładzi cylindra [140]

Zasobniki punktowe na powierzchni obrabianej rozmieszczone mogą być z różną gęstością oraz w różnych kierunkach, tworząc charakterystyczne kształty na powierzchni gładzi cylindra (rys. 20 i 21).



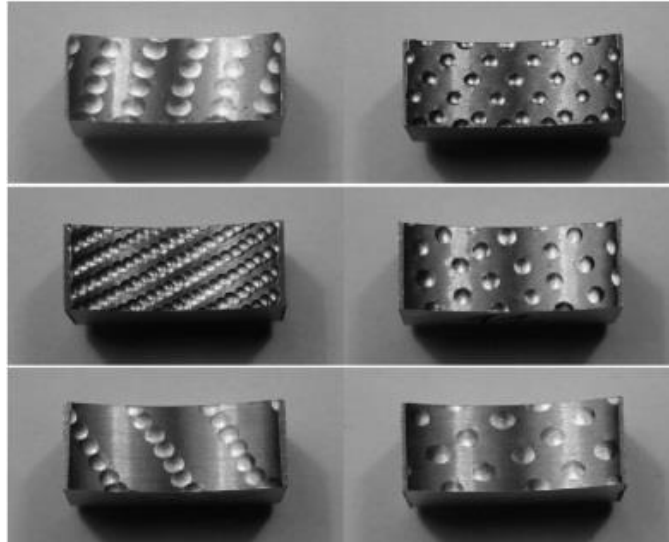
Rys. 20. Przykład tekstur cylindra: a) siatka otworów, b) pojedynczy zasobnik, c) powierzchnia polerowana [98]

Schmid [149] informuje, że wielkość zasobników wykonywanych za pomocą lasera wynosi $50 \div 80 \mu\text{m}$ przy czym trwają również badania nad teksturą złożoną z drobniejszych zasobników (o szerokości mniejszej od $40 \mu\text{m}$).



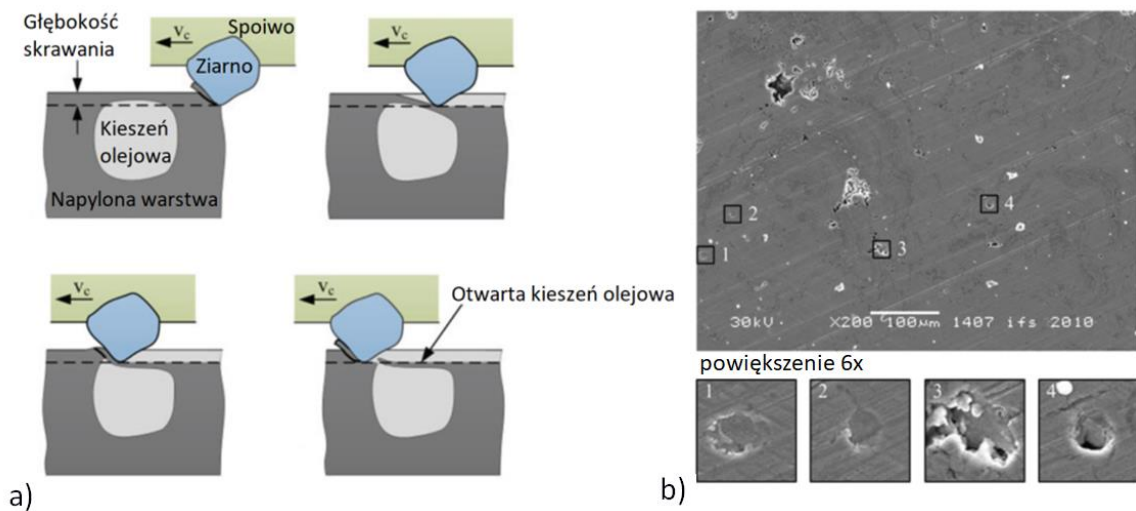
Rys. 21. Przykład tekstury laserowej gładzi cylindra z różną gęstością zasobników punktowych [44]

Mikrozasobniki punktowe mogą być wykonane także za pomocą narzędzia nagniatającego (rys. 22), a także poprzez gładzenie napyłonej warstwy FeC0.8 (rys. 23).



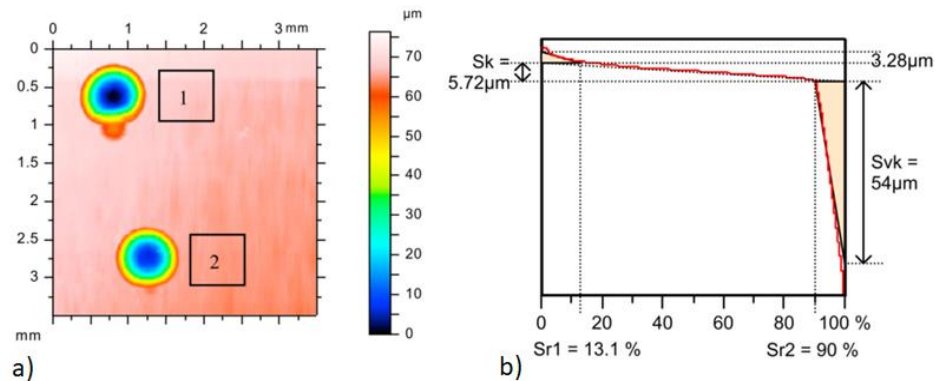
Rys. 22. Przykład nagniatanej tekstury cylindra z różnymi wzorami punktowej tekstury zasobników olejowych [102]

Na rys. 23 przedstawiono sposób powstawania miejscowych mikrozasobników olejowych, poprzez otwieranie komór powietrznych znajdujących się w naniesionej na powierzchnię cylindra warstwie FeC0.8.



Rys. 23. Przykład tekstury gładzi cylindrowej z napyłoną warstwą FeC0.8: a) etapy powstawania kieszeni olejowej, b) widok wytworzonych zasobników olejowych [74]

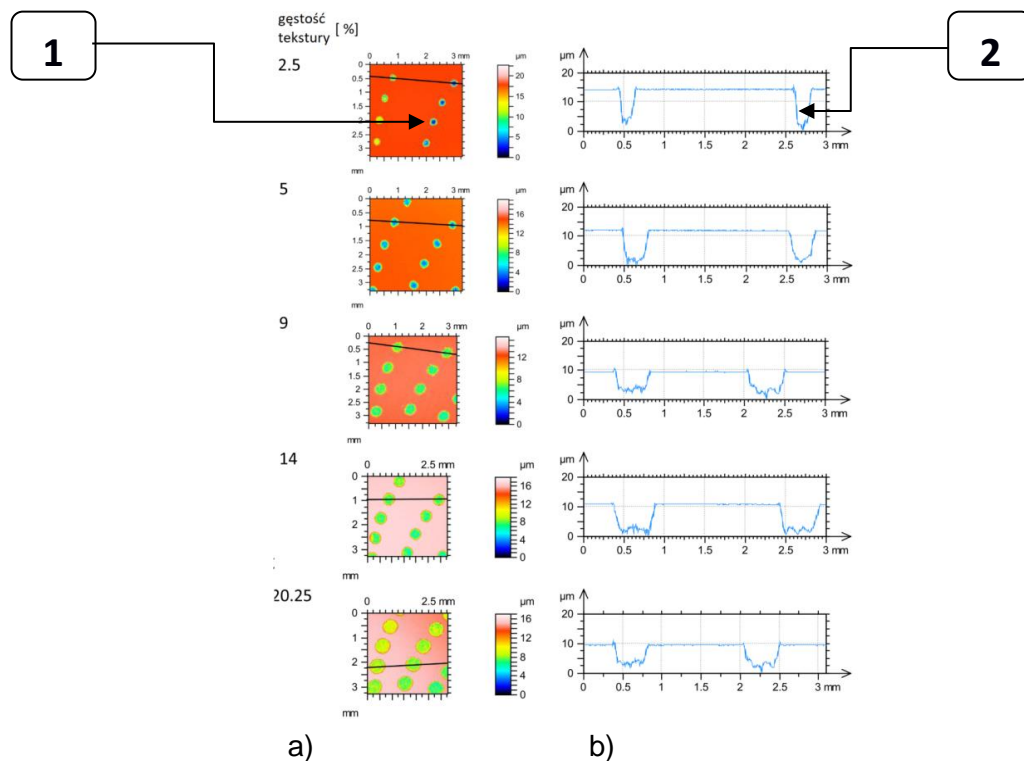
Sposobem obliczania ilości oleju znajdującego się w mikrozasobnikach punktowych zajmował się Graboń (rys. 24).



Rys. 24. Głębokość mikrozasobników olejowych a), krzywa nośności b) [59]

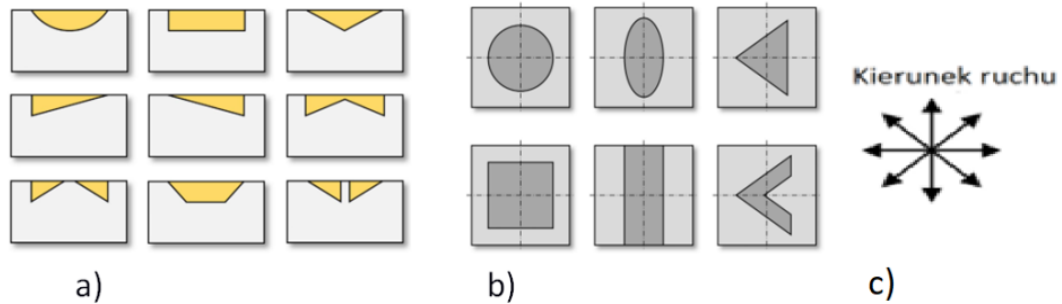
Punktowe zasobniki olejowe mogą być, podobnie jak siatka rys (rys. 13), rozmieszczone z różną gęstością (rys. 25) na teksturowanej powierzchni [166, 181]. Gęstość rozmieszczenia mikrozasobników w bardzo wyraźny sposób wpływa na współczynnik tarcia [166, 181, 187]. Vos [181] przeprowadził pomiary współczynnika tarcia dla teksturowanej jednej oraz obu trących współpracujących powierzchni.

Przykład powierzchni gładzi cylindra z różną gęstością rozmieszczenia zasobników punktowych pokazano na rys. 25.



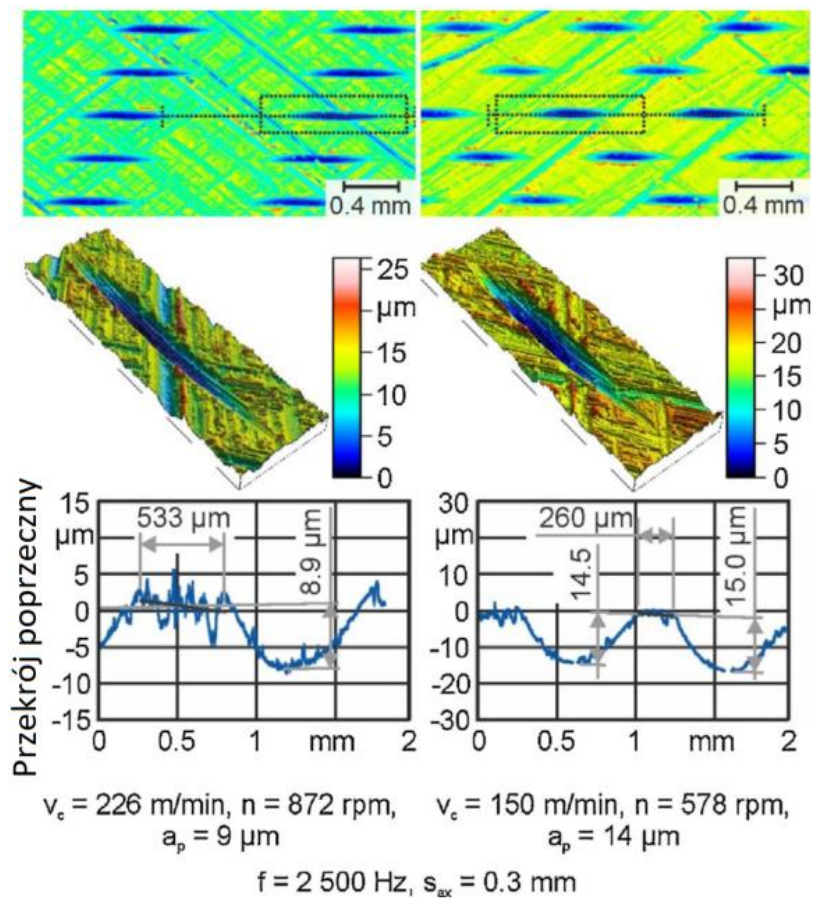
Rys. 25. Przykład tekstury cylindra o różnej gęstości rozmieszczenia na powierzchni (2,5%, 5%, 9%, 14%, 20,25%), w postaci zasobników punktowych oraz profil przekroju kanałów [181]. W kolumnie a) pokazano obraz powierzchni, w kolumnie b) pokazano przekrój przez zasobniki olejowe; cyfra 1 wskazuje zasobniki punktowe, cyfra 2 wskazuje przekrój przez zasobnik punktowy.

Zasobniki olejowe mogą posiadać różne przekroje kanałów, dodatkowo powierzchnie o różnych teksturach i wzajemnie trące o siebie mogą współpracować w różnych kierunkach (rys. 26). Kierunek współpracy oraz ułożenia tekstury odgrywa ważną rolę na charakter współpracy pary ciernej.



Rys. 26. Przykładowe kształty kieszeni olejowych: a) przekrój, b) widok z góry, c) możliwe kierunki współpracy pary ciernej [63]

Na rys. 27 przedstawiono zasobniki olejowe w kształcie prostoliniowych rys wykonanych za pomocą narzędzia mechatronicznego.

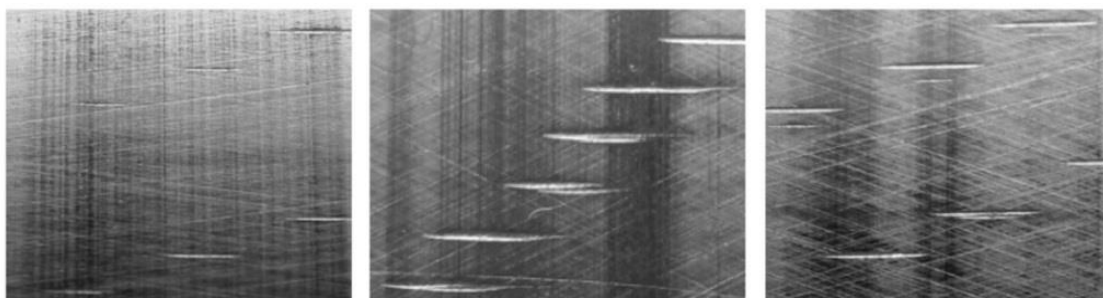


Rys. 27. Przykład tekstury cylindra wykonanej za pomocą specjalnego narzędzia mechatronicznego [26]

Pawlus [133] informuje, że występuje możliwość teksturowania gładzi cylindra poprzez gładzenie przeprowadzane z chwilowo wstrzymanym ruchem głowicy w kierunku osiowym (tylko z włączonymi obrotami głowicy), co powoduje powstawanie sieci kanałów olejowych ułożonych w kierunku poziomym lub poprzez czasowe wyłączenie obrotów (z zachowanym ruchem głowicy w kierunku osiowym), co umożliwi powstawanie siatki rys ukierunkowanych równoległe do osi gładzonego cylindra.

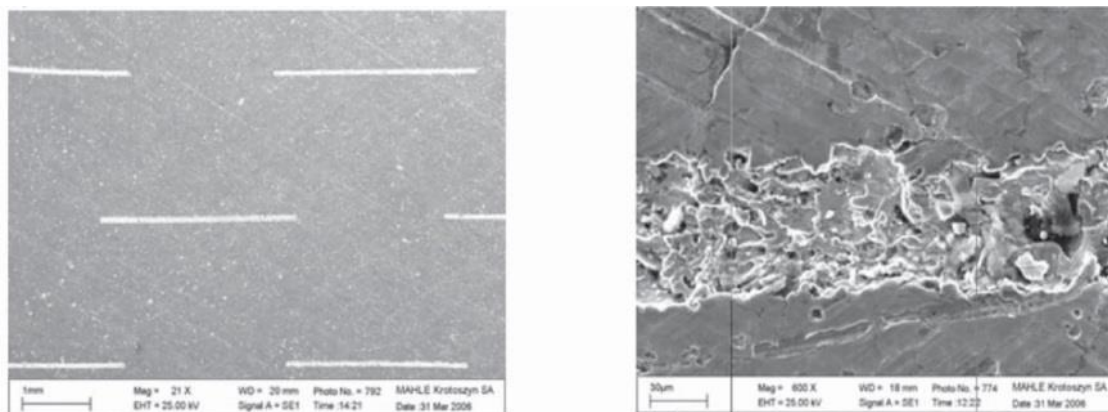
W literaturze odnaleźć można zalecenia stosowania dodatkowego teksturowania gładzi tulei cylindrowej po obróbce plateau, w celu zapewnienia hydrodynamicznego ciśnienia między pierścieniem tłokowym a powierzchnią cylindra [60, 65, 166, 188]. Vladescu [166] szczegółowo opisuje jak kształt, szerokość, głębokość oraz gęstość rozmieszczenia dodatkowej tekstury wpływa na zmniejszenie współczynnika tarcia w zespole tłok - cylinder.

Na rys. 28 pokazano teksturę powierzchni posiadającą kanałki olejowe w postaci rys, uzyskanych za pomocą narzędzia dogniatającego, które można wykonać po obróbce plateau na powierzchni gładzonego otworu.
















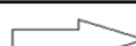

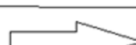

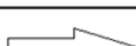




Rys. 28. Przykład tekstury cylindra z widocznymi rysami wykonanymi za pomocą narzędzia dogniatającego specjalnej konstrukcji [60]

Na rys. 29 pokazano rysy olejowe uzyskane za pomocą lasera, które mogą posłużyć jako dodatkowe zasobniki olejowe. Gruszka [65] omawia zalety stosowania rys olejowych, m.in. zmniejszenie współczynnika tarcia w zespole tłok - cylinder oraz zmniejszenie ilości toksycznych związków emitowanych do otoczenia w spalinach.



Rys. 29. Przykład tekstur cylindra: a) rysy wykonane z użyciem lasera, b) widok pojedynczej rysy [65]

Przykłady różnorodnych kształtów tekstury powierzchni oraz możliwych kierunków współpracy trących powierzchni pokazano na rys. 30.

Kształt	szerokość (μm)	wysokość (μm)	wys. / szer.	kierunek ruchu
	41	4,5	0,11	
	40	4,5	0,11	
	47	4,5	0,10	
	70	6	0,09	
	42	4,5	0,11	
	40	4,5	0,11	
	25	1,8	0,07	
	40	4,5	0,11	
	40	4,5	0,11	
	85 x 60 x 35	4,5	0,12	
				

Rys. 30. Przykłady różnorodnych tekstur, wybranych gabarytów wzoru tekstury oraz kierunków współpracy powierzchni [24]

Istnieje możliwość poprawy parametrów profilu chropowatości, oraz usunięcia cząstek materiału pozostałego po gładzeniu, poprzez zastosowanie dodatkowej obróbki gładzenia wykonywanego za pomocą elastycznych szczotek ściernych [5, 104]. Interesującym zagadnieniem dotyczącym teksturowania powierzchni jest również zagadnienie teksturowania za pomocą mikrofrezów o średnicy 0,025 mm [66].

1.3. Kinematyka gładzenia otworów

1.3.1. Gładzenie otworów walcowych ze stałą kinematyką

W trakcie obróbki osetki ściernie, rozmieszczone promieniowo w głowicy gładzącej (rys. 31), są dociskane do powierzchni obrabianej i zapewniają wydajne usuwanie materiału obrabianego [88]. Wydajność usuwania materiału jest uzależniona od docisku osetki [173]. Praca osetek ściernych polega na zasadzie samoostrzenia, czyli na jednoczesnym mikroskrawaniu i ścieraniu, których wielkość uzależniona jest od kierunku sił działających na ziarno. Kierunek sił działających na ziarno uzależniony jest od kierunku wektora prędkości V_c . Otwory o małych średnicach obrabia się narzędziem posiadającym jedną osetkę ścierną [150], otwory o średnicach większych gładzone są narzędziem wieloosetkowym [8, 28].

Podstawowe wzory definiujące kinematykę gładzenia (rys. 31) to:

- wypadkowa prędkość skrawania [m / min]

$$V_c = \sqrt{V_{ax}^2 + V_{az}^2} \quad (1.1)$$

- liniowa prędkość głowicy w ruchu posuwisto - zwrotnym [m / min]

$$V_{ax} = 2Ln_{ax} \quad (1.2)$$

gdzie:

L - długość skoku głowicy w kierunku osiowym, w ruchu posuwisto - zwrotnym [m]

n_{ax} - częstotliwość skoku głowicy w ruchu posuwisto-zwrotnym $\left[\frac{1}{\text{min}} \right]$

V_{az} - prędkość obwodowa głowicy [m / min]

$$V_{az} = \frac{\pi dn}{1000} \quad (1.3)$$

gdzie:

n - prędkość obrotowa głowicy [min^{-1}]

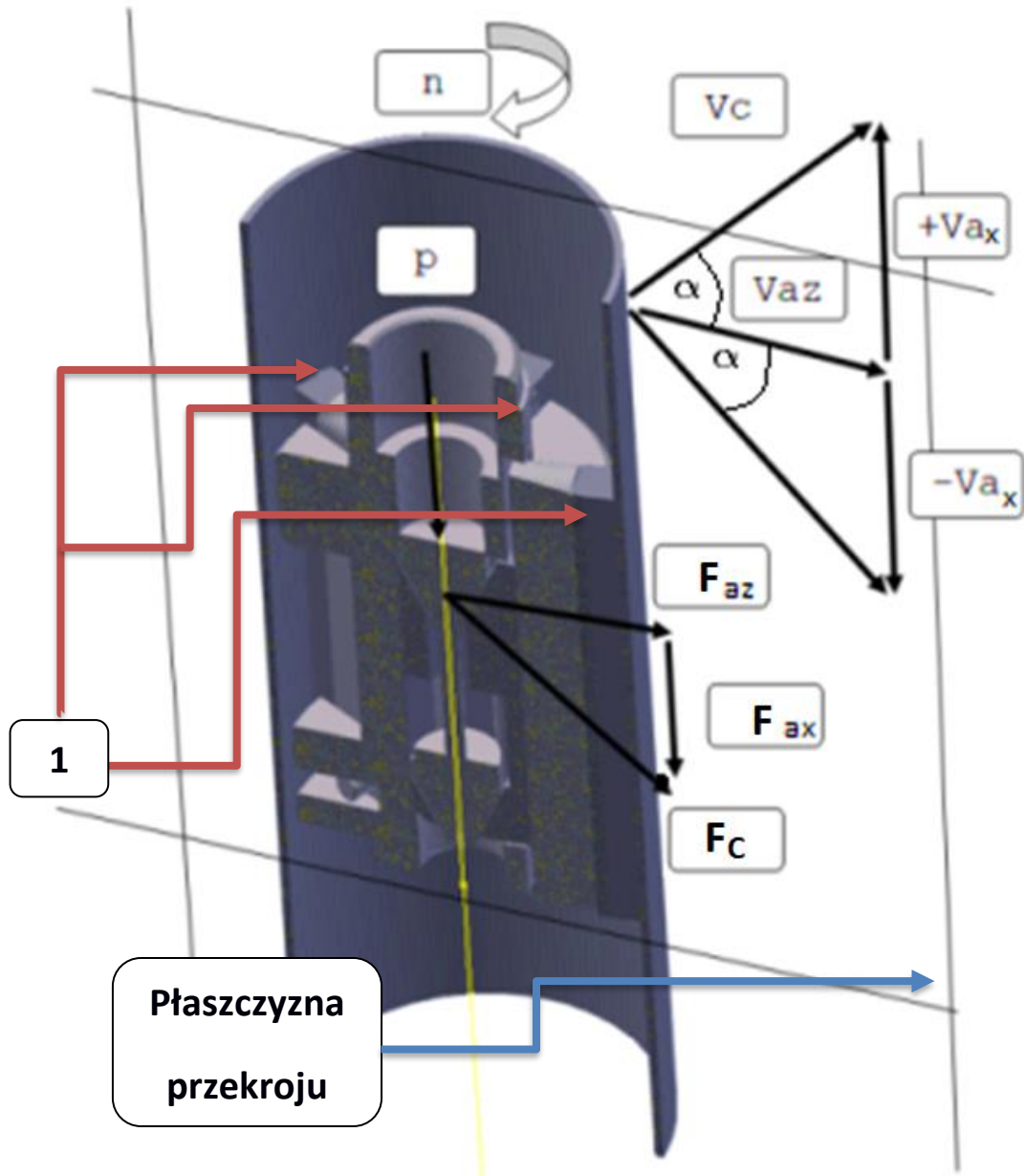
d - średnica gładzonego otworu [mm]

oraz

$$\text{tg } \alpha = \frac{V_{ax}}{V_{az}} \quad (1.4)$$

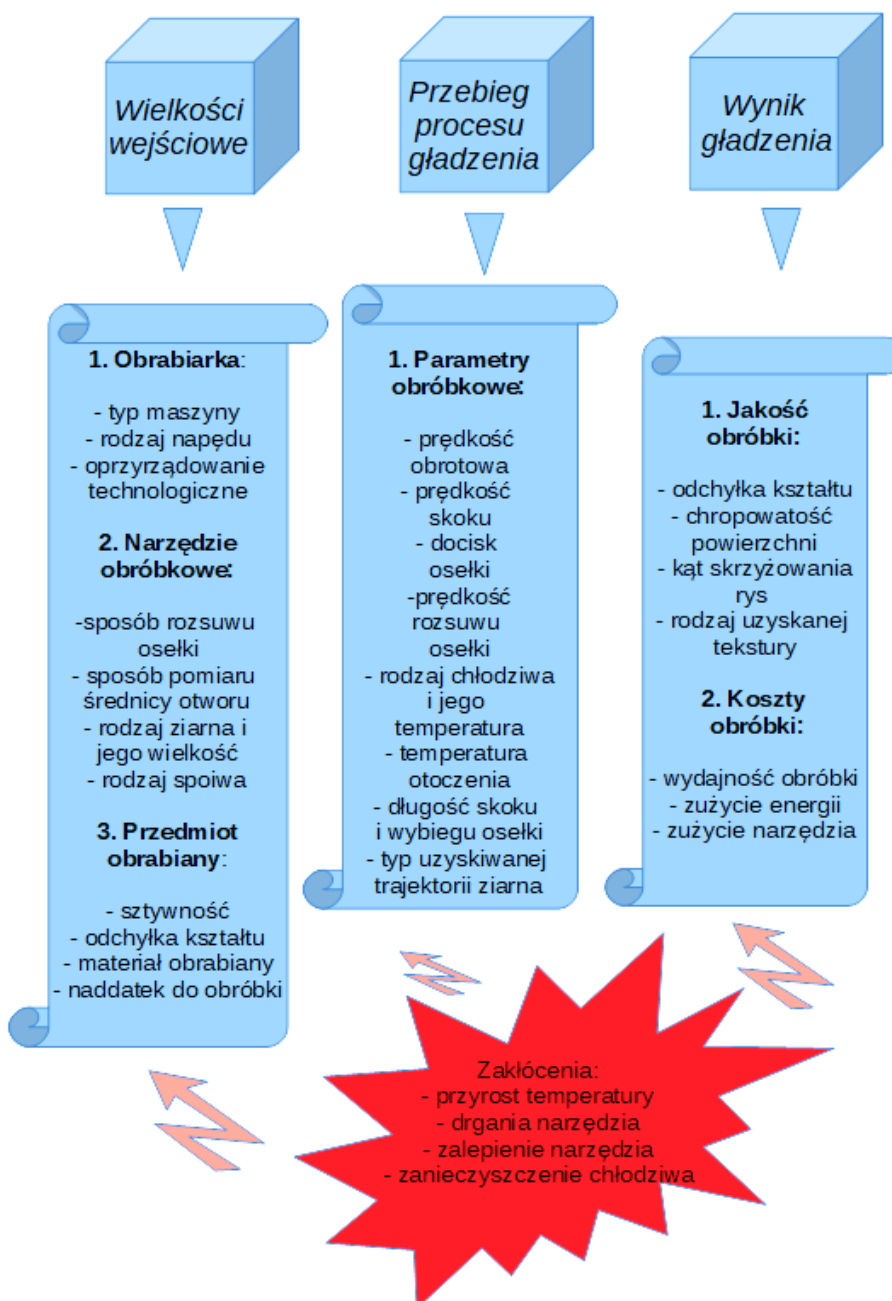
gdzie: α - kąt gładzenia [$^\circ$]

Na rys. 31 zaprezentowano układ sił i prędkości występujących w procesie gładzenia otworu walcowego.



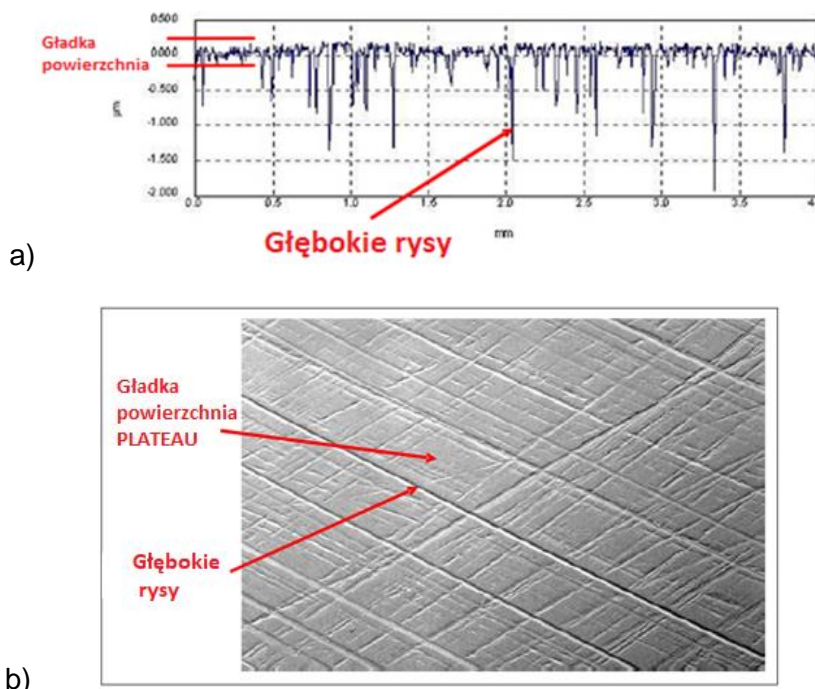
Rys. 31. Oznaczenie składowych siły i prędkości występujące w procesie gładzenia: V_{ax} – prędkość liniowa osiowa głowicy, V_{az} – prędkość obwodowa głowicy, V_c – wypadkowa prędkość skrawania, F_{az} – siła działająca w kierunku stycznym (promieniowym), F_{ax} – siła działająca w kierunku osiowym, F_c – siła wypadkowa, α – kąt gładzenia; cyfra 1 wskazuje ośkę ścierną [155]

Na rys. 32 pokazano systemowy model gładzenia, w którym wymieniono czynniki regulujące przebieg procesu [73, 129, 164, 165, 180] oraz sterowalne parametry obróbkowe i czynniki zakłócające wpływające na wynik gładzenia, i decydujące o przebiegu obróbki (uzyskana odchyłka średnicy otworu, odchyłka kształtu, parametry profilu chropowatości). Poznanie wzajemnego oddziaływania wszystkich istotnych wielkości procesu gładzenia umożliwi sprawną ingerencję w proces w celu jego optymalizacji [73].



Rys. 32. Model strukturalny procesu gładzenia

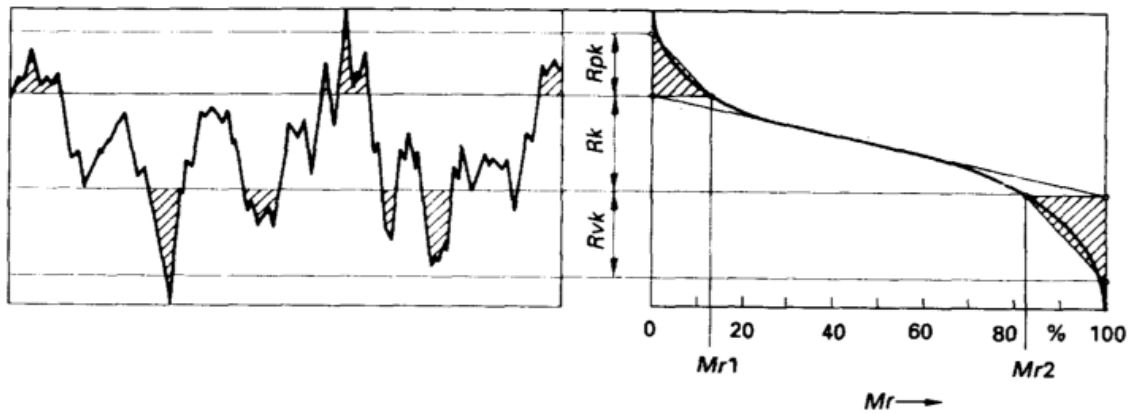
Na rys. 33 pokazano przykładowy profil chropowatości powierzchni gładzonej. Powierzchnia poprzecinana siatką rys dystrybuujących olej smarny jest pokazana na rys. 33 b. Powierzchnia plateau charakteryzuje się małą wartością parametru R_{pk} (wysokość wierzchołka profilu) i dużą wartością parametru R_{vk} (głębokość kanału olejowego), co zmniejsza zużycie np. pierścieni tłokowych i oleju podczas eksploatacji silnika spalinowego [2, 177].



Rys. 33. Profil chropowatości powierzchni: a) powstałej wskutek gładzenia , b) widok powierzchni gładzonej [2]

Normy ISO 13565-1 [78], ISO 13565-2 [79], ISO 13565-3 [80], jak również Masip [111] i Pawlus [133] omawiają metody wyznaczania charakterystyki powierzchni gładzonej. Norma ISO 13565-2 opisuje parametry grupy R_k , które są najczęściej stosowane do określania profilu chropowatości powierzchni po gładzeniu (rys. 34).

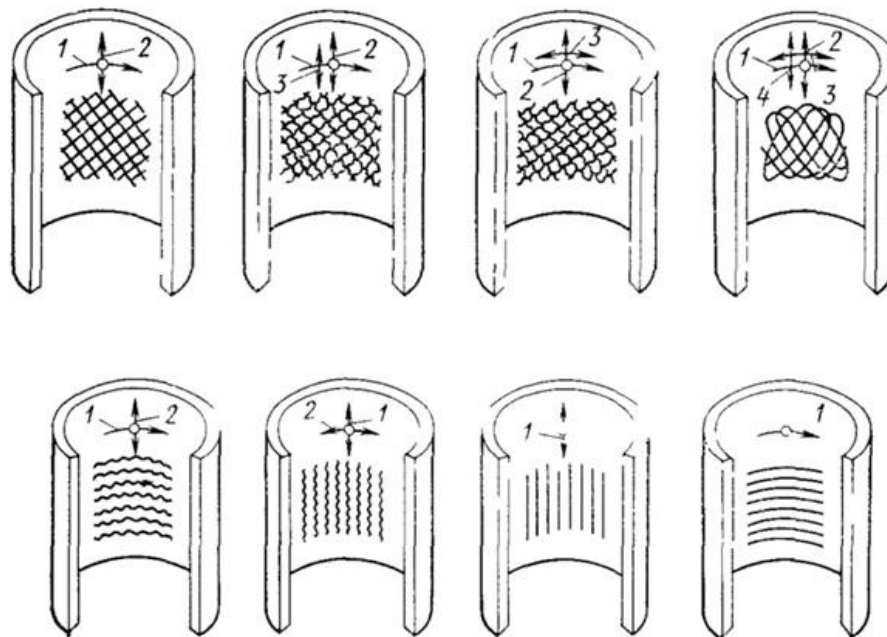
R_k to parametr opisujący wysokość rdzenia profilu chropowatości, R_{pk} charakteryzuje wysokość wierzchołków profilu chropowatości, parametr R_{vk} zaś określa głębokość kanałów olejowych [111] oraz może pomóc w określeniu wielkości zużycia eksploatowanego cylindra [116]. Parametr R_k (wysokość rdzenia profilu chropowatości) charakteryzuje żywotność, określaną zakładanym czasem wycierania się powierzchni współpracujących w parze ciernej. Parametry z grupy M_r (rys. 34) opisują współczynnik długości nośnej profilu chropowatości. Parametr M_{r1} charakteryzuje współczynnik długości nośnej profilu chropowatości na górnej granicy profilu rdzenia chropowatości (wyrażany jest w procentach) parametr M_{r2} to współczynnik długości nośnej profilu chropowatości w dolnej granicy rdzenia profilu chropowatości (wyrażany jest w procentach).



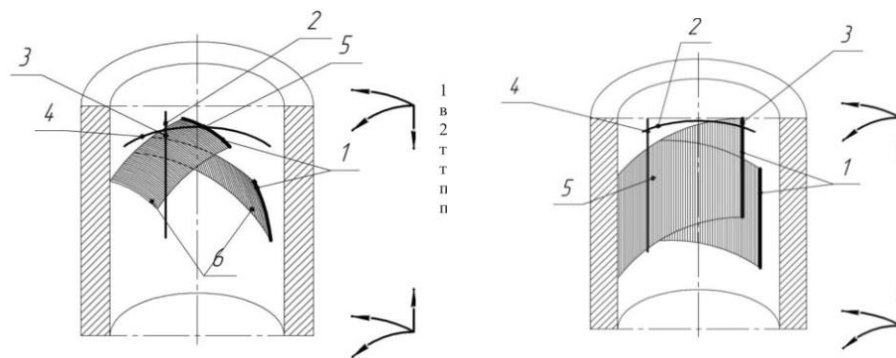
Rys. 34. Parametry profilu chropowatości z grupy R_k [78]

1.3.2. Gładzenie otworów walcowych ze zmienną kinematyką

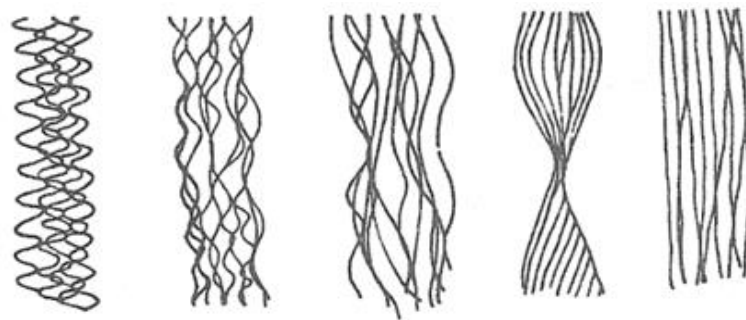
Gładzenie ze zmienną kinematyką charakteryzuje się zmianą parametrów obróbkowych (prędkość obrotowa, prędkość liniowa osiowa, prędkość wysuwu osełki, przyspieszenie głowicy, kierunek obrotów, kierunek ruchu osiowego głowicy) w czasie obróbki. Przykładowe ścieżki, uzyskane przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, pokazano na rys. 35 ÷ 37.



Rys. 35. Gładzenie ze zmienną kinematyką – ścieżki o różnych kształtach z zaznaczoną liczbą ruchów składowych głowicy gładzącej [25]

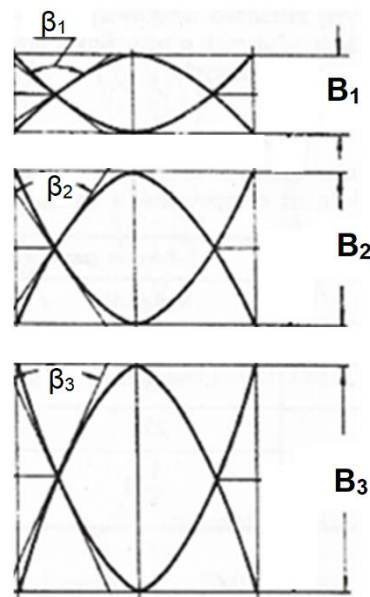


Rys. 36. Możliwe do uzyskania trajektorie ziaren ściernych z zaznaczoną liczbą ruchów składowych głowicy gładzącej [136]



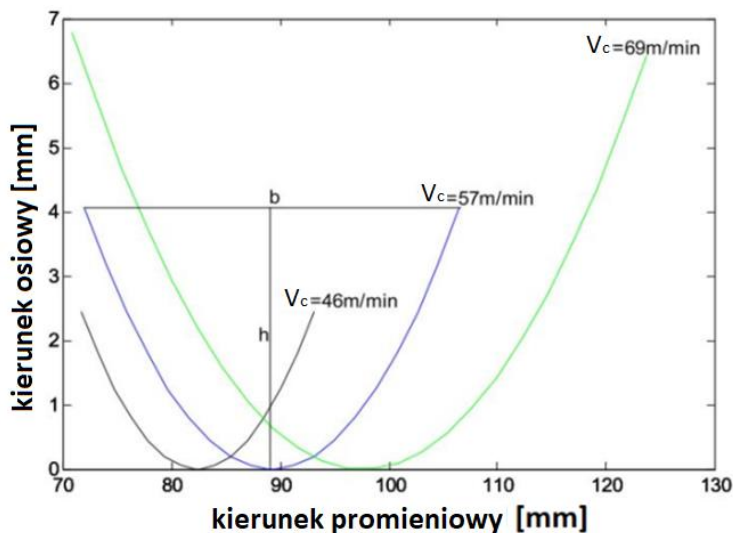
Rys. 37. Kształty trajektorii ziaren ściernych w zależności od zastosowanych parametrów obróbkowych [73]

Najnowszym trendem wśród badaczy gładzenia jest poszukiwanie alternatywnej trajektorii ziarna ściernego poprawiającej rezultaty obróbki [92 ÷ 94, 119, 120, 136 ÷ 138, 155, 157, 171, 186, 187, 193, 200]. Na rys. 38 pokazano przykład zmiany kształtu ścieżki ziarna ściernego, wynikający ze zmiany wielkości amplitudy ruchu ziarna.



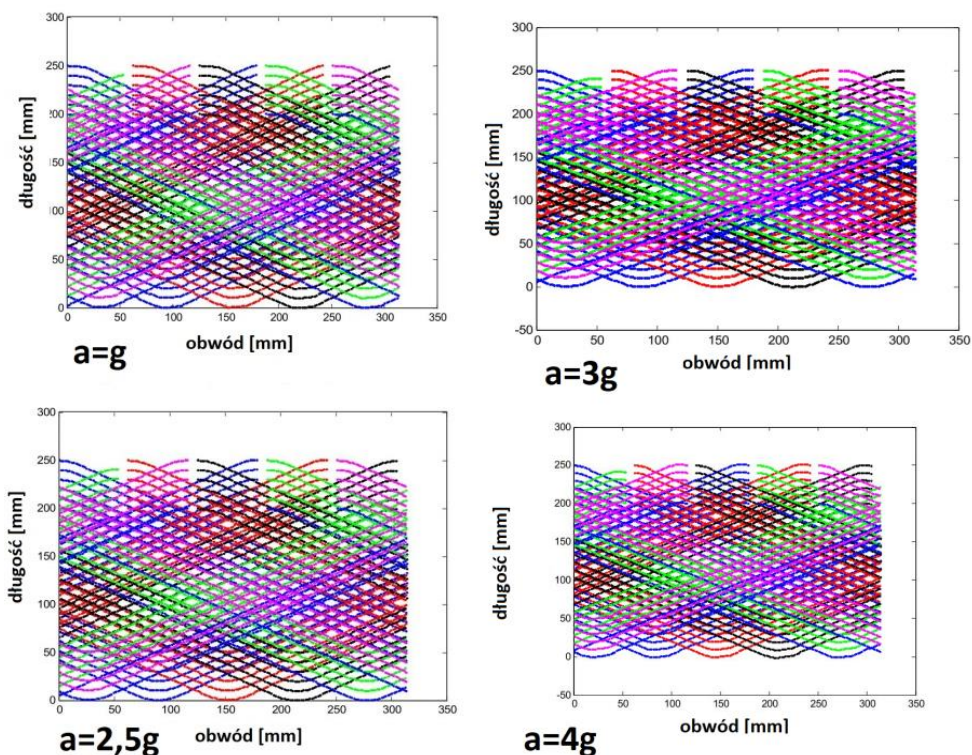
Rys. 38. Zmiana kąta skrzyżowania śladów obróbkowych w zależności od wielkości amplitudy B trajektorii ziarna ściernego, β – kąt skrzyżowania rys [73]

Kształt ścieżki ziarna jest zależny od wartości prędkości liniowej skoku, od wartości prędkości wypadkowej V_c (rys. 39) oraz od wartości przyspieszenia a głowicy w kierunku osiowym w ruchu powrotnym (rys. 40).



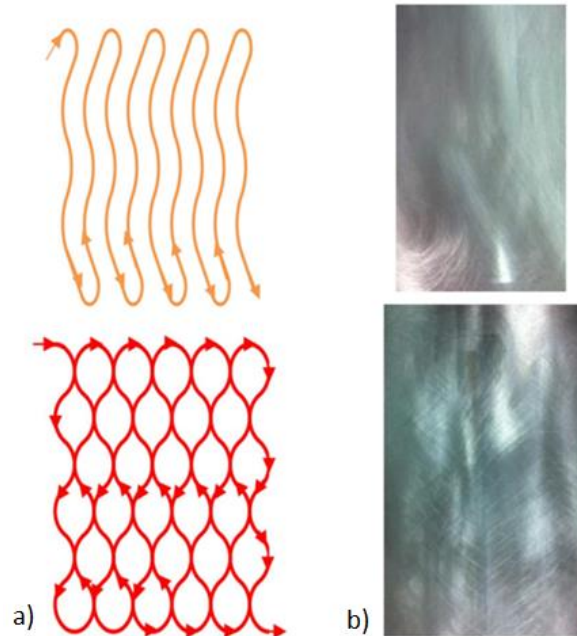
Rys. 39. Trajektoria ziarna ściernego dla różnych prędkości obrotowych głowicy w ruchu powrotnym [203]

Na rys. 40 przedstawiono siatkę rys stworzoną przez ziarno ściernie poruszające się z czterema różnymi wartościami przyspieszenia a głowicy w kierunku osiowym.

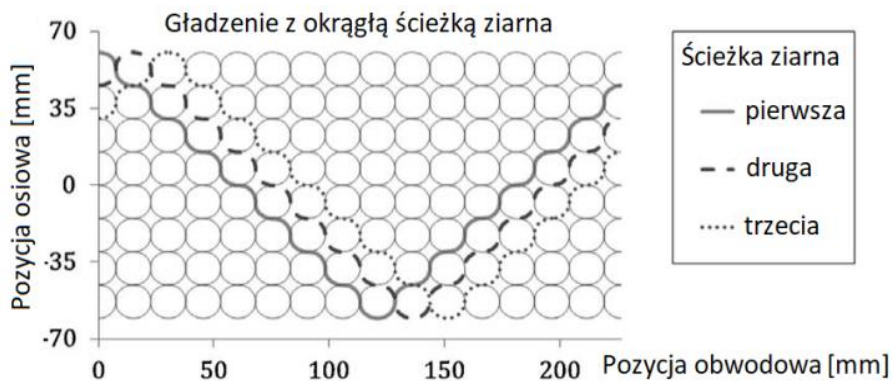


Rys. 40. Siatka rys uzyskana dla różnych wartości przyspieszenia a [203]

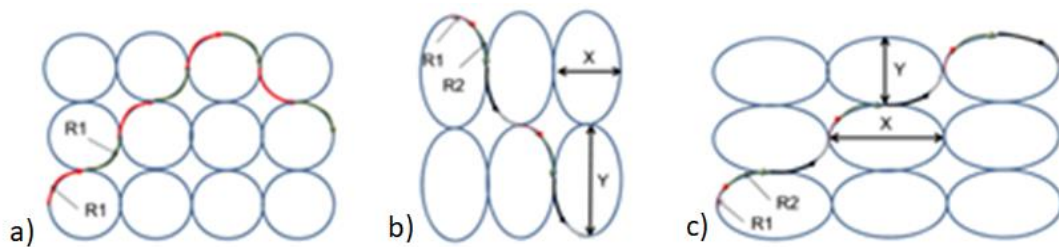
Gładzona powierzchnia może posiadać siatkę rys nie tylko prostoliniową, czy punktową lub w kształcie rys, ale również krzywoliniową (rys. 41), w kształcie okręgów lub łuków (rys. 42), elips (rys. 43), oraz jak wcześniej wspomniano może posiadać zmienny kąt trajektorii kanału olejowego (rys. 44), czy kształt sinusoidalny (rys. 45) a nawet kształt dowolny (rys. 46).



Rys. 41. Przykład krzywoliniowej trajektorii ziarna ściernego: a) krzywoliniowy kształt trajektorii ziarna, b) zdjęcie powierzchni po gładzeniu [186]

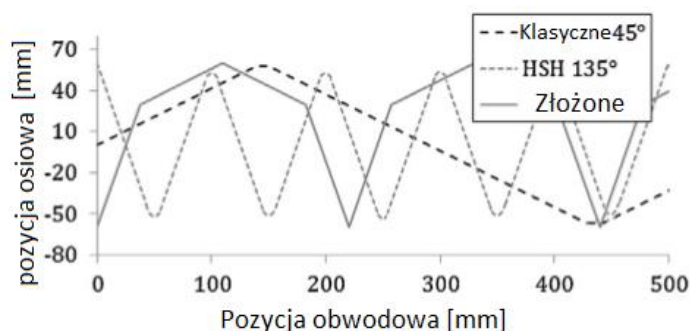


Rys. 42. Przykład krzywoliniowej trajektorii ziarna ściernego [54]



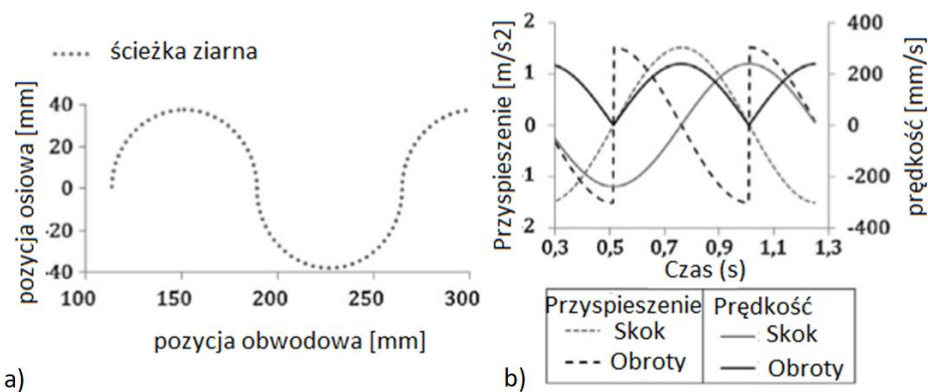
Rys. 43. Przykład siatki rys uzyskanej za pomocą honownicy CNC o trajektorii ziarna w kształcie: a) okręgów, b) elips wydłużonych w kierunku osiowym, c) elips wydłużonych w kierunku promieniowym [186, 187, 189]

Przykład siatki rys o zmiennym kącie trajektorii ziarna, uzyskanej za pomocą honownicy CNC, pokazano na rys. 44.

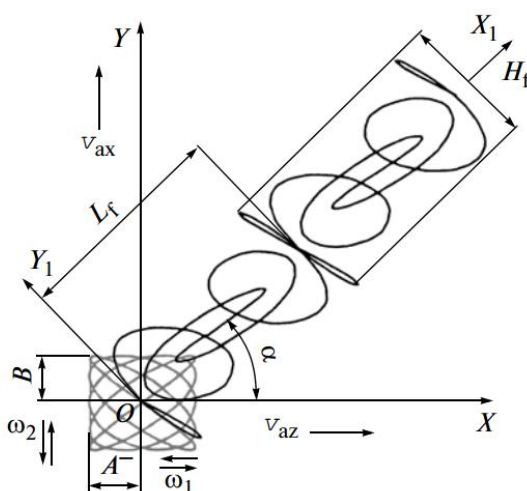


Rys. 44. Przykład siatki rys o zmiennym kącie trajektorii ziarna, uzyskanej za pomocą honownicy CNC [54]

Sinusoidalna trajektoria ziarna, pokazana na rys. 45, umożliwia większą wydajność gładzenia niż dla gładzenia tradycyjnego [54].



Rys. 45. Przykład krzywoliniowej ścieżki ziarna: a) trajektoria w kształcie okręgów, b) zmiana parametrów prędkości i przyspieszenia w czasie cyklu gładzenia [54]



Rys. 46. Kształt ścieżki ziarna uzyskiwany w procesie gładzenia ze zmiennymi parametrami obróbkowymi: A i B – amplitudy trajektorii ziarna w kierunku promieniowym X i w kierunku osiowym Y, ω_1 i ω_2 – częstotliwości ruchu ziarna w kierunku promieniowym X i w kierunku osiowym Y, α – zmienny kąt gładzenia dla gładzenia ze zmienną kinematyką, L_f i H_f – obszar ścieżki ziarna dla pojedynczej sekwencji ruchu ziarna (gabaryt ramki ścieżki ziarna) [92]

Kąt α na rys. 46 jest zmiennym kątem gładzenia ze względu na fakt, że wraz ze zmianą stosunku prędkości obrotowej i prędkości posuwu głowicy gładzącej, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną kinematyką, wartość stosunku obu prędkości zmienia wartość.

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{V_{ax}}{V_{az}} \right) \quad (1.5)$$

Równanie parametryczne ruchu ziarna przyjmuje postać:

$$X = A \sin \omega_1 t + V_{ax} t \quad (1.6)$$

$$Y = B \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + V_{ax} t \quad (1.7)$$

gdzie:

φ_1 – kąt przesunięcia fazowego w kierunku osi poziomej X [rad],

φ_2 – kąt przesunięcia fazowego w kierunku osi pionowej Y [rad],

ω_1 – częstotliwość wibracji w osi X [1/s],

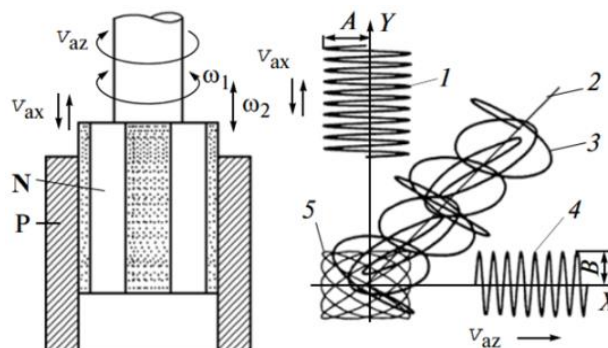
ω_2 – częstotliwość wibracji w osi Y [1/s],

Równania (1.6) i (1.7) odnoszą się do czasu ruchu okresowego.

Okresy ruchu w osi X i Y to:

$$t_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} \quad (1.8)$$

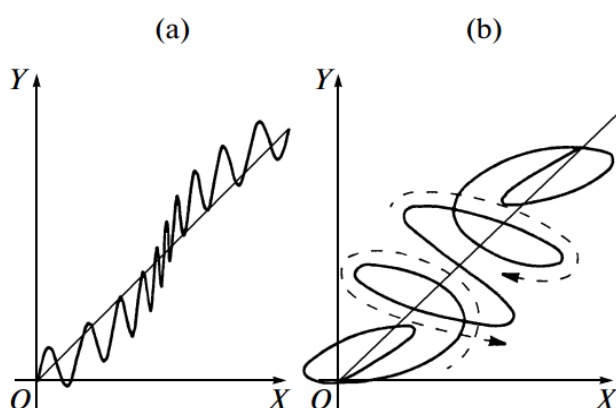
$$t_2 = \frac{2\pi}{\omega_2} \quad (1.9)$$



Rys. 47. Szkic operacji gładzenia ze zmienną ścieżką ziarna: P - przedmiot, N - narzędzie, 1 - osiowa wibracyjna sinusoidalna trajektoria ziarna z amplitudą A, 2 - oś symetrii trajektorii ziarna, 3 - trajektoria ziarna, 4 - azymutalna wibracyjna sinusoidalna trajektoria ziarna z amplitudą B, 5 - przykładowa krzywoliniowa trajektoria ziarna [92]

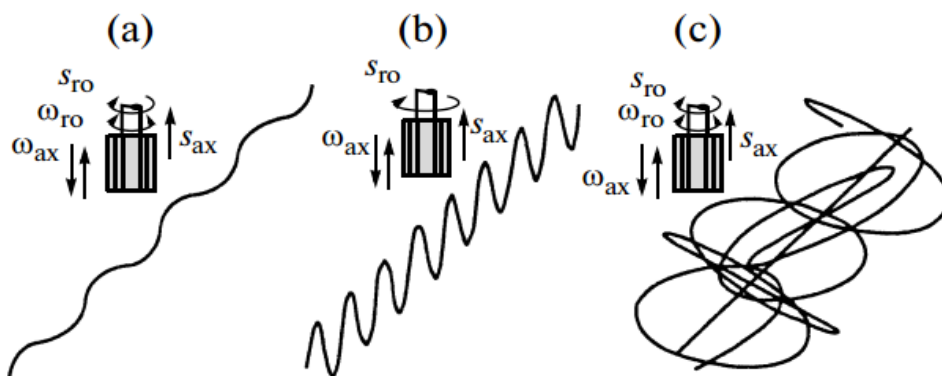
Kanał olejowy w kształcie linii 2 pokazanej na rys. 47 wystąpi w procesie gładzenia klasycznego, czyli bez wibracji głowicy. Gładzenie ze zmienną kinematyką od gładzenia tradycyjnego różni się stosowaniem dodatkowych wibracji głowicy. W procesie gładzenia typu *raster* kształt ścieżki ziarna powstaje w wyniku złożenia dwóch wibracji głowicy ω_1 i ω_2 ($\omega_1 > \omega_2$) i jest uzależniony o wielkości amplitud ruchu ziarna A i B , występujących we wzajemnie prostopadłych kierunkach: osiowym i promieniowym.

Rysunki 48 i 49 przedstawiają ścieżki ziarna uzyskiwane w gładzeniu krzywoliniowym, na rozwiniętej płaszczyźnie gładzonego otworu, dla dwóch wartości stosunków częstotliwości ruchu ziarna w kierunku osiowym ω_1 i w kierunku promieniowym ω_2 .



Rys. 48. Trajektoria ziarna w procesie gładzenia „Raster honing”: a) $\omega_2/\omega_1 < 0,5$, b) $\omega_2/\omega_1 < 4,5$ [92]

Khanov, Muratov i Gashev [93] wskazują iż zmienna kinematyka gładzenia może być stosowana zamiast tradycyjnego gładzenia, w związku z występującym mniejszym zużyciem narzędzia.



Rys. 49. Trajektorie ziarna ściernego w wibracyjnym gładzeniu: a) jednokierunkowa cykloida, b) wielokierunkowa cykloida, c) gładzenie typu raster [93]

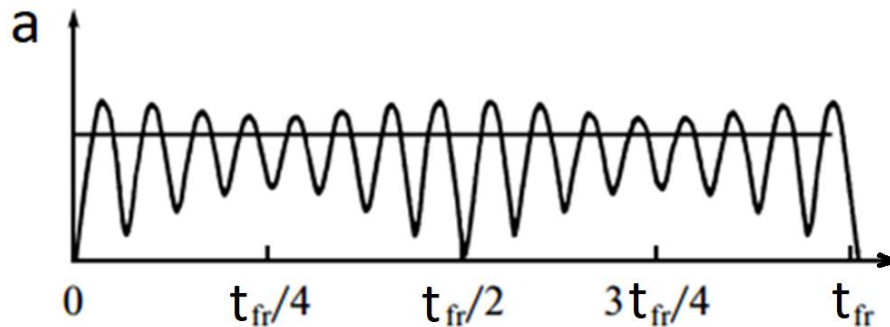
Ruch ziarna w trzech kierunkach współrzędnych układu 0XYZ jest opisany równaniami (1.10) ÷ (1.12).

$$x = f_1(t) \quad (1.10)$$

$$y = f_2(t) \quad (1.11)$$

$$z = f_3(t) \quad (1.12)$$

Na rys. 50 pokazano przykładowy wykres zmiany wartości przyspieszenia a ruchu ziarna w trakcie jednego okresu t_{fr} , dla gładzenia z otrzymywaną ścieżką ziarna zobraowaną na rys. 48.



Rys. 50. Zmiana wartości przyspieszenia całkowitego ruchu ziarna w trakcie jednego cyklu gładzenia t_{fr} [46]

Przyspieszenie wypadkowe a wyznacza się ze wzoru:

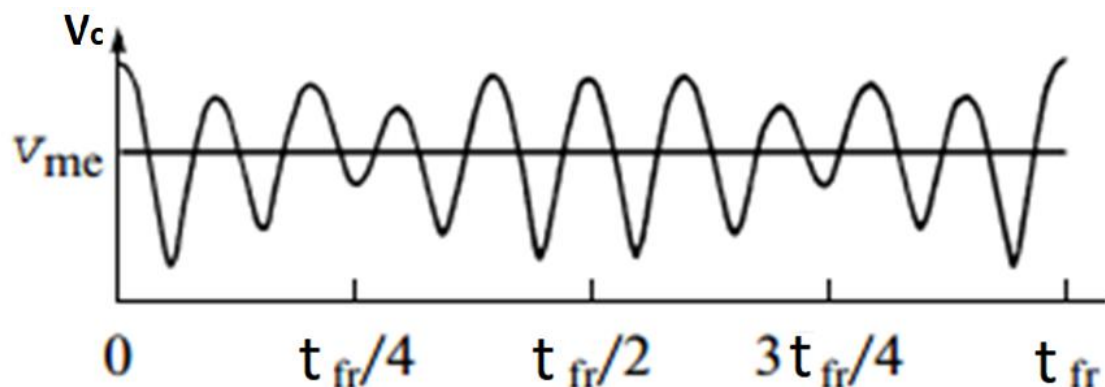
$$a = \sqrt{(a_s)^2 + (a_n)^2} = \sqrt{(A\omega_1^2 \sin \omega_1 t)^2 + (B\omega_2^2 \sin \omega_2 t)^2} \quad (1.13)$$

gdzie:

a_s – przyspieszenie styczne,

a_n – przyspieszenie normalne.

Na rys. 51 pokazano przykładowy wykres zmiany wartości średniej prędkości V_{me} w trakcie jednego okresu t_{fr} , dla gładzenia z otrzymywaną ścieżką ziarna zobraowaną na rys. 46 ÷ rys 49.



Rys. 51. Zmiana prędkości ruchu ziarna ściernego V_c w trakcie czasu obiegu t_{fr} ziarna ściernego, V_{me} – prędkość średnia [46]

Prędkość wypadkową ruchu ziarna ściernego V_c (rys. 46) określa wzór:

$$V_c = \sqrt{V_{az}^2 + V_{ax}^2}$$

$$V_c = \sqrt{(A\omega_1 \cos \omega_1 t + V_{az} t)^2} + \sqrt{(B\omega_2 \cos \omega_2 t + V_{ax} t)^2} \quad (1.14)$$

Prędkość wypadkowa V_c jest maksymalna kiedy $\cos \omega_1 t = 1$ i $\cos \omega_2 t = 1$ i wynosi wówczas:

$$V_{\max} = \sqrt{(A\omega_1 + V_{az})^2} + \sqrt{(B\omega_2 + V_{ax})^2} \quad (1.15)$$

Długość ścieżki ziarna powstałej w czasie t_{fr} to:

$$L_{fr} = \sqrt{\left(\frac{dX}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dY}{dt}\right)^2} dt \quad (1.16)$$

Okres ruchu ziarna t_{fr} dla długości trajektorii L_{fr} wynosi:

$$t_{fr} = \frac{2\pi}{\omega_{fr}} = \frac{2\pi}{(\omega_1 - \omega_2)} \quad (1.17)$$

Prędkość średnia ruchu ziarna ściernego - V_{me} to:

$$V_{me} = \frac{\omega_{fr}}{2\pi} \times \int_0^{t_{fr}} \sqrt{(A\omega_1 \cos \omega t + V_{az} t)^2} + \sqrt{(B\omega_2 \cos \omega_2 t + V_{ax} t)^2} dt \quad (1.18)$$

Proces gładzenia typu raster można zapisać w inny sposób, odnosząc się do kąta przesunięcia fazowego ruchu ziarna. Wzór (1.19) oznacza kąt fazowy φ kombinacji wibracji w czasie t , który jest równy:

$$\varphi = \frac{\omega_1 t}{m} = \frac{\omega_2 t}{n} \quad (1.19)$$

zaś:

$$t = \frac{m\varphi_1}{\omega_1} = \frac{n\varphi_2}{\omega_2} \quad (1.20)$$

oraz:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n}{m} \quad (1.21)$$

gdzie: n, m – liczby całkowite,

ω_1 i ω_2 – częstotliwość wibracji w kierunku osi poziomej X i osi pionowej Y,

φ_1 i φ_2 – kąt przesunięcia fazowego w kierunku osi poziomej X i osi pionowej Y.

Równania ruchu ziarna (1.6) i (1.7) w zapisie $\varphi = \varphi(t)$ to:

$$X = A \sin m\varphi + v_1\varphi_1 \quad (1.22)$$

$$Y = B \sin(n\varphi + \varphi_0) + v_2\varphi_2 \quad (1.23)$$

gdzie:

$$V_1 = V_{az} \left(\frac{m}{\omega_1} \right) \quad (1.24)$$

$$V_2 = V_{ax} \left(\frac{n}{\omega_2} \right) \quad (1.25)$$

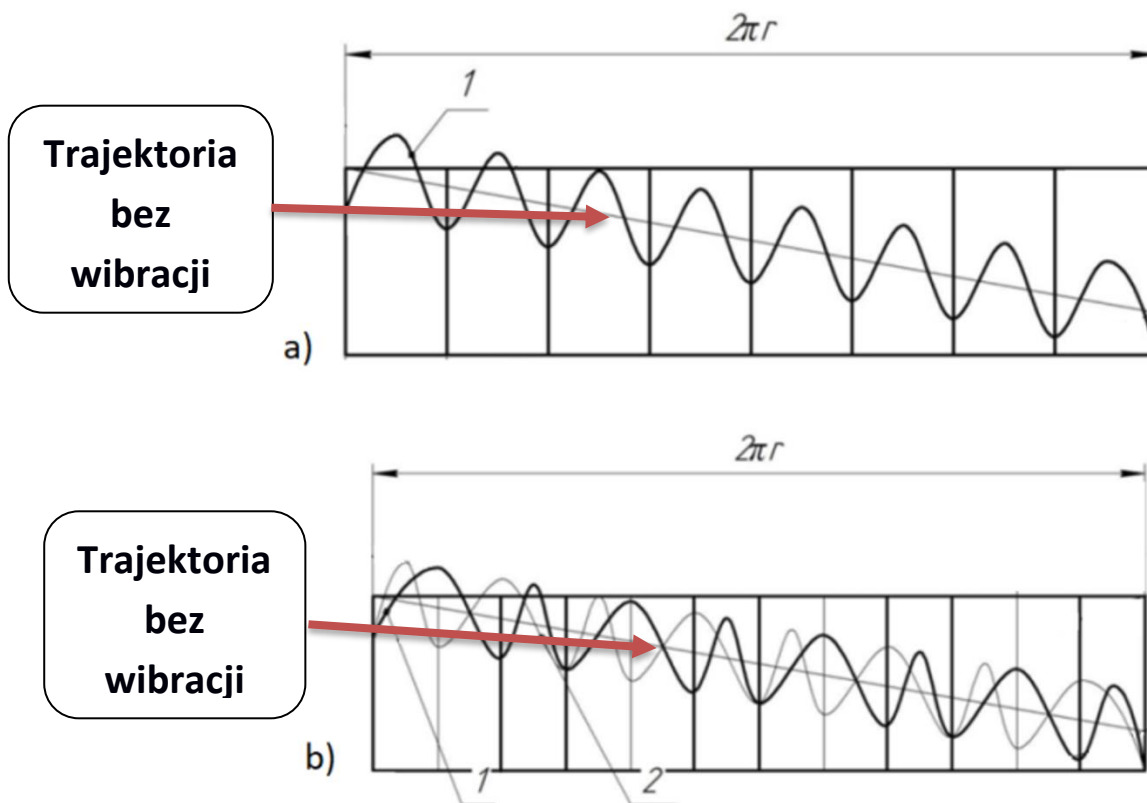
oraz:

$\frac{t_2}{t_1} = \frac{m}{n}$ (zależność pomiędzy wzajemnie prostopadłymi amplitudami wibracji), czyli:

$$t = mt_1 = nt_2 \quad (1.26)$$

gdzie: t_1 i t_2 - okresy ruchu ziarna w kierunku poziomym i pionowym na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu.

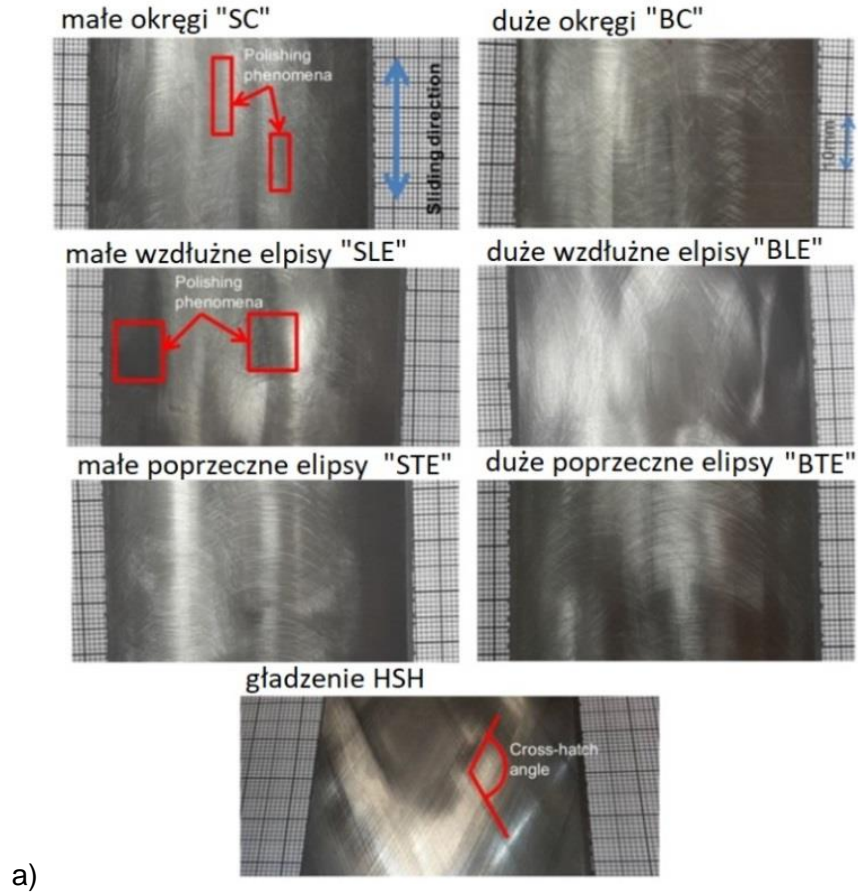
Krzywoliniowa trajektoria ziarna ściernego w trakcie procesu gładzenia może przebiegać w sposób powtarzalny, tworząc na powierzchni gładzonej jednolitą teksturę kanałów olejowych lub może przebiegać w sposób zmienny, tworząc strukturę rys o zmiennym kształcie (rys. 52).



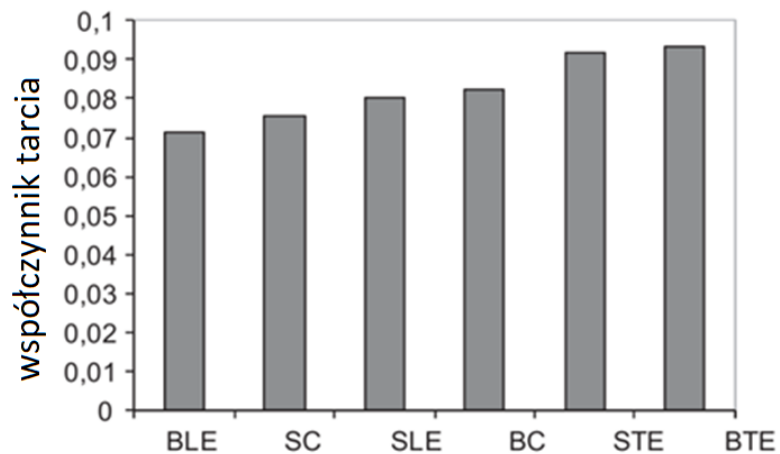
Rys. 52. Spiralna trajektoria ziarna: a) pojedyncza trajektoria, b) dwie ścieżki o różnych krzywiznach [137]

Yousfi [186, 187, 189] wykonał szereg doświadczeń polegających na generowaniu nowych kształtów ścieżek ziarn ściernych i uzyskał podczas gładzenia kanały olejowe w kształcie małych i dużych okręgów oraz w kształcie małych i dużych elips, umiejscowionych w kierunku osiowym oraz ułożonych poprzecznie do osi otworu - w kierunku promieniowym.

Na rys. 53 pokazano przykładowe trajektorie ziarna możliwe do uzyskania na honownicy CNC, oraz zmierzone wartości współczynnika tarcia dla wybranych tekstur.



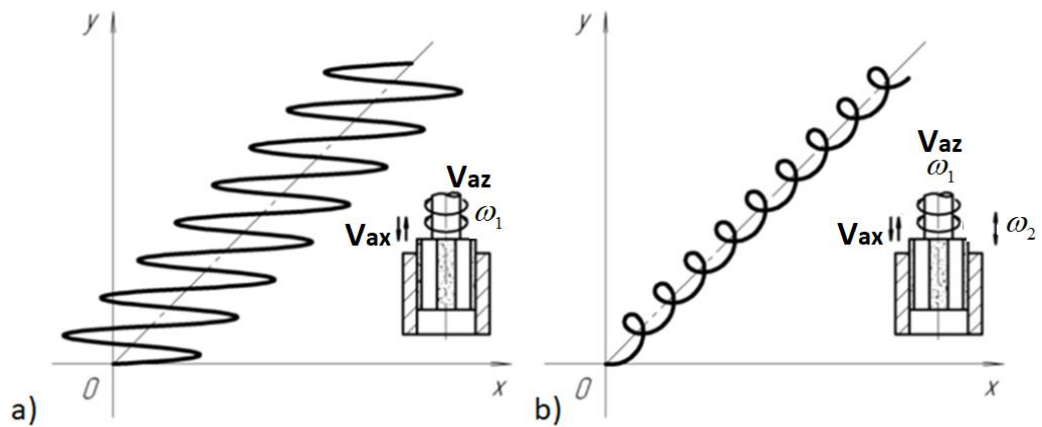
a)



b)

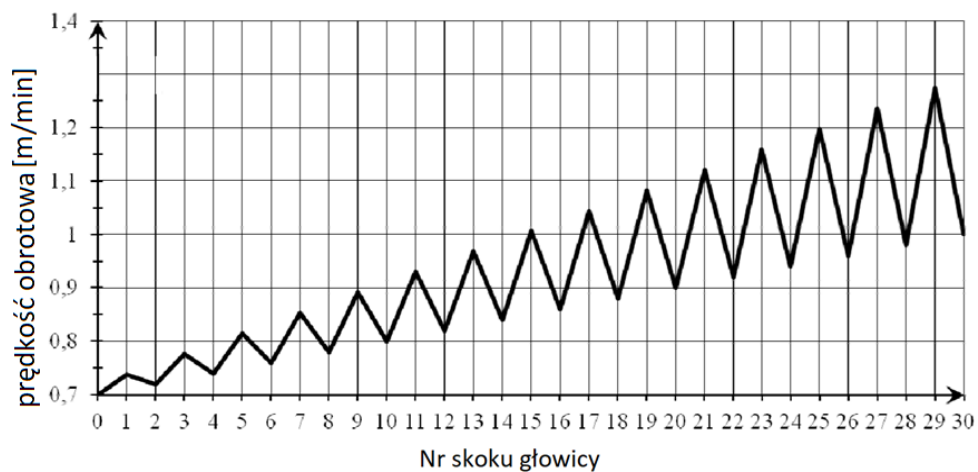
Rys. 53. Powierzchnie z trajektoriami ziarna o różnym kształcie: a) zdjęcia wykonane po obróbce, b) uzyskana wartość współczynnika tarcia względem różnych tekstur, BLE – duża wzdłużna elipsa, SC – mały okrąg, SLE – mała wzdłużna elipsa, BC – duży okrąg, STE – elipsa mała poprzeczna do kierunku osiowego, BTE - elipsa duża poprzeczna do kierunku osiowego [187]

Przykładowe spiralne ścieżki ziarna uzyskane podczas gładzenia ze zmienną kinematyką pokazano na rys. 54.



Rys. 54. Spiralna trajektoria ziarna: a) z dodatkową oscylacją kierunku obrotów głowicy ω_1 , b) z dodatkową oscylacją kierunku obrotów głowicy ω_1 i kierunku ruchu osiowego głowicy ω_2 [94]

Zmianę tekstury gładzonej powierzchni można uzyskać poprzez ciągłą zmianę wartości wypadkowej prędkości gładzenia V_c w trakcie procesu. Wraz ze wzrostem prędkości wypadkowej V_c zmienia się kąt gładzenia. Na rys. 55 pokazano wykres prędkości V_c dla kolejnych skoków głowicy. Każdy kolejny skok głowicy posiada większą maksymalną prędkość gładzenia oraz większą różnicę minimalnej i maksymalnej wartości prędkości. Wraz ze wzrostem czasu gładzenia wzrasta wydajność obróbki.



Rys. 55. Zmiana prędkości gładzenia w trakcie obróbki jednego otworu [6]

Gładzenie ze zmienną kinematyką charakteryzuje się innym od tradycyjnego sposobem sterowania położeniem głowicy, a otrzymywana trajektoria może przyjmować dowolny kształt [46], np. kanały olejowe mogą uzyskać zarys figur Lissajous [42, 55].

Krzywą Lissajous, umożliwiającą opisanie kształtów rys kanałów olejowych uzyskiwanych podczas gładzenia ze zmienną kinematyką, opisuje się za pomocą wzorów:

$$x(t) = \cos(\omega_1 t - \mu_1) \quad (1.27)$$

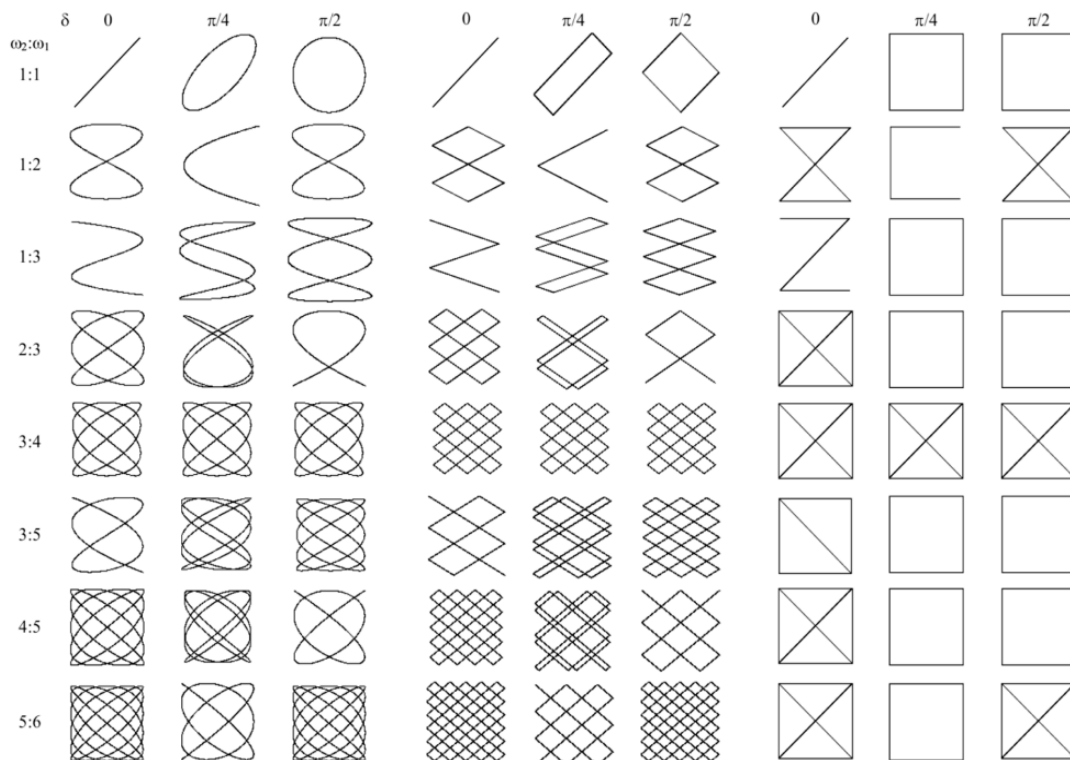
$$y(t) = \cos(\omega_2 t - \mu_2) \quad (1.28)$$

przy czym kształt otrzymanego kanału olejowego jest uzależniony od stosunku częstotliwości ω_1 i ω_2 oraz od ich różnicy fazowej μ_1 i μ_2 (rys. 56).

Kilka przykładów kształtów figur krzywych Lissajous, z różnymi wartościami częstotliwości kątowych ω_1 i ω_2 oraz z różnymi wartościami różnic fazowych δ (wzór 1.29), pokazano na rys. 56.

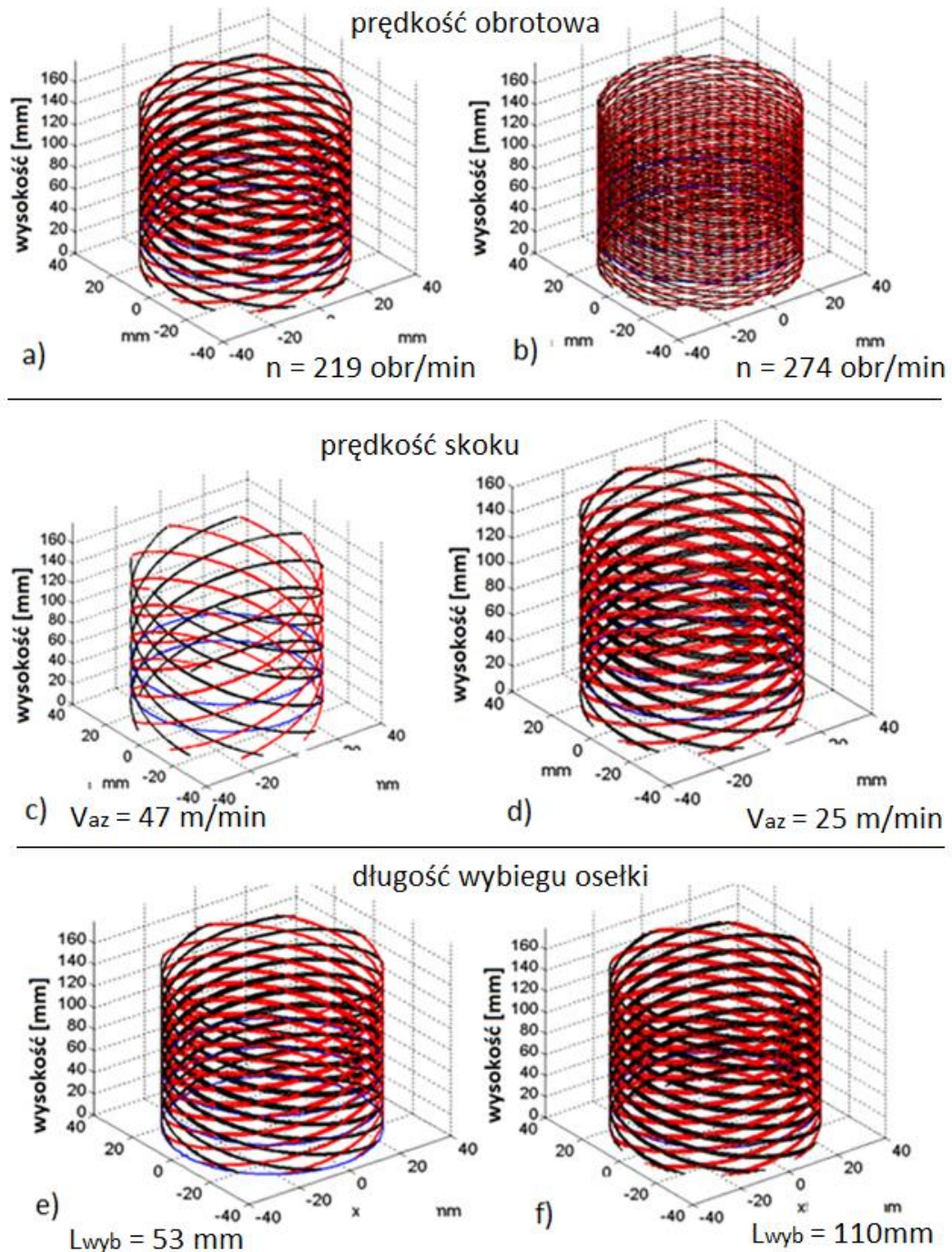
$$\delta = \mu_1 - \mu_2 \quad (1.29)$$

Trajektorię ziarna z rys. 56 charakteryzują różne wartości parametrów obróbkowych: prędkości obrotowej, prędkości liniowej skoku oraz wartości przyspieszenia normalnego głowicy, co wpływa na wytworzenie trajektorii ziarna o różnym kształcie (rys. 56).



Rys. 56. Krzywe Lissajous - możliwe kształty trajektorii ziarna ściernego [42]

Na rys. 57 zaprezentowano przykładowe ścieżki ziarna, których kształt zależy jest od prędkości obrotowej, prędkości skoku oraz od długości wybiegu osetki.



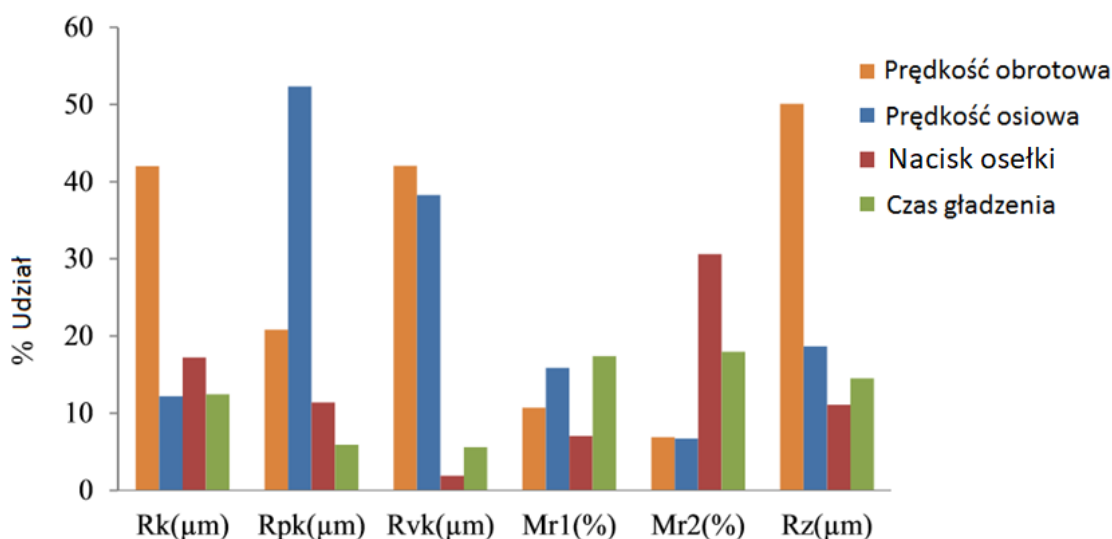
Rys. 57. Trajektorie ziarna ściernego dla dwóch różnych przykładowych wartości parametrów gładzenia [201]:
a) i b) wpływ prędkości obrotowej n na kształt ścieżki: [a) $n = 219$ obr/min, b) $n = 274$ obr/min],
c) i d) wpływ prędkości skoku V_{ax} na kształt ścieżki: [c) $V_{az} = 47$ m/min, d) $V_{az} = 25$ m/min],
e) i f) wpływ długości wybiegu osetki L_{wyb} na kształt ścieżki ziarna ściernego: [e) $L = 53$ mm, f) $L = 110$ mm]

1.4. Wpływ parametrów gładzenia na wyniki obróbki

Kluczowym zagadnieniem dla obróbki za pomocą gładzenia jest poznanie wpływu poszczególnych parametrów procesu na wynik obróbki [195], aby odpowiednio sterować przebiegiem procesu. Znaczna liczba pozycji literatury odnosi się do zagadnienia doboru parametrów procesu gładzenia [14 ÷ 17, 20, 21, 27, 29]. Na rys. 58 pokazano zestawienie procentowe wpływu poszczególnych warunków gładzenia na parametry profilu chropowatości.

W obróbce zgrubnej prędkość obrotowa głowicy, prędkość osiowa i nacisk osetki są czynnikami wpływającymi w największym stopniu na parametry R_a , R_k , R_{vk} i R_z [16, 27]. Parametry obróbkowe wpływające na uzyskiwaną jakość powierzchni to: nacisk osetki, prędkość obrotowa głowicy, prędkość liniowa osiowa, rodzaj użytego płynu obróbkowego, temperatura obróbki oraz charakterystyka narzędzia [13].

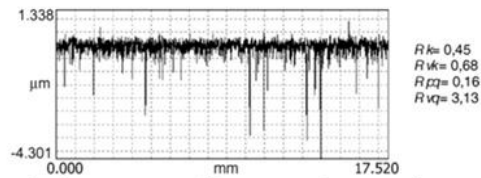
Na rys. 58 pokazano procentowy udział parametrów procesu na przykładowy, uzyskany po gładzeniu, parametr profilu chropowatości powierzchni obrobionej. Prędkość obrotowa ma największy wpływ na parametr R_k , R_{vk} i R_z , prędkość osiowa ma największy wpływ na parametr R_{pk} , czas gładzenia ma największy wpływ na parametr M_{r1} , nacisk osetki ma największy wpływ na parametr M_{r2} (rys. 58).



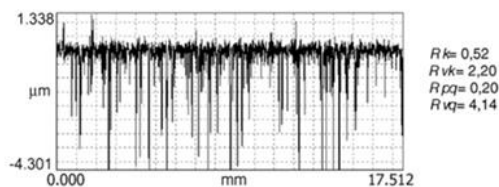
Rys. 58. Parametry profilu chropowatości po gładzeniu zgrubnym [27]

W obróbce wykończeniowej najistotniejszymi parametrami wpływającymi na wynik gładzenia są nacisk osetki (rys. 59 i rys. 60), liczba skoków głowicy (rys. 61), prędkość obrotowa i czas obróbki [27], wielkość ziarna ściernego i prędkość dosuwu osetki do materiału obrabianego [191, 192].

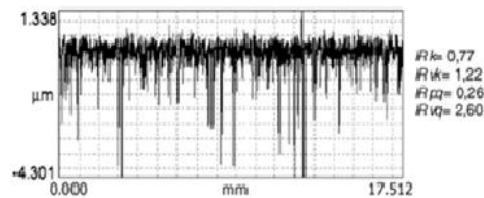
Większe ziarno, większy nacisk osetki i większa wypadkowa prędkość skrawania w obróbce zgrubnej zwiększają wartość parametru R_{vk} [169, 170, 191]. Obróbka osetką wykańczającą z mniejszym naciskiem powoduje zmniejszenie wysokości wierzchołków profilu R_{pk} (rys. 59).



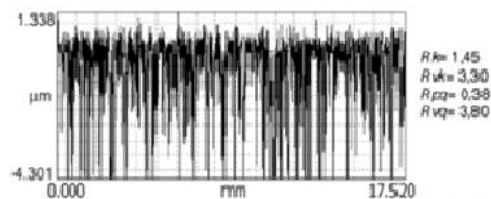
Dłuższe gładzenie plateau, wielkość ziarna 400 (wg. FEPA) dla gładzenia zgrubnego



Dłuższe gładzenie plateau, wielkość ziarna 150 (wg. FEPA) dla gładzenia zgrubnego



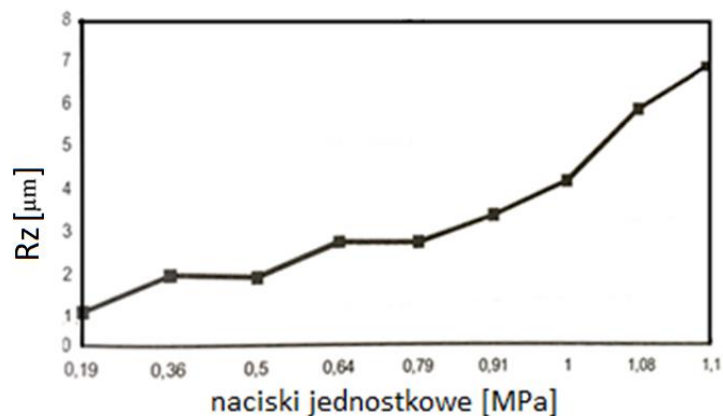
Krótsze gładzenie plateau, wielkość ziarna 400 (wg. FEPA) dla gładzenia zgrubnego



Krótsze gładzenie plateau, wielkość ziarna 150 (wg. FEPA) dla gładzenia zgrubnego

Rys. 59. Profile chropowatości uzyskane dla różnych wartości zastosowanych parametrów czasu oraz wielkości ziarna [3]

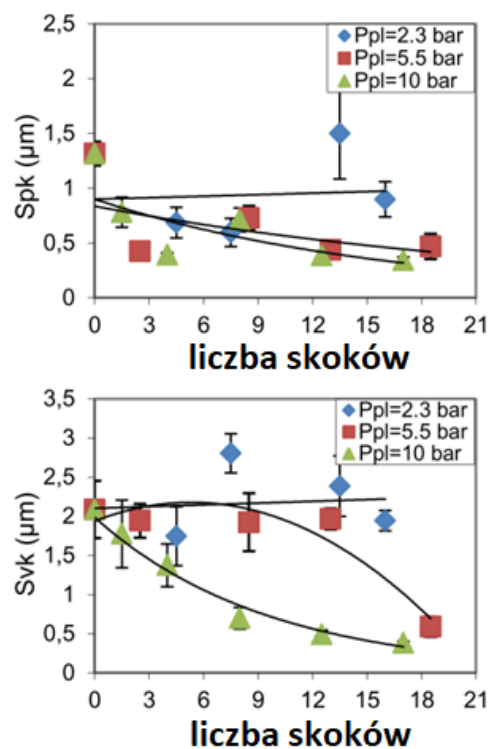
Wzrost nacisku osetki powoduje wzrost wydajności procesu [64], jak również wpływa na większe zużycie narzędzia [3, 8] oraz zwiększa parametry profilu chropowatości (rys. 60).



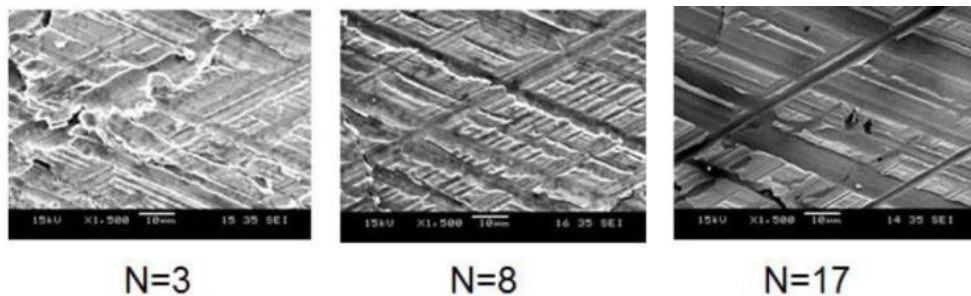
Rys. 60. Wpływ nacisku osetki na parametr R_z [196]

Na profil chropowatości wpływają również: liczba skoków osełki (rys. 61), wielkość ziarna ściernego (rys. 59), prędkość wysuwu osełki podczas gładzenia (rys. 62) jak również wypadkowa prędkość gładzenia, wpływająca na wartość kąta przecinania się kanałów olejowych [174].

Wzrost liczby skoków osełki powoduje zmniejszenie wartości parametrów S_{pk} i S_{vk} , co szczególnie łatwo zaobserwować można na zdjęciach powierzchni gładzonej (rys. 61). Wzrost liczby skoków głowicy podczas gładzenia plateau wpływa również na zmniejszenie współczynnika tarcia współpracujących elementów [190].



a)

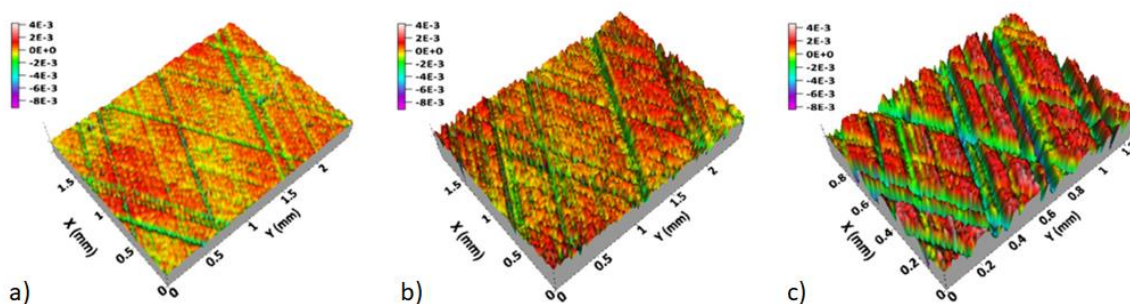


b)

Rys. 61. Wpływ liczby skoków głowicy: a) na parametry powierzchniowe, b) na strukturę powierzchni gładzonej [192]

Wzrost wartości posuwu roboczego do określonej wartości powoduje zmniejszenie chropowatości powierzchni [97]. Bardzo ważnymi parametrami, wpływającym na parametry profilu chropowatości powierzchni są parametry: S_q , S_{10z} , S_{dq} , S_{pq} , S_{vq} , S_{mq} [141], czas gładzenia [8, 174]. Lawrence [106] rekomenduje czas gładzenia zgrubnego i wykończeniowego $t = 300$ s, czas gładzenia Plateau $t = 10$ s.

Większa prędkość wysuwu roboczego osełki w kierunku powierzchni obrabianej podczas gładzenia wpływa na uzyskanie powierzchni z większą głębokością kanałów olejowych (rys. 62).



Rys. 62. Przykłady powierzchni gładzonej, uzyskane dla różnej wartości prędkości wysuwu osełki: a) 1,5 $\mu\text{m/s}$, b) 4 $\mu\text{m/s}$, c) 8 $\mu\text{m/s}$ [115]

1.4.1. Wpływ kąta gładzenia na warunki eksploatacji silników spalinowych

Kąt gładzenia jest parametrem wpływającym na zużycie oleju [10] oraz na ilość związków toksycznych emitowanych do otoczenia podczas eksploatacji silników spalinowych [112, 142]. Wpływa także na współczynnik tarcia pierścieni tłokowych o powierzchnię cylindra [61, 187, 194], co ma bezpośredni wpływ na straty mocy silnika. Istnieje kilka metod pomiaru kąta przecinania się wytworzonych rys olejowych [134], mapowania chropowatości powierzchni [143] oraz metod nadzorowania stopnia zużywania się gładzi cylindra, która wzrasta wraz z czasem użytkowania silnika [23]. Niektórzy autorzy artykułów opisujących gładzenie określają kąt gładzenia jako kąt skrzyżowania rys, inni definiują jako połowa kąta skrzyżowania rys olejowych. [12, 15, 30, 60, 90, 125, 135, 142, 142, 173].

W tab. 3 podano kąty gładzenia, które analizowano i opisano w cytowanej literaturze.

Tab. 3. Kąty gładzenia omawiane w literaturze

Autorzy lub firmy	Nr pozycji literatury	Kąt gładzenia [°]
Bouassida H.	[10]	45
Entezami S., Farahnakian M., Akbari A.,	[39]	
Karpuschewski B., Welzel F., Risse K., Schorgel M.	[90]	
Mansori El. M., Goeldel B., Sabri L.	[107]	
Brush research manufacturing Co. Inc.	[11]	25 ÷ 30
Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J.	[12]	36,9; 38,6; 53,1
Chavan P.S., Harne M.S.	[21]	46 ÷ 57
Dahlmann D., Denkena B.	[26]	110
Graboń W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wieczorowski M.	[61]	15,5; 55; 72; 125
Demirci I., Mezghani S., Yousfi M., El Mansori M.	[29]	50, 130
Deshpande A.K., Bhole H.A., Choudhari L.A.	[30]	25 ÷ 75
Fiat Chrysler America	[41]	36
Goeldel B., Mansori M.,	[52]	50
Graboń W., Pawlus P., Sep J.	[60]	
Michalski J., Woś P.	[116]	
Reizer R., Pawlus P., Galda L., Graboń W., Dzierwa A.	[142]	
Pawlus P., Cieslak T., Mathia T.,	[131]	
Goeldel B., Mansori M.,	[54]	45, 135
Jocsak J.	[83]	30, 35, 40, 45, 60, 90
Johansson S., Nilsson Per.H., Ohlsson R., Anderberg C., Rosen B.G.	[84]	40, 140
Johansson S., Nilsson Per.H., Ohlsson R., Anderberg C., Bengt-Goran Rosen	[85]	
Kim J.K., Xavier F.A., Kim D.E.	[96]	
Kapoor J.,	[89]	15 ÷ 22
Knoll G., Rienacker A.,	[99]	10, 30, 60, 90, 120, 150, 170
KS Motor Service International GmbH	[104]	40, 60, 80
Lawrence D. K., Ramamoorthy B.	[106]	41, 48, 51, 54, 59, 61, 64, 71, 74, 84, 88, 89, 102, 105, 111
Mezghani S., Demirci I., Yousfi M., Mansori E.M.	[112]	40 ÷ 60; 120 ÷ 140

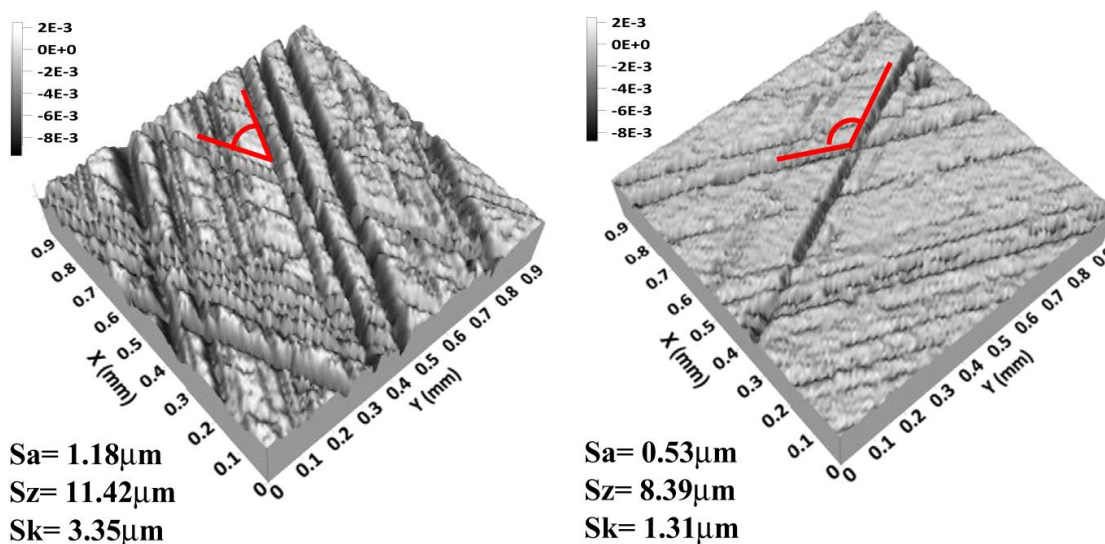
cd. Tab.3. Kąty gładzenia omawiane w literaturze

Autorzy lub firmy	Nr pozycji literatury	Kąt gładzenia [°]
Mezghani S., Demirci I., Zahouani H., Mansori E.M.	[114]	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 110, 130, 140, 150
Obara R.B., Souza R.M.	[125]	66
Reizer R. Pawlus P.	[141]	53
Pimpalgaonkar M.H.,	[135]	20 ÷ 60
Qin P.P., Yang C.I., Huang W., Xu G.W., Liu C.J.	[139]	30, 45
Sabri L., Mezghani S., Mansori E.M., Le Lan Jean-Vincent	[146]	51,14; 30 ÷ 60; 140
Gashev E.A., Muratov K.R.,	[46]	kąt zmienny
Polyanchikov Yu. N., Plotniko A.L., Polyanchikova M.Yu., Kursin O.A.,	[138]	
Sender P.	[155, 157]	
Yousfi M.	[186, 187]	
Tripathi B.N., Singh N.K., Vates U.K.	[164]	25 ÷ 75
Yuan S., Huang W., Wang X.,	[194]	45, 90
Deepak Lawrence K., Ramamoorthy B.	[27]	43, 50, 53, 56, 60, 63, 68, 74, 79, 81, 94, 106, 108, 114
Ozdemir M., Korkmaz M.E., Guanay M.B. Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Coba-Salcedo M.	[128] [15]	40 ÷ 80
Q. Wang, Q. Feng, Q.F. Li and C.Z. Ren	[173]	83,70

Na skutek nieuporządkowanego rozmieszczenia ziarna w oselce ścierniej, płaszczyzny pęknięcia ziaren znajdują się pod dowolnym kątem względem kierunku pracy ziaren, wyznaczonego przez wektor prędkości wypadkowej gładzenia V_c . W trakcie gładzenia kierunek sił działających na ziarno zmienia się. Część ziaren jest zbyt słaba w danej płaszczyźnie do przeniesienia sił skrawania, dzięki czemu podczas procesu gładzenia stale powstają nowe krawędzie skrawające. Zmiana kierunku pracy ziarna zapobiega również osadzaniu się cząsteczek materiału obrabianego na powierzchniach roboczych ziarna [58], dzięki temu zjawisku zmiana kierunku wektora prędkości V_c , czyli zmienna kinematyka gładzenia, jest ważnym parametrem wpływającym na przebieg procesu [157]. Za zmianę kierunku wektora V_c oraz krzywizny trajektorii odpowiada wartość przyspieszenia normalnego a_n .

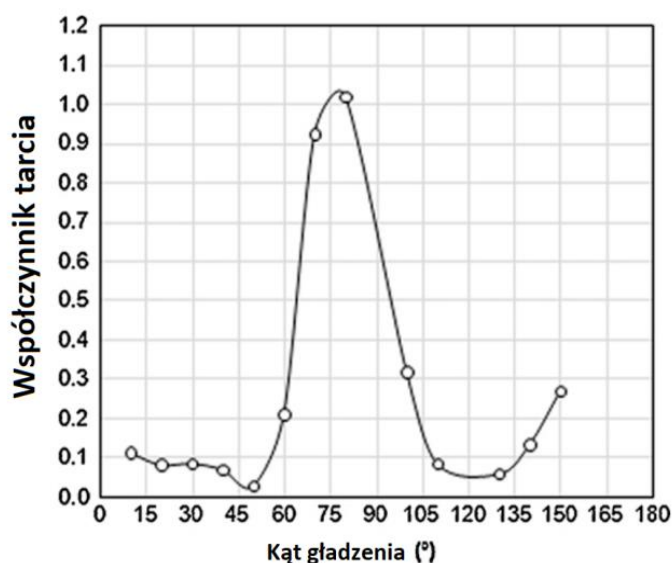


Jak wspomniano wcześniej charakterystyczna siatka rys powstaje w wyniku nałożenia na siebie trajektorii pojedynczych ziarn ściernych, które są uzyskiwane podczas podwójnego skoku głowicy. Siatka kanałów olejowych może przecinać się pod różnymi kątami (rys. 63), jednak bardzo istotne jest, aby poszczególne ziarna ścierne nie poruszały się po tej samej trajektorii, powodując powiększanie się głębokości rysy [86].



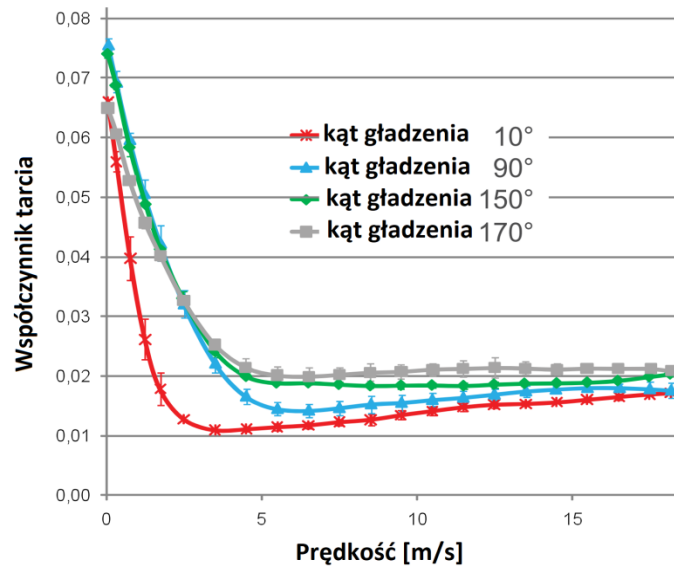
Rys. 63. Powierzchnia gładzona z różnymi kątami przecięcia się kanałów olejowych [112]

Wpływ kąta gładzenia na współczynnik tarcia został zbadany przez Mezghaniego (rys. 64). Gładzenie tradycyjne (z kątem gładzenia $\alpha = 45^\circ$) oraz gładzenie spiralne (z kątem gładzenia $\alpha = 130^\circ$) posiadają najmniejszy współczynnik tarcia powierzchni pierścieni tłokowych o powierzchnię gładzi cylindra [114].



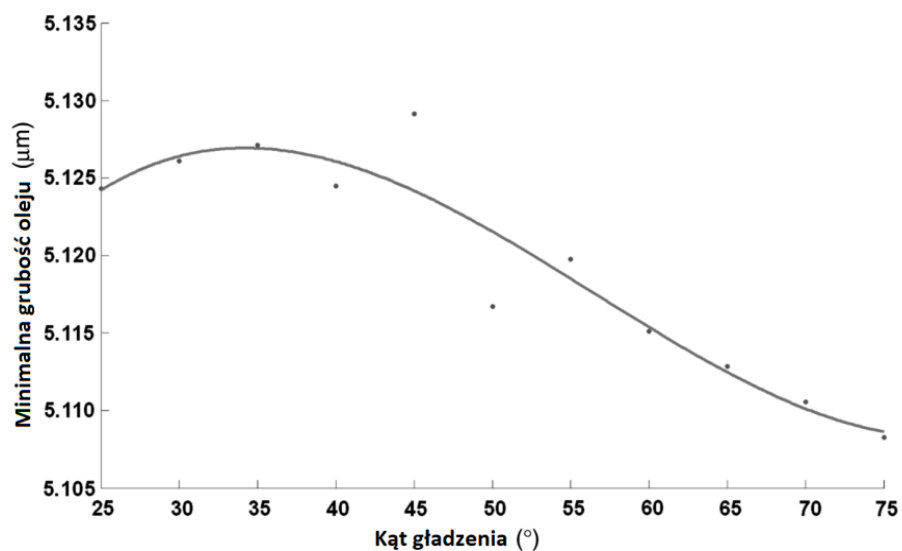
Rys. 64. Wpływ kąta gładzenia na współczynnik tarcia [114]

Knoll [99] również zestawiał dane obrazujące wpływ kąta gładzenia na współczynnik tarcia. Mniejszy kąt gładzenia α powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia, dla różnych prędkości poruszających się elementów współpracujących ze sobą (rys. 65).



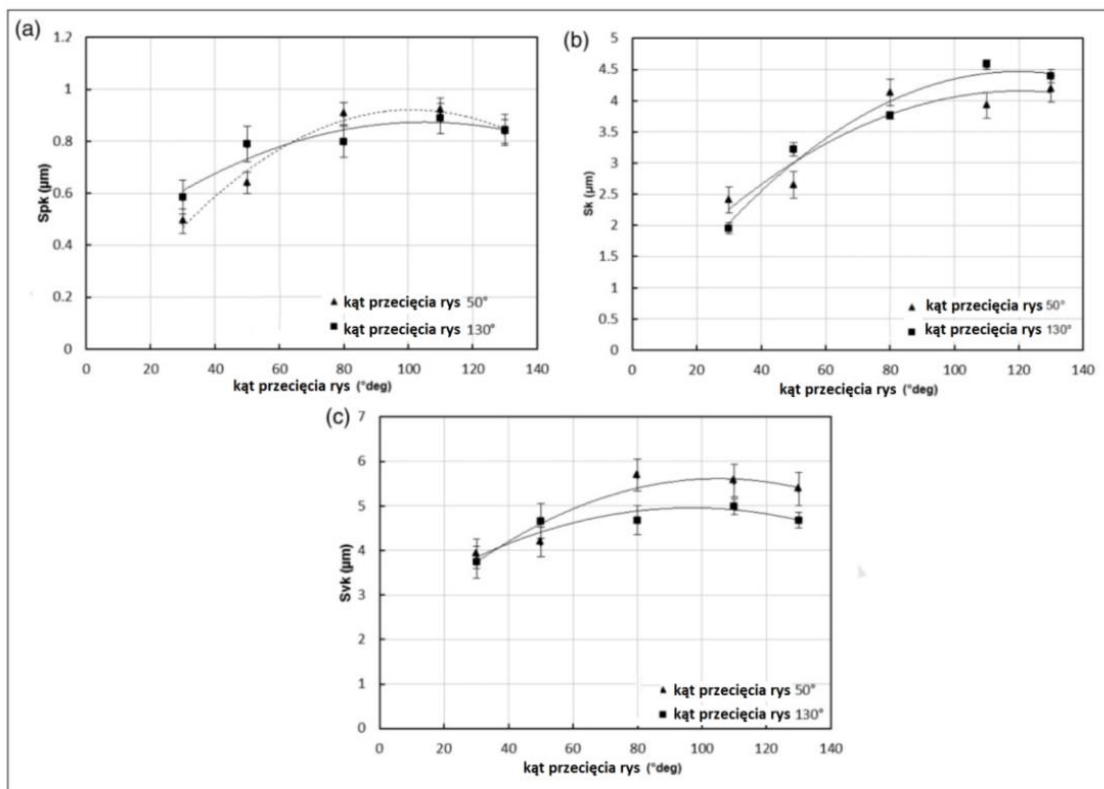
Rys. 65. Wpływ kąta gładzenia na współczynnik tarcia [99]

Mezghani [114] przeprowadził szereg doświadczeń dotyczących wpływu kąta gładzenia na współczynnik tarcia. Grubość filmu olejowego maleje wraz ze wzrostem kąta gładzenia powyżej 35°, co pokazano na rys. 66 [160].



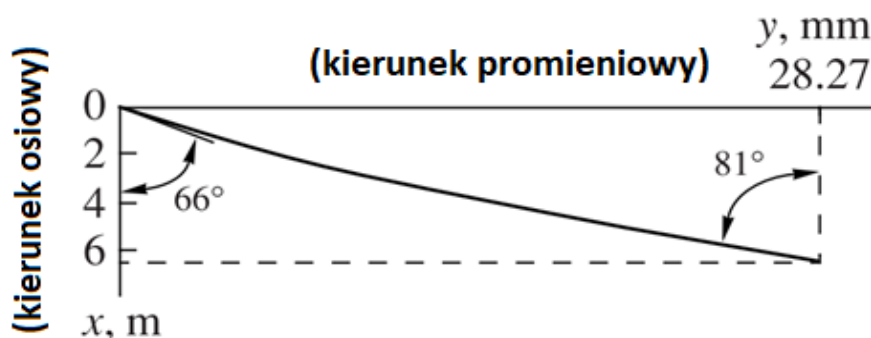
Rys. 66. Wpływ kąta gładzenia na grubość filmu olejowego [160]

Wraz ze wzrostem kąta gładzenia wzrasta wartość parametrów profilu chropowatości powierzchni S_{pk} , S_k i S_{vk} (rys. 67).



Rys. 67. Wpływ kąta przecięcia rys na wybrane parametry profilu chropowatości powierzchni [29]

Gładzenie ze stałym kątem przecinania się rys nie wykorzystuje w pełni możliwości ziaren ściernych [138]. Zmienny kąt gładzenia, pokazany na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu (rys. 68), zapewnia lepsze wykorzystanie narzędzia (mniejsze zużycie narzędzia o 30,3%) oraz poprawia jakość gładzonych otworów, mierzoną za pomocą parametru R_a , której wartość jest zredukowana o 27,7% [138]. Zjawisko to jest przykładem zalety gładzenia przeprowadzanego ze zmienną kinematyką.



Rys. 68. Trajektoria ziarna ściernego ze zmiennym kątem [138]

Trajektorię ziarna z rys. 69 opisać można za pomocą wzoru:

$$y = \left[\cos \left(\arctg \left(\frac{V_{az1}}{V_{ax}} \right) \right) \right] + \left(\frac{V_{az1}}{V_{ax}} \sin \left(\arctg \left(\frac{V_{az1}}{V_{ax}} \right) \right) \right) x + \quad (1.30)$$

$$+ \frac{V_{az2} - V_{az1}}{2tV_{ax}^2} \left(\sin \left(\arctg \left(\frac{V_{az1}}{V_{ax}} \right) \right) \right)^2 x^2$$

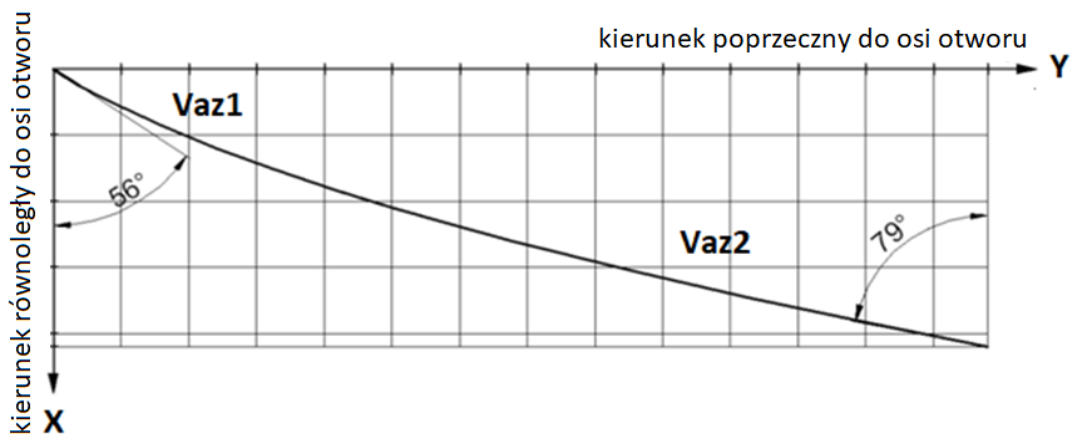
gdzie: $V_{az2} > V_{az1}$

V_{az1} - początkowa prędkość obwodowa głowicy [m/min],

V_{az2} - końcowa prędkość obwodowa głowicy [m/min],

t - czas [min].

Podobnie jak Polyanchikov [138], Babczew [6] zaproponował gładzenie ze zmiennym kątem ukosowania kanałów dystrybuujących olej (rys. 69).

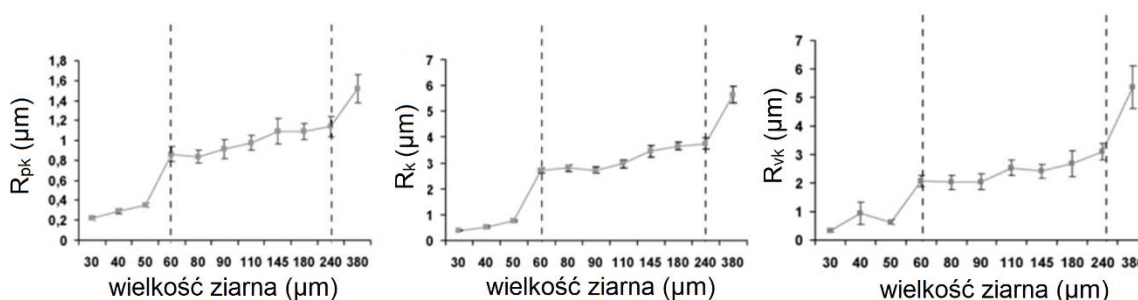


Rys. 69. Trajektoria ziarna ściernego ze zmiennym kątem [6]

Jocsak [83] informuje, że wraz ze wzrostem kąta gładzenia warunki przepływu oleju polepszają się, a wraz ze zmniejszaniem kąta gładzenia ulegają pogorszeniu.

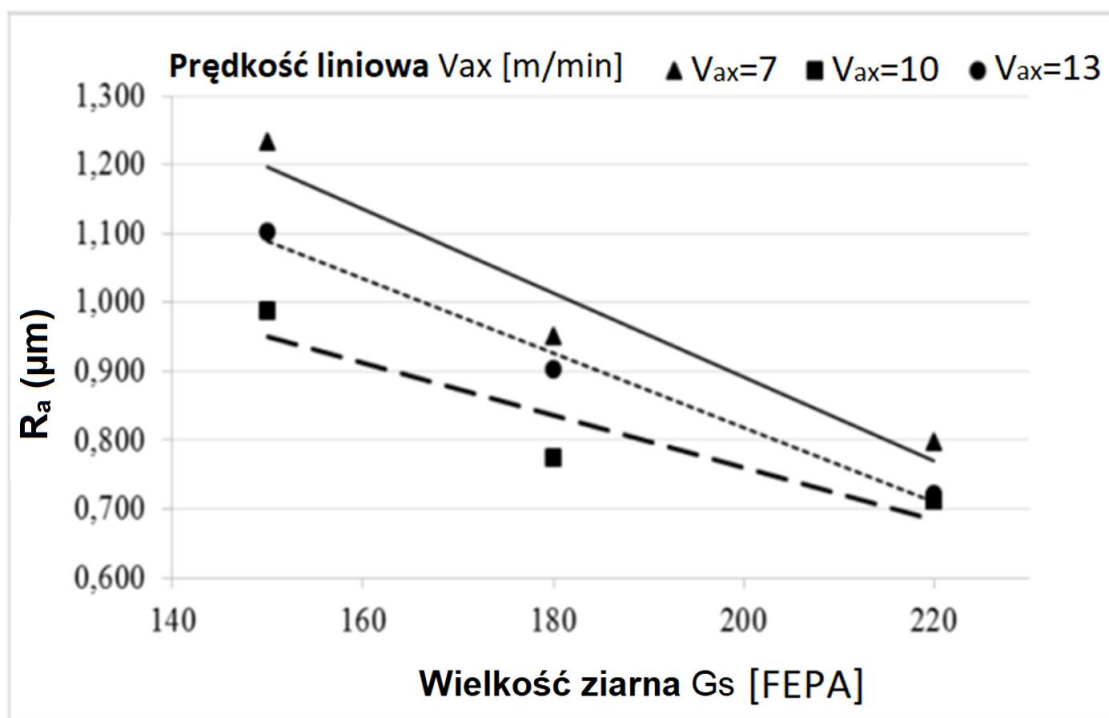
1.4.2. Wpływ wielkości ziarna ściernego na profil chropowatości powierzchni po gładzeniu

Wybór rodzaju ziarna użytego do gładzenia jest uzależniony od materiału obrabianego oraz od wymaganej jakości powierzchni otworu. Wraz ze wzrostem wielkości ziarna wzrasta wartość parametrów profilu chropowatości powierzchni gładzonej: wysokość wierzchołków R_{pk} , wysokość rdzenia R_k oraz głębokość kanałów olejowych R_{vk} [135, 147, 159], co pokazano na rys. 70.



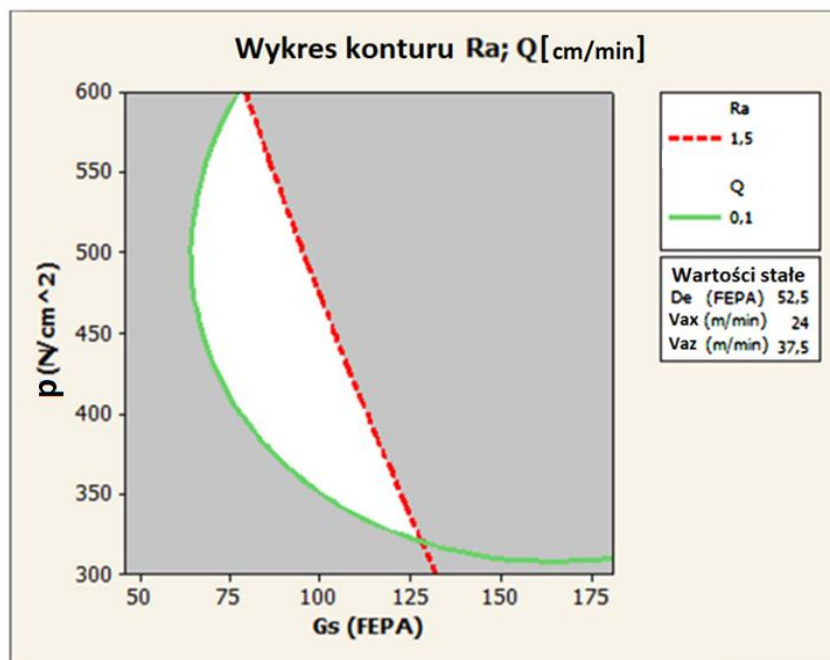
Rys. 70. Wpływ wielkości ziarna na parametry profilu chropowatości powierzchni [147]

Ozdemir [128] zbadał wpływ wielkości ziarna na parametr R_a . Drobniejsze ziarno wpływa na zmniejszenie wartości parametru R_a (rys. 71).



Rys. 71. Wpływ wielkości ziarna na parametry profilu chropowatości powierzchni [128]

Wielkość ziarna oraz wartość nacisku osetki wpływają w znacznym stopniu na uzyskane parametry profilu chropowatości powierzchni, co zostało zobrazowane m.in. przez Irene Buj-Corral (rys. 72). Większe ziarno wpływa na wytworzenie głębszych kanałów olejowych, mniejsze ziarno umożliwia uzyskanie tekstury powierzchni z mniejszą wartością parametru R_{vk} , jak również z mniejszą wartością parametru R_a [15, 69].

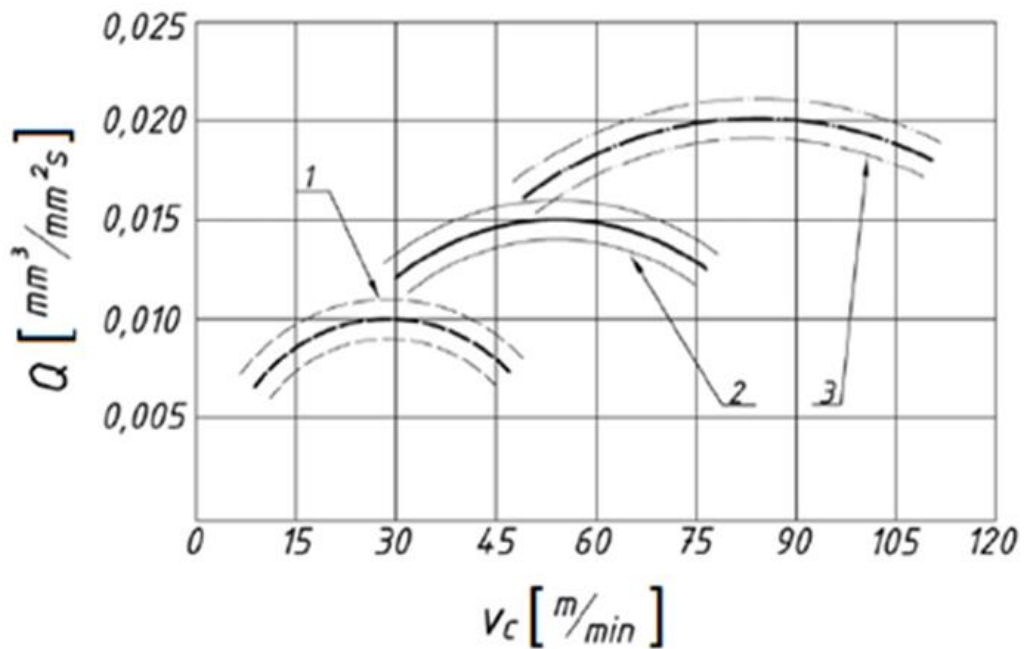


Rys. 72. Wpływ wielkości ziarna G_s i nacisku p na parametr profilu chropowatości R_a oraz na wydajność obróbki Q [15]

Dobór wielkości ziarna jest zadaniem istotnym dla przebiegu procesu gładzenia. Zestawienie materiałów ściernych oraz ich zastosowanie można odnaleźć w literaturze [148, 175].

1.4.3. Wpływ parametrów procesu na wydajność gładzenia

Parametry gładzenia [3, 15, 16, 19, 21, 27] oraz parametry obrabianego przedmiotu [160] wpływają na proces i decydują o przebiegu obróbki. Na rys. 73 przedstawiono ubytek materiału osiągnięty w procesie gładzenia w zależności od prędkości skrawania oraz w zależności od zastosowanego materiału narzędzia ściernego. Największą wydajność obróbkową uzyskano dla azotku boru przy prędkości 85 m/min [163].



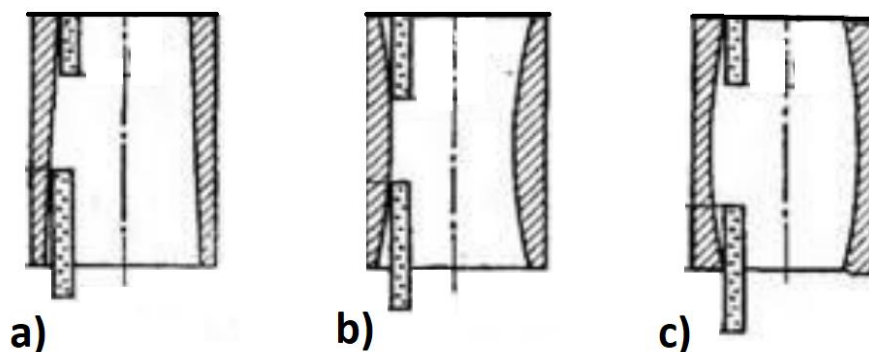
Rys. 73. Wpływ rodzaju osetki na wydajność procesu gładzenia żeliwa GG25. V_c – wypadkowa prędkość skrawania, Q – wydajność usuwania materiału obrabianego (1- ziarno Al_2O_3 , 2-ziarno SiC, 3 – ziarno CBN) [163]

Na wydajność obróbki wpływa również nacisk powierzchniowy osetki. Większy nacisk osetki w połączeniu z kątem przecięcia $\beta = 45^\circ$ wg Nowickeigo [124] zapewnia największą wydajność gładzenia.

Znając wydajność procesu dla różnych warunków wytwarzania przedmiotów gładzonych można lepiej szacować czas obróbki. W procesie gładzenia nie chodzi jednak tylko o szybkie usunięcie nadatku materiału, lecz przede wszystkim o uzyskanie małej odchyłki kształtu gładzonego otworu.

1.4.4. Wpływ parametrów obróbkowych na odchyłki kształtu gładzonego otworu

Jak pokazano na rys. 74, w praktyce występują różne odchyłki kształtu otworów przeznaczonych do gładzenia. Otwory mogą posiadać odchyłkę kształtu: stożka, siodłowości, baryłkowatości (rys. 74), jak również mogą być wykonane niewspółosiowo lub ze skośną osią otworu.



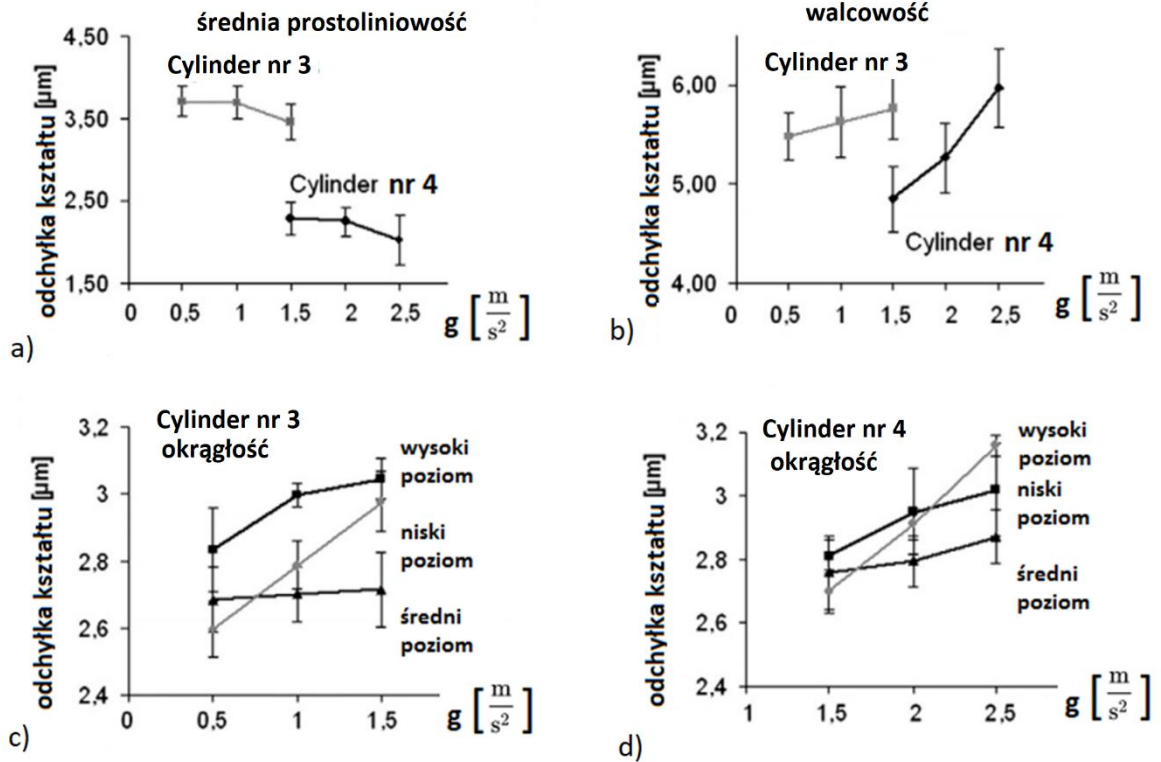
Rys. 74. Otwory z odchyłką kształtu: a) stożka, b) siodłowości, c) baryłkowatości [25]

Jeżeli przedmiot posiada zmienną grubość przekroju oraz odchyłkę walcowości otworu wstępnie wykonanego, występuje wówczas podczas gładzenia zróżnicowany ubytek materiału w przekrojach o różnych grubościach [8].

Wiele uwagi poświęcono w literaturze specjalistycznej zagadnieniu odchyłki walcowości gładzonego otworu [8, 57, 107, 127, 167, 168, 182, 201]. Odnaleźć można badania opisujące model matematyczny usuwania materiału, włączając również możliwość przewidywania niejednorodności powierzchni uzyskanych podczas gładzenia [8, 45, 52, 53, 62] wspomagający przebieg obróbki, systemy wspomagające automatyczny pomiar obrabianej średnicy [82], jak również symulujące przepływu oleju w zależności od odchyłki kształtu cylindra [81].

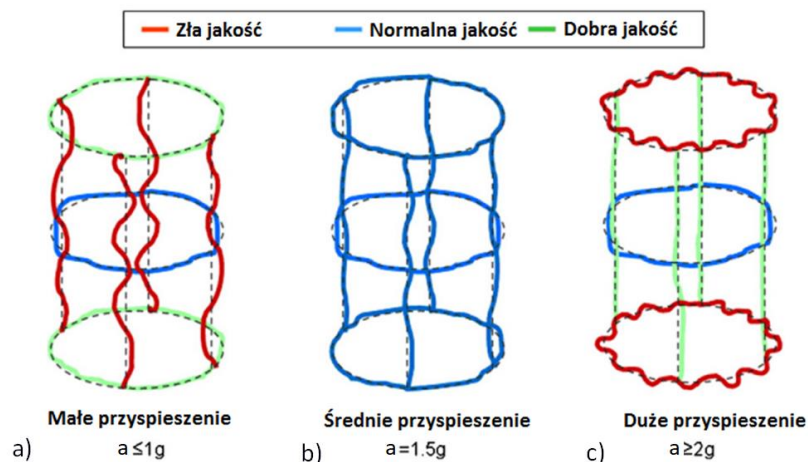
Odchyłka kształtu cylindra i tłoka jest istotna dla pracy zespołu napędowego silnika spalinowego. Na rys. 75 i 76 pokazano wpływ dynamiki procesu na odchyłkę kształtu gładzonego otworu. Istotnym zagadnieniem przy produkcji elementów maszyn jest otrzymywanie otworu z jak najmniejszą odchyłką kształtu.

Wzrost wartości przyspieszenia osiowego ruchu głowicy powoduje zmniejszenie średniej wartości odchyłki prostoliniowości, oraz wpływa na wzrost odchyłki cylindryczności i walcowości gładzonego otworu (rys. 75).



Rys. 75. Wpływ dynamiki procesu gładzenia na odchyłkę kształtu otworu: a) prostoliniowość, b) walcowość, c) i d) okrągłość [107]

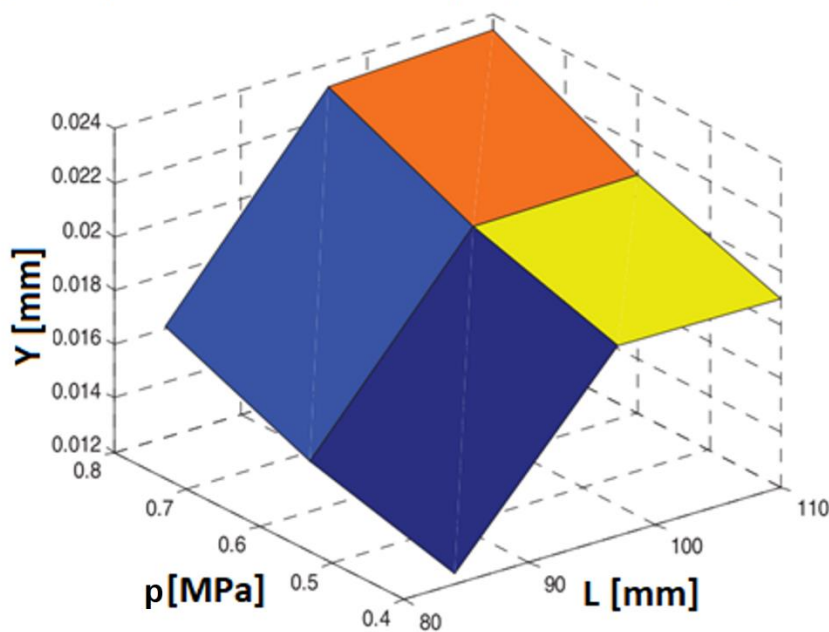
Na rys. 76 pokazano odchyłkę kształtu walcowości występującą podczas gładzenia z trzema wartościami przyspieszenia ruchu głowicy w kierunku osiowym. Przyspieszenie o wartości $a = 1,5 g$ zapewnia dobre rezultaty obróbki (g – przyspieszenie ziemskie).



Rys. 76. Wpływ dynamiki procesu gładzenia na odchyłkę kształtu otworu dla kilku wartości przyspieszenia ruchu głowicy gładzącej: a) przyspieszenie $a \leq 1g$, b) przyspieszenie $a = 1,5g$, c) przyspieszenie $a \geq 2g$ [107]

Wraz ze wzrostem wartości docisku oselki do powierzchni obrabianej wzrasta odchyłka kształtu gładzonego otworu (rys. 77). Zjawisko to szczególnie wyraźnie zaobserwować można podczas gładzenia elementów cienkościennych [8].

$$y = 0,01p^2 - 0,00002L^2 + 0,00008Lp + 0,0041L - 0,0096p - 0,1913$$



Rys. 77. Wpływ parametrów gładzenia na odchyłkę kształtu otworu: L – długość skoku, p – docisk oselki do powierzchni obrabianej, Y – odchyłka kształtu [182]

Schmid [149] stwierdził, że w celu minimalizacji odchyłek kształtu podczas gładzenia cylindrów należy stosować płytę naprężającą, zakładaną od góry na blok silnika i przykręcaną do bloku w celu naprężenia i usztywnienia gładzonych powierzchni otworów.

Ogorodov [127] zaproponował metodę montażu cienkościennych przedmiotów z użyciem usztywniającego pakietu sprężyn, umożliwiającą minimalizację odchyłki walcowości gładzonego otworu.

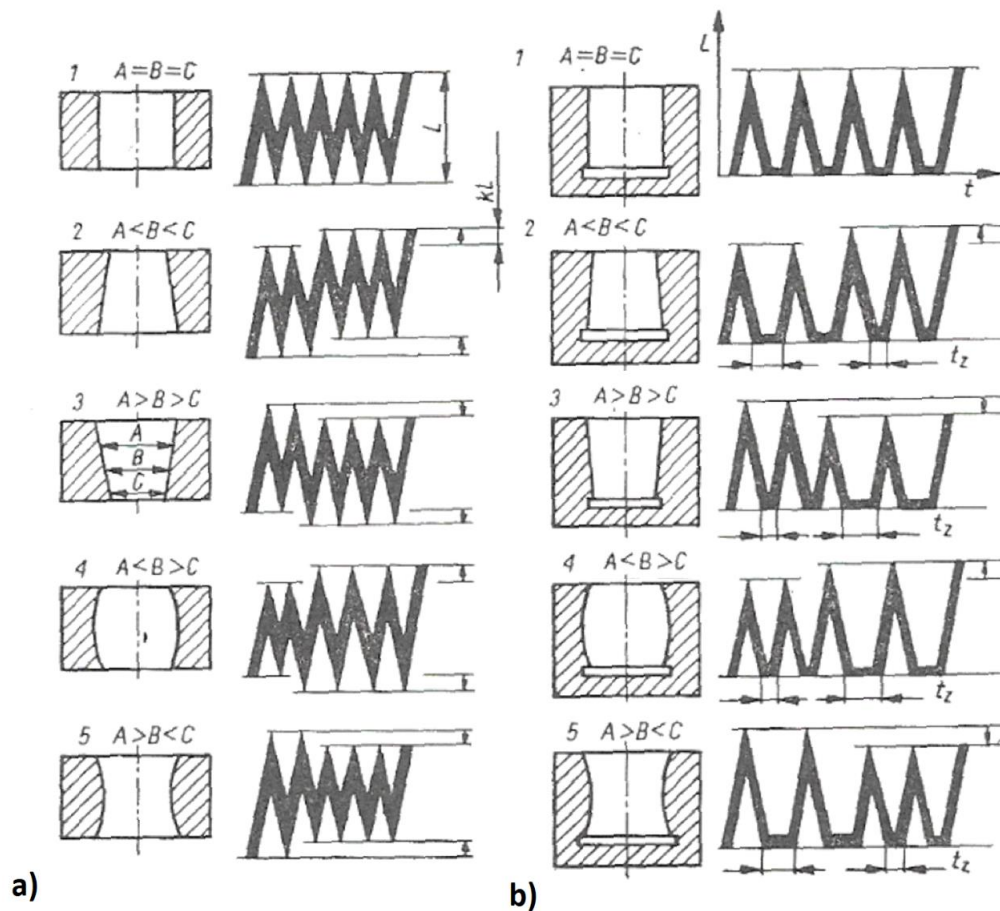
Na rys. 78 pokazano metodę korygowania odchyłek kształtu gładzonego otworu poprzez zmianę długości skoku oraz poprzez czasowe wstrzymywanie osiowego przesuwu głowicy w miejscach występowania zwiększonego nadkładu materiału. Sposób korekty odchyłek kształtu omówiony został również przez Bujukli'ego [18], Calkina [25] oraz Zhanga [201].

Zmienna kinematyka gładzenia to również zmienna długość skoku oselki ścierniej. Zmienną długość wybiegu oselki wykorzystuje się bardzo często do korygowania odchyłek kształtu otworu [133, 179, 182].

Na rys. 78 pokazano sposób korygowania odchyłki kształtu walcowości gładzonego otworu poprzez zmianę sposobu gładzenia. Na rys. 78 a pokazano sposób gładzenia otworów przelotowych, zaś na rys. 78 b otworów nieprzelotowych, dla 5 wybranych przypadków odchyłki kształtu



gładzonego otworu. Na rys. 78 a3 pokazano sposób oznaczenia przekrojów dla gładzonych otworów. Przekrój *a* znajduje się w górnej części, przekrój *b* w części środkowej, przekrój *c* w części dolnej przekroju. Na rys. 78 a1 pokazano sposób gładzenia otworu przelotowego bez odchyłki walcowości, gdzie długość wybiegu roboczego osetki L_{wyb} jest jednakowa w czasie gładzenia t . Na rys. 78 b1 pokazano gładzenie otworu nieprzelotowego, nie posiadającego odchyłki kształtu walca, gdzie zastosowano czasowe wstrzymanie ruchu głowicy gładzącej w kierunku osiowym od strony nieprzelotowego końca otworu w związku z faktem braku możliwości wyjścia osetki poza krawędź otworu, jak od strony przelotowej (rys. 78 a1). Na rys. 78 a2 ÷ a5 oraz b2 ÷ b5 pokazano sposób obróbki otworu przelotowego z odchyłką kształtu walca, w którym zwiększona zostaje liczba roboczych oscylacji osetki w miejscu występowania zwiększonej ilości materiału do usunięcia. Zasadą stosowaną podczas gładzenia otworów jest zwiększenie długości ruchu roboczego w miejscu występowania większego nadmiaru materiału oraz wyłączenie ruchu roboczego w kierunku osiowym, z zachowaniem obrotów głowicy na końcu otworu nieprzelotowego. Otwory przelotowe z odchyłką kształtu walcowości obrabia się w taki sposób, że od strony końca otworu posiadającego większą średnicę (rys. 78 a5) stosuje się minimalny wybieg osetki aż do czasu wyrównania się średnic na obu końcach gładzonego otworu.



Rys. 78. Wybieg osetki w zależności od rodzaju odchyłki walcowości: a) otwory przelotowe, b) otwory nieprzelotowe [179]

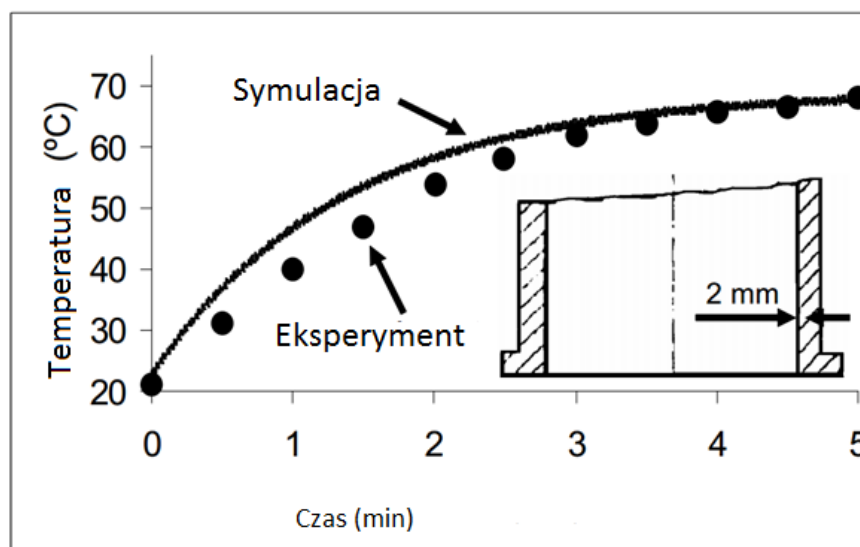
1.4.5. Wpływ parametrów procesu gładzenia na przyrost temperatury przedmiotów gładzonych

Nagrzewanie układu *OUPN* stanowi jeden z głównych problemów technologicznych obróbki [8, 56, 184, 185, 202], ponieważ powoduje „termiczną” odchyłkę kształtu gładzonego otworu i w obróbce przedmiotów cienkościennych, szczególnie ze zmienną grubością ścianki (rys. 79), uniemożliwia uzyskanie dużej wydajności procesu gładzenia [155]. Wyższa temperatura wpływa również na wzrost adhezji materiału obrabianego do narzędzia [204]. Zbyt wysoka temperatura procesu może uszkodzić przedmiot obrabiany [202].

Największą trudnością przeprowadzanej obróbki gładzenia otworu tulei są powstające odchyłki kształtu na wskutek odkształceń termicznych spowodowanych przyrostem temperatury w procesie.

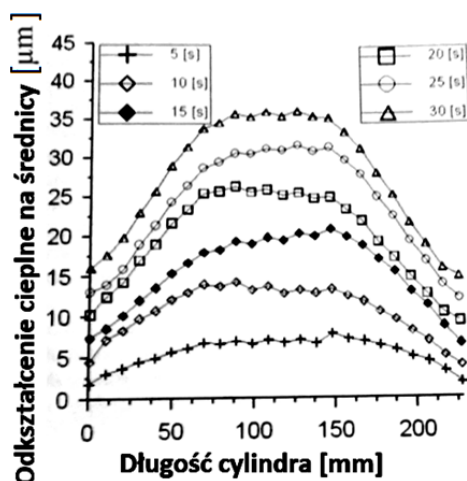
Podczas gładzenia ciepło przekazywane jest od osełki do przedmiotu obrabianego w sposób opisany w literaturze [109, 184, 185]. Stwierdzono, co oczywiste, że wyższa temperatura procesu powoduje większe odchyłki kształtu gładzonego przedmiotu [8, 155].

Na rys. 79 i 80 zaprezentowano przyrost temperatury w układzie *OUPN* podczas gładzenia, w zależności od czasu obróbki.



Rys. 79. Nagrzewanie się tulei cienkościennych w procesie gładzenia w zależności od czasu obróbki [56]

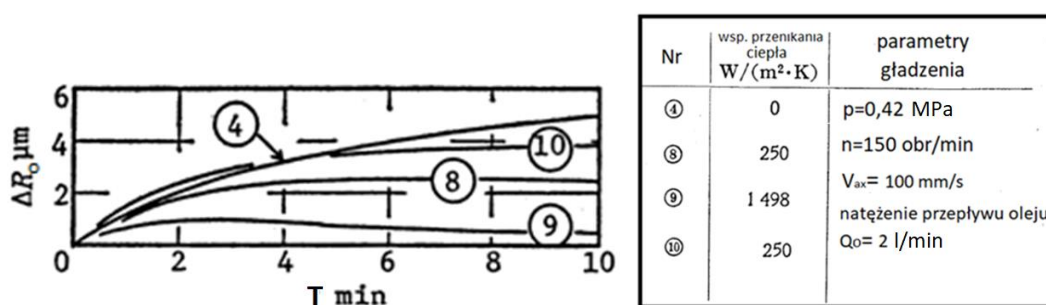
Zjawisko odkształcania się tulei cienkościennej podczas gładzenia, w zależności od czasu obróbki, pokazano na rys. 80.



Rys. 80. Odkształcenie tulei cienkościennej podczas gładzenia, w zależności od czasu obróbki [133]

W miarę wzrostu czasu gładzenia temperatura przedmiotu metalowego zwiększa się, w miarę wzrostu temperatury otwór ulega zniekształceniu oraz zwiększa się jego średnica. Ciepło powstające w procesie wpływa na deformacje kształtu otworu [8, 133, 184, 185].

Na rys. 81 zobrazowano występujący w procesie gładzenia efekt wzrostu temperatury przedmiotu obrabianego wskutek nagrzewania się układu *OUPN*. W miarę zwiększania czasu obróbki zwiększa się odchyłka kształtu gładzonego otworu, co obrazuje przyrost promienia ΔR_o (rys. 81) w połowie długości elementu. Cyfry 4, 8, 9 i 10 pokazane na rys. 81 reprezentują różne warunki chłodzenia, dla eksperymentu opisanego w literaturze [184], i obrazują istotną rolę chłodzenia podczas gładzenia. Najefektywniejszą wymianę ciepła i najmniejszy przyrost promienia R_o otrzymuje się po zastosowaniu oleju do honowania (poz. 9 z rys. 81), największy wzrost promienia R_o uzyskuje się przy gładzeniu bez stosowania chłodziwa (poz. 4 z rys. 81).



Rys. 81. Odkształcenia termiczne promienia otworu ΔR_o w funkcji czasu gładzenia t dla różnych warunków gładzenia (cyfry 4,8,9,10 oznaczają różne warunki chłodzenia, cyfra 4 oznacza brak chłodzenia, czyli wsp. przenikania ciepła do chłodziwa $0 W/m^2K$, cyfra 9 – olej do honowania, cyfra 8 – olej do szlifowania) [184]

Wzrost temperatury wpływa niekorzystnie na przeprowadzanie obróbki gładzenia dla elementów z małymi tolerancjami średnicy otworu oraz z małymi dopuszczalnymi odchyłkami kształtu walcowości i okrągłości, ze względu na występujące odkształcenia termiczne [8].

1.5. Podsumowanie analizy literatury

W literaturze specjalistycznej występuje znaczna liczba pozycji zajmujących się zagadnieniem teksturowania powierzchni współpracujących elementów. Wiele spośród nich zajmuje się gładzeniem oraz nowymi metodami obróbki, wpływającymi na redukcję współczynnika tarcia oraz zużywania się współpracujących części maszyn.

W obróbce zgrubnej prędkość obrotowa głowicy jest czynnikiem wpływającym w największym stopniu na parametry profilu chropowatości powierzchni R_k , R_{vk} i R_z oraz na otrzymaną teksturę powierzchni. Prędkość obrotowa głowicy powinna być zweryfikowana w dalszych badaniach pod kątem wpływu na przebieg procesu gładzenia, przy zmiennej wartości liczby obrotów głowicy.

Wartość przyspieszenia głowicy w trakcie gładzenia wpływa również na odchyłkę walcowości gładzonego otworu. Najmniejszą odchyłkę walcowości otrzymuje się dla przyspieszenia ruchu głowicy gładzącej o wartości $a = 1,5$ g.

Zmienna kinematyka gładzenia może być stosowana, zamiast tradycyjnej, w związku z mniejszym zużywaniem się oselek oraz z niższą chropowatością powierzchni uzyskiwaną w procesie.

Zmiana kierunku pracy ziarn ściernych zapobiega osadzeniu się cząsteczek materiału obrabianego na powierzchniach roboczych ziarn i powoduje samoostrzenie osełki. Zmienny kąt gładzenia zapewnia lepsze wykorzystanie narzędzia (mniejsze zużycie o 30,3%) oraz poprawia jakość gładzonych otworów, mierzoną za pomocą parametru R_a , której wartość jest redukowana o 27,7%.

Oprócz wzrostu żywotności narzędzia, zastosowanie zmiennej kinematyki umożliwia uzyskanie nowych kształtów kanałów olejowych.

Istotnym zagadnieniem gładzenia jest przyrost temperatury powierzchni gładzonego przedmiotu, co powoduje zmianę średnicy gładzonego otworu.

W literaturze nie znaleziono wyników badań gładzenia przeprowadzanych ze zmienną kinematyką, omawiających zagadnienie przyrostu temperatury oraz odchyłki kształtu obrabianych otworów w zależności od zmienności parametrów obróbkowych.

2. HIPOTEZA PRACY, CELE NAUKOWE I ZAKRES BADAŃ

Analiza literatury wskazuje na to, że zmienna kinematyka gładzenia umożliwi uzyskanie, podczas gładzenia otworów, lepszej jakości powierzchni obrabianej (otrzymanie mniejszej wartości parametru profilu chropowatości R_a) i mniejszej odchyłki walcowości gładzonego otworu.

Można postawić hipotezę, że zastosowanie zmiennej kinematyki gładzenia umożliwi uzyskanie niższej temperatury obrabianego przedmiotu, co wpłynie na mniejszą odchyłkę walcowości otworu i spowoduje skrócenie czasu gładzenia. Niższa temperatura przedmiotu gładzonego wiąże się z mniejszymi odkształceniami termicznymi otworu oraz z krótszym czasem studzenia przedmiotów obrabianych (do temperatury $T = 20^\circ\text{C}$), w celu umożliwienia wykonania pomiaru uzyskanej średnicy otworu w danym momencie obróbki, w wymaganej temperaturze pomiaru przewidzianej dla Izb Pomiarowych. Zmienna kinematyka gładzenia powinna usprawnić seryjną produkcję gładzonych tulei cienkościennych stosowanych m.in. w silnikach spalinowych.

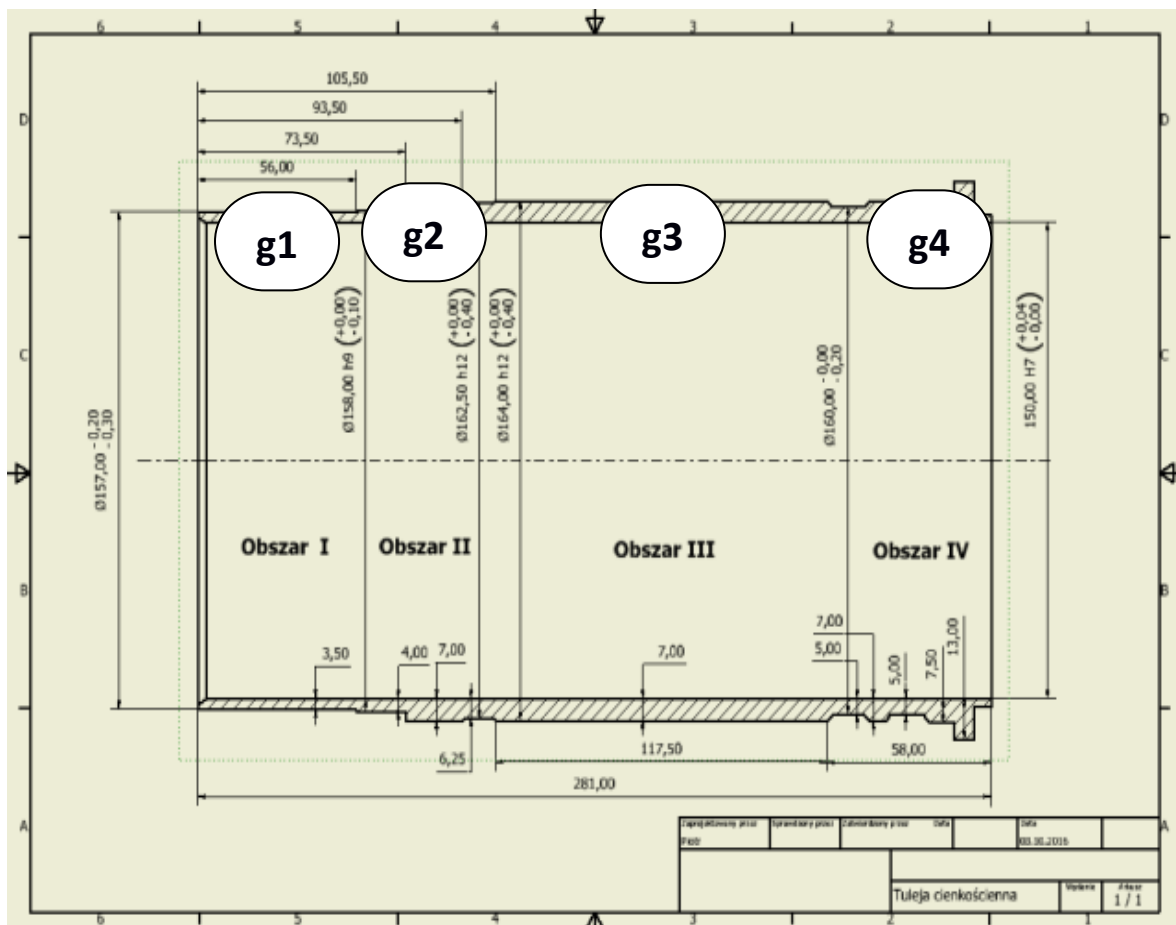
Z przedstawionej hipotezy wynikają cele i zakres rozprawy. Jako główne cele pracy doktorskiej należy uznać:

- 1) Przeprowadzenie badań eksperymentalnych gładzenia otworów walcowych ze stałą i zmienną kinematyką na trzech stanowiskach badawczych.
- 2) Stworzenie modelu matematycznego ubytku materiału oraz przyrostu temperatury w układzie *OUPN* dla różnych wartości parametrów procesu, dla gładzenia tradycyjnego.
- 3) Zweryfikowanie wpływu zmiennej kinematyki gładzenia na parametry profilu chropowatości powierzchni obrabianej oraz na odchyłkę walcowości gładzonego otworu.
- 4) Przeprowadzenie symulacji numerycznych gładzenia, na modelu bryłowym 3D głowicy gładzącej o wymiarach uzyskanych z pomiarów głowicy gładzącej na maszynie współrzędnościowej pomiarowej, w celu weryfikacji odkształcalności tulei o stałej i o zmiennej grubości ścianki na dokładnym modelu 3D narzędzia obróbkowego.
- 5) Zbadanie wpływu wartości promienia krzywizny ścieżki ziarna ściernego na przyrost temperatury gładzonego otworu, dla gładzenia ze zmienną kinematyką.
- 6) Zbadanie wpływu wartości promienia krzywizny ścieżki ziarna ściernego na odchyłkę kształtu gładzonego otworu, dla gładzenia ze zmienną kinematyką.

Sterowanie krzywizną ścieżki ziarna w honownicach CNC, może wpłynąć na zwiększenie wydajności obróbki, poprzez umożliwienie uzyskania zmniejszonej odchyłki kształtu gładzonego otworu oraz ze względu na skrócenie łącznego czasu obróbki.

3. PROBLEMATYKA SERYJNEJ OBRÓBKI CYLINDRÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH

Obróbka przedmiotu pokazanego na rys. 82 następuje z wieloma trudnościami wykonawczymi związanymi z odkształceniami gładzonego otworu. Temperatura powstająca w układzie *OUPN* jest znacznie wyższa od temperatury otoczenia, dodatkowo jej wartość szybko wzrasta (nawet o kilkadziesiąt stopni Celsjusza), co powoduje deformację kształtu i wzrost średnicy otworu. Odkształcony przedmiot obrabiany uniemożliwia przeprowadzenie weryfikacji uzyskanej wskutek gładzenia średnicy otworu na danym etapie obróbki.

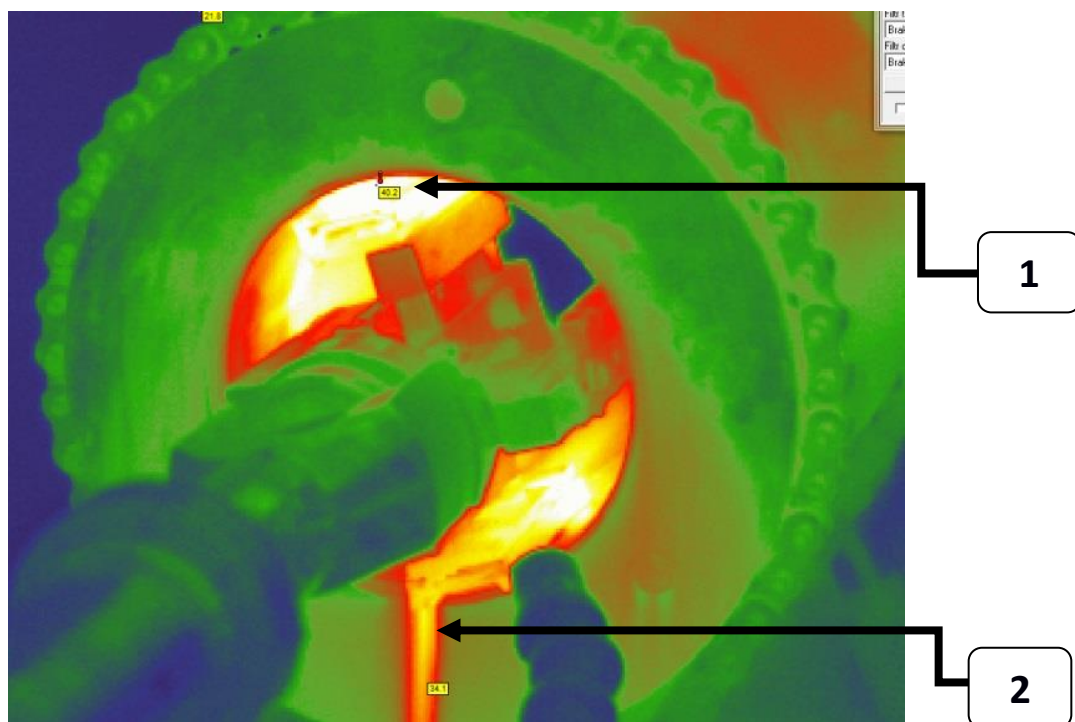


Rys. 82. Tuleja cienkościenna ze zmienną grubością ścianki g : grubość $g_1 = 3,5$ mm, $g_2 = 4,0$ mm, $g_3 = 7,0$ mm, $g_4 = 13,0$ mm (średnica otworu 150H7, długość otworu 281 mm)

Gładzenie przedmiotów cienkościennych, w związku z odkształceniami cieplnymi występującym na skutek wzrostu temperatury w układzie *OUPN*, przeprowadza się w kilku etapach. Na rys. 83 pokazano obraz z kamery termowizyjnej, który zarejestrowany został po przeprowadzeniu pierwszego etapu gładzenia przedmiotu z rys. 82.

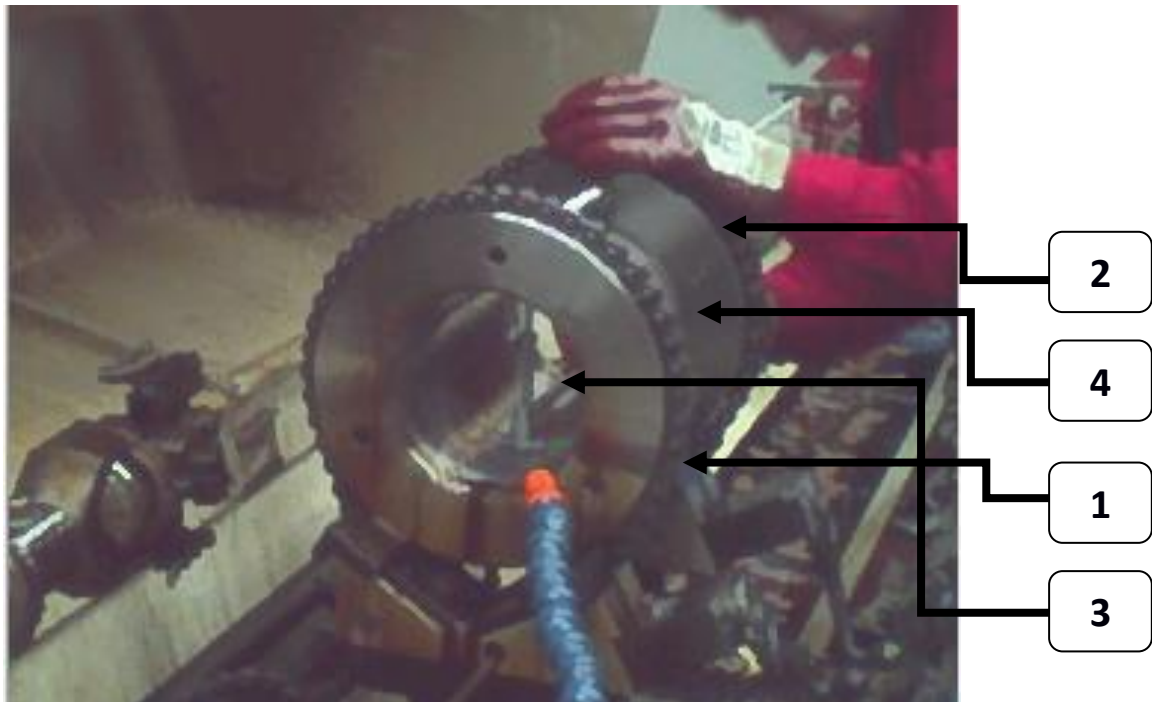
Podczas seryjnego gładzenia cylindrów silników spalinowych (rys. 82) zaobserwowano, że warstwy materiału nie są usuwane równomiernie na skutek występujących odkształceń sprężystych i termicznych, powodujących deformację otworu w trakcie gładzenia. Najmniej efektywnie usuwany materiał, z przedmiotu pokazanego na rys. 82, znajduje się w najcieńszym przekroju (obszar I). Najskuteczniej usuwany jest materiał w najgrubszym przekroju (obszar IV).

W czasie 90 sekund obróbki zmierzony wzrost temperatury w układzie *OUPN* wyniósł około 20°C , zaś temperatura oleju wzrosła o ok 15°C względem temperatury początkowej, która była równa temperaturze otoczenia. Wymiary średnicy otworu po gładzeniu, po przechowaniu przedmiotów przez kilka godzin w temp. 20°C w izbie pomiarowej, zmieniają się na skutek zaniku odkształceń cieplnych przedmiotu.



Rys. 83. Termogram układu *OUPN* zarejestrowany podczas gładzenia tulei z rys. 82 (1- temperatura maksymalna w gładzonym otworze $40,2^{\circ}\text{C}$, 2 - temperatura chłodziwa $34,1^{\circ}\text{C}$)

Na rys. 84 pokazano sposób przeprowadzania pomiaru średnicy otworu bezpośrednio po zakończeniu etapu gładzenia. Wskutek znacznego wzrostu temperatury przedmiotu gładzonego pomiar był wykonany w celu wstępnej kontroli uzyskanej średnicy otworu. Liczba etapów gładzenia uzależniona jest od intensywności ubytku materiału i osiągniętej temperatury przedmiotu.



Rys. 84. Pomiar średnicy gładzonego otworu przedmiotu zamontowanego pomiędzy usztywniającymi tarczami czołowymi (1 i 2 – tarcze czołowe, 3 - średnicówka mikrometryczna, 4 – łańcuch mocujący przedmiot gładzony na poziomej honownicy CNC Sunnen HTH 4000S)

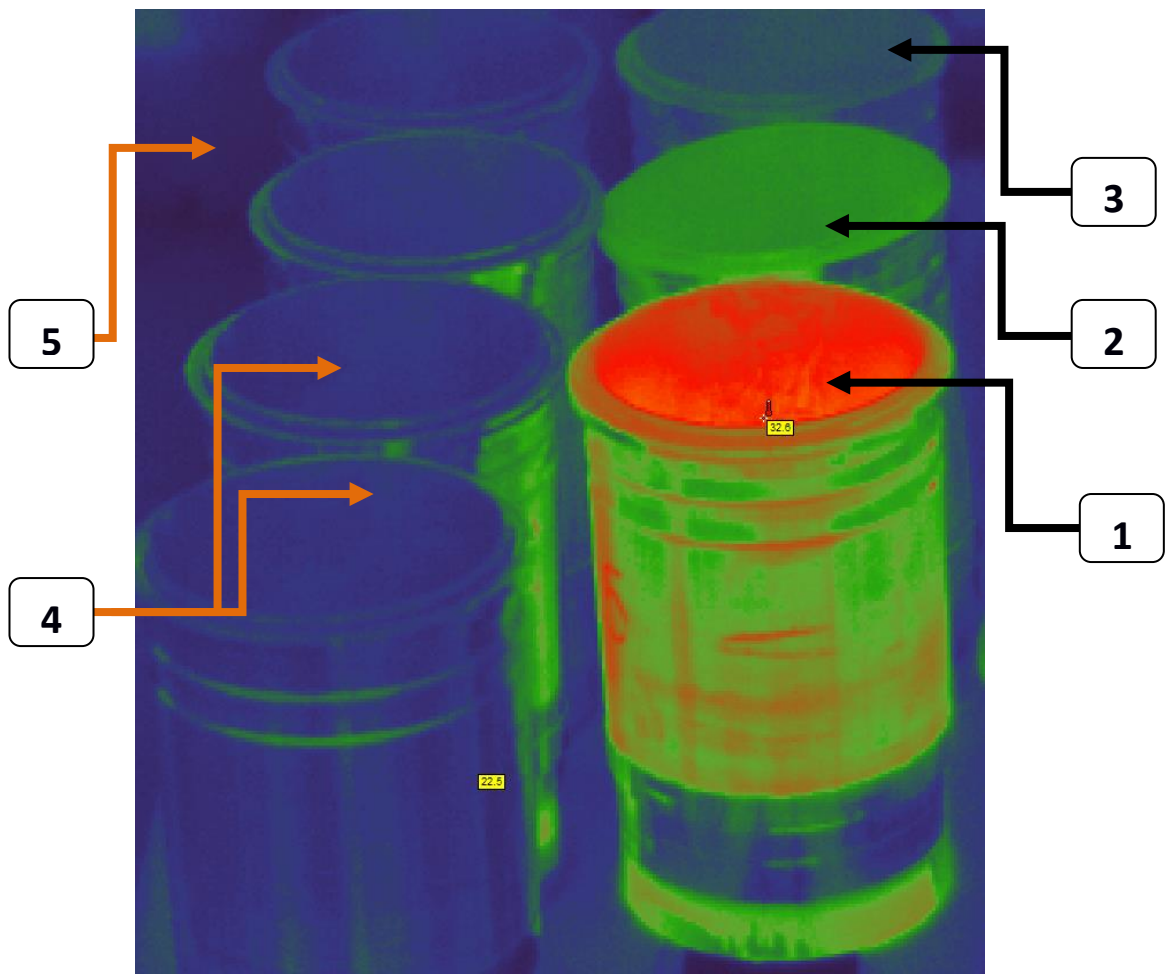
Gładzenie przedmiotu z rys. 82 przeprowadzano w taki sposób, iż najwięcej oscylacji ośki roboczej wykonywano w najcieńszym przekroju obrabianego otworu (obszar I na rys. 82), najmniej oscylacji wykonywano w przekroju najgrubszym (obszar IV na rys. 82).

Na rys. 85 pokazano cylindry przed obróbką (poz. nr 4) i po obróbce (poz. 1, 2 i 3). Temperatura tulei nr 4 jest równa temperaturze otoczenia, cylindry nr 1, 2 i 3 posiadają temperaturę wyższą od temperatury otoczenia. Gładzenie przeprowadzano w taki sposób, iż po 90 sekundach przerywano proces gładzenia i nagrany cylinder odkładano do ostygnięcia, po czym przeprowadzano obróbkę kolejnego cylindra.

Cylinder nr 3 z rys. 85 gładzono 180 sekund wcześniej przed przedmiotem nr 1 a cylinder nr 2 obrabiano około 90 sekund wcześniej niż przedmiot nr 1. Temperatura przedmiotu nr 3 z rys. 85 jest wyższa niż przedmiotu nieobrabianego nr 4. Podczas obróbki seryjnej nie możliwe było gładzenie cylindra na gotowo, ponieważ oczekiwanie na ostygnięcie nagrzanego przedmiotu do temperatury umożliwiającej dokonanie weryfikacji uzyskanej w danym momencie obróbki średnicy otworu byłoby zbyt czasochłonne. Aby można było kontynuować obróbkę należało dokonać pomiaru rzeczywistego wymiaru średnicy otworu, czyli otworu nie zdeformowanego termicznie wskutek

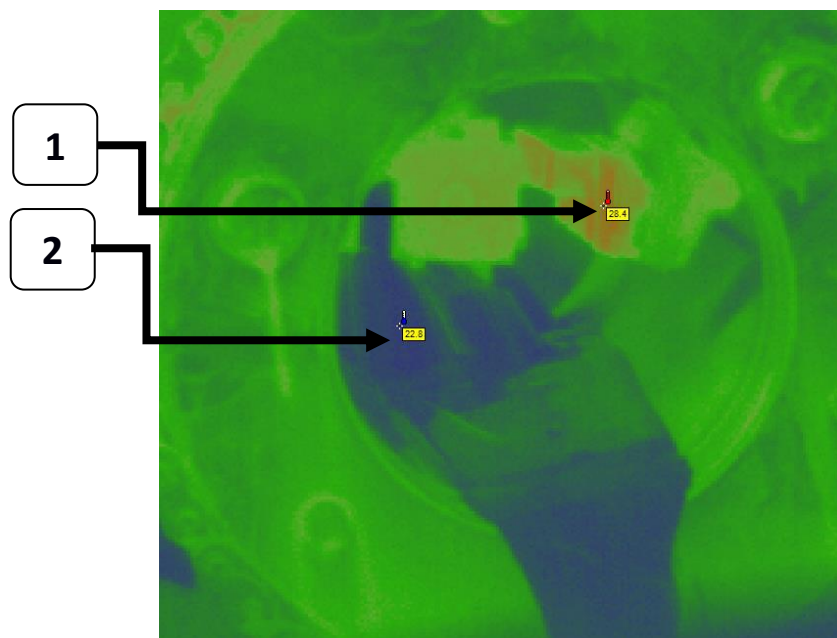
wzrostu temperatury w układzie OUPN, co wymagało studzenia przedmiotów do temperatury otoczenia.

Seryjną obróbkę cylindrów silników spalinowych wykonywano w czterech etapach, przy czym każdy kolejny etap przeprowadzano po ostygnięciu przedmiotu gładzonego z etapu poprzedniego, aby zanik odkształceń cieplnych umożliwił dokonanie pomiaru rzeczywistej średnicy otworu. W każdym etapie gładzenia obserwowano zmienną wydajność obróbki w różnych miejscach gładzonego cylindra. Tuleję nr 1 (rys. 85 poz. 1) odłożono do ostygnięcia bezpośrednio po gładzeniu, i posiada wyższą temperaturę niż tuleje o nr 2 i 3, które gładzono i odstawiono do stygnięcia wcześniej.

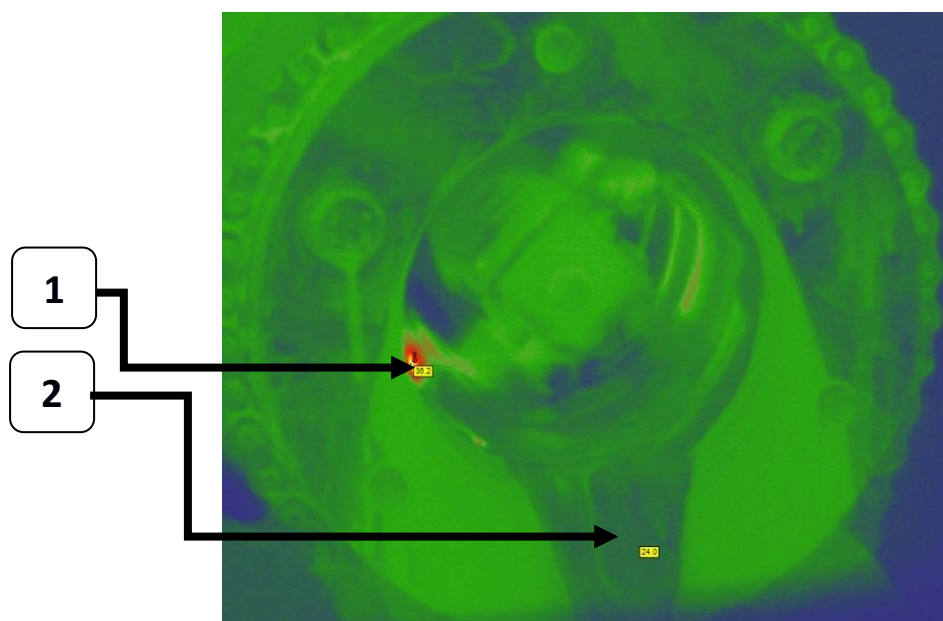


Rys. 85. Termogram tulei cylindrowych: 1 – bezpośrednio po obróbce, o temperaturze znacznie wyższej od temperatury otoczenia, $T = 32,6^{\circ}\text{C}$, 2 – gładzonych wcześniej, przed obróbką tulei poz.1, częściowo ostudzonych, 3 – gładzonych przed obróbką tulei poz. 2 i ostudzonych do temperatury bliskiej temperatury otoczenia, 4 – tuleje oczekujące na obróbkę, 5 – temperatura otoczenia $T_{ot} = 22,5^{\circ}\text{C}$

Na kolejnych rysunkach zobrazowano przyrost temperatury przedmiotu (z rys. 82) podczas gładzenia. Pomiary wykonano na początku obróbki (rys. 86), po 60 sekundach (rys. 87), po 120 sekundach (rys. 88) oraz po 135 sekundach (rys. 89).

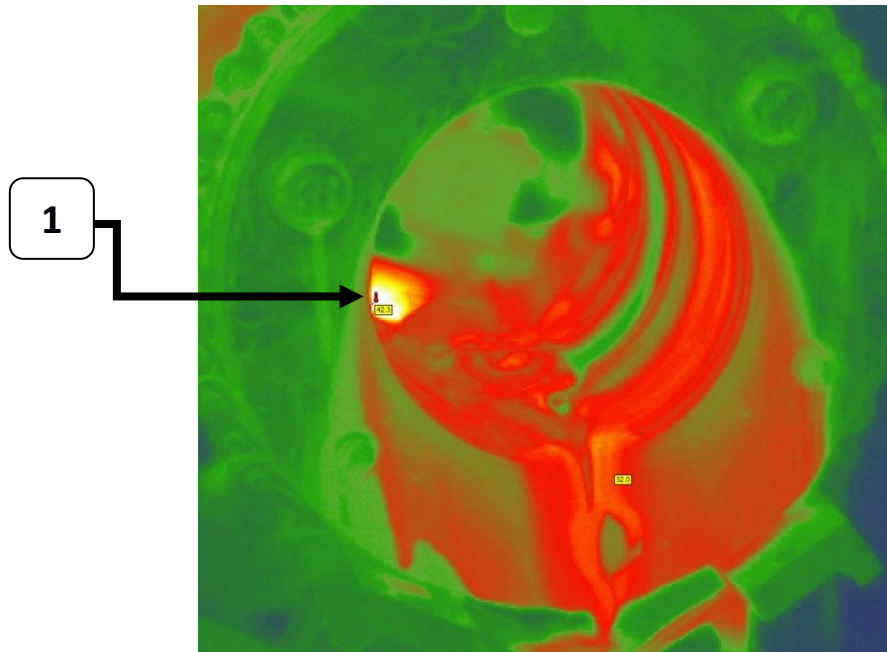


Rys. 86. Termogram na początku obróbki: temperatura oleju $T_{ol} = 22,8^{\circ}\text{C}$, temperatura oselek $T_{os} = 28,4^{\circ}\text{C}$; poz. 1 – ośka, poz. 2 - olej

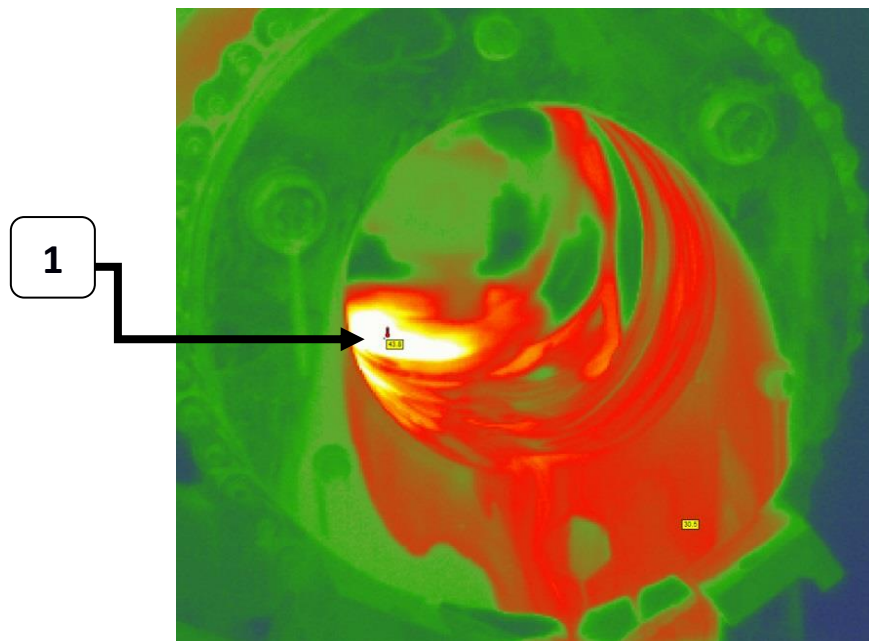


Rys. 87. Termogram dla obróbki trwającej 60 sekund: temperatura oleju $T_{ol} = 24^{\circ}\text{C}$, temperatura oselek $T_{os} = 36,2^{\circ}\text{C}$; poz. 1 – ośka, poz. 2 - olej

Na rysunkach (rys. 88 i rys. 89) widoczny jest przyrost temperatury w układzie obróbkowym, odpowiednio po 120 i po 135 sekundach gładzenia.

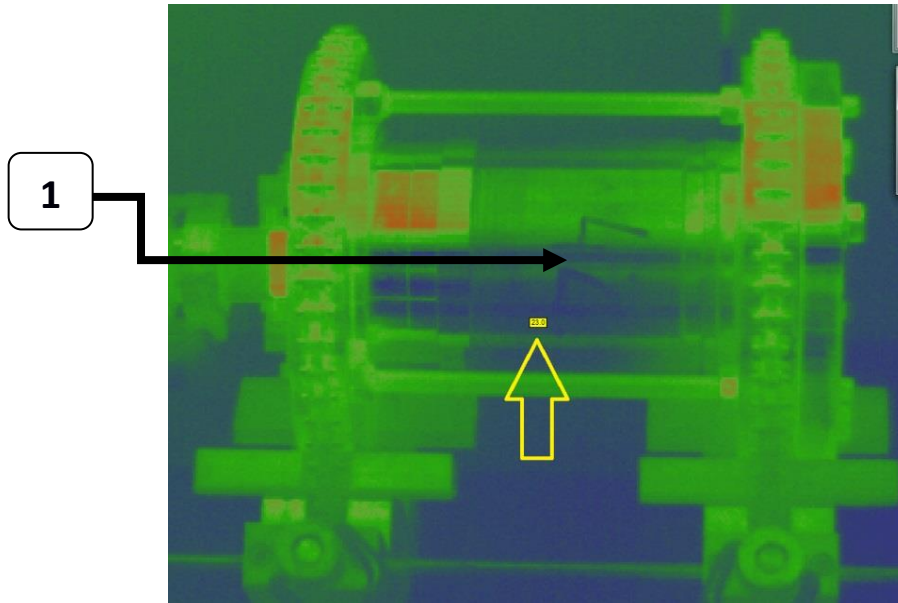


Rys. 88. Termogram wykonany po obróbce trwającej 120 sekund, poz. 1 - maksymalna wartość zmierzonej temperatury $T = 42,3^{\circ}\text{C}$

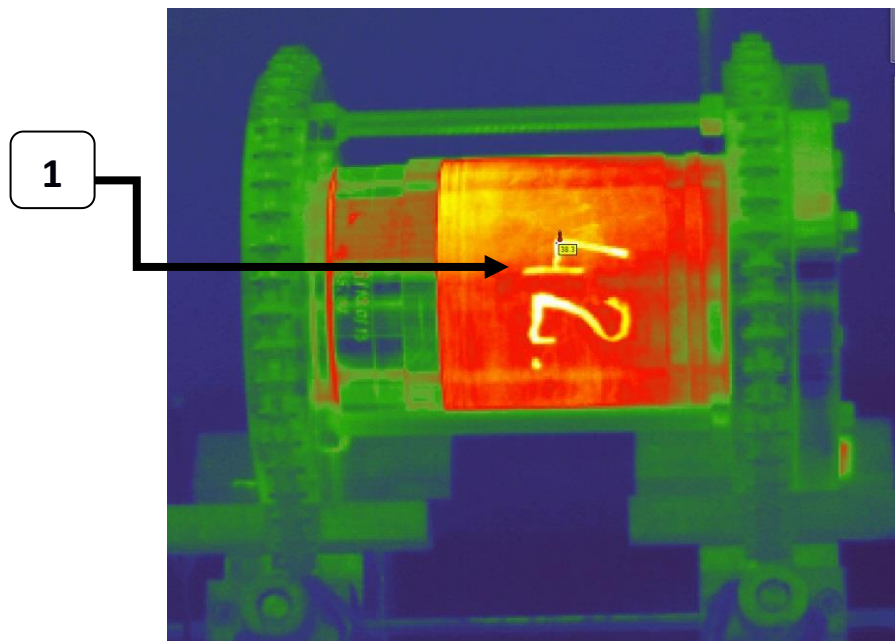


Rys. 89. Termogram dla obróbki trwającej 135 sekund, poz. 1 - maksymalna wartość zmierzonej temperatury $T = 43,6^{\circ}\text{C}$,

Temperatura przedmiotu zamocowanego na honownicy wynosi 23°C (rys. 90) i jest równa temperaturze otoczenia. Różnice kolorystyczne widoczne na rys. 90 wynikają z występujących refleksów świetlnych będących efektem odbijania promieni słonecznych w trakcie obróbki na hali produkcyjnej. Po 180 sekundach gładzenia temperatura przedmiotu wzrosła o ponad 15°C (rys. 91).

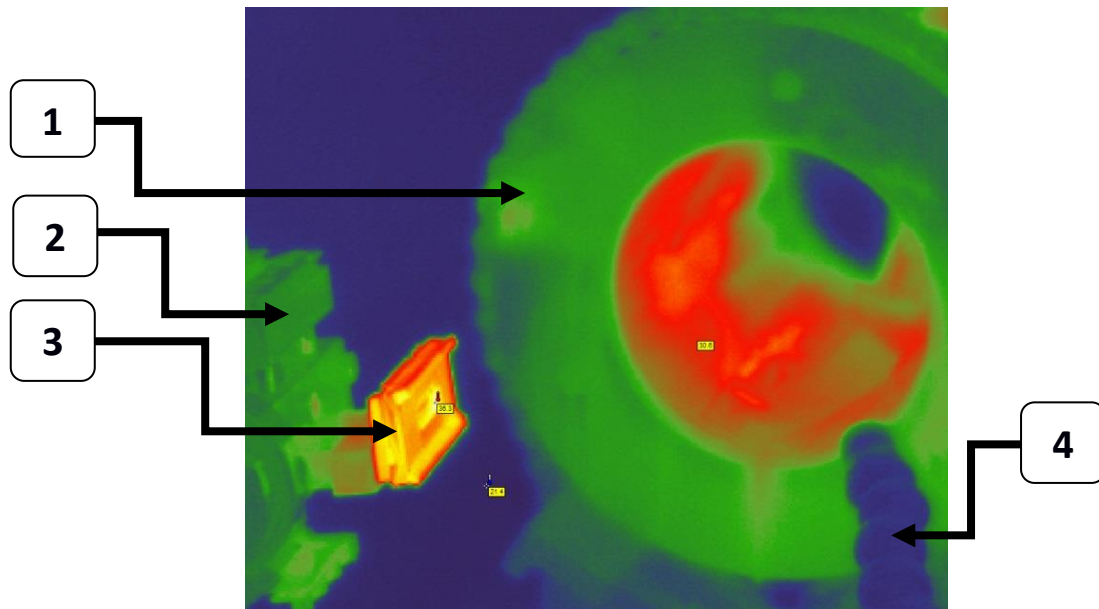


Rys. 90. Przedmiot przygotowany do gładzenia (cylinder nr 42 z partii produkcyjnej); cyfra 1 wskazuje numer obrabianego cylindra z partii produkcyjnej

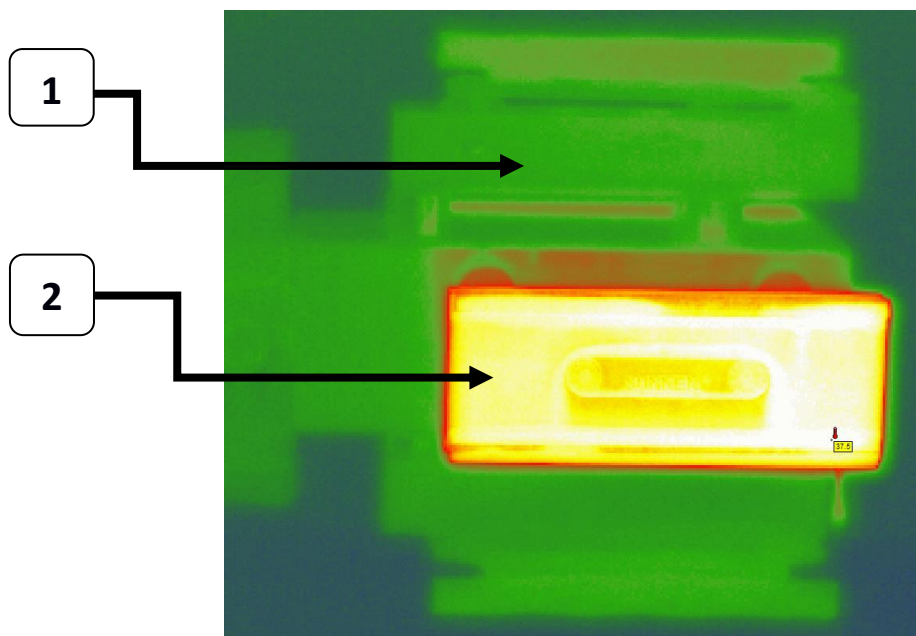


Rys. 91. Temperatura przedmiotu po gładzeniu trwającym 180 sekund ($T = 38,3^{\circ}\text{C}$); cyfra 1 wskazuje numer obrabianego cylindra z partii produkcyjnej

Na rysunkach rys. 92 i 93 pokazano termogram narzędzia obróbkowego, który zarejestrowano po 180 sekundach gładzenia.

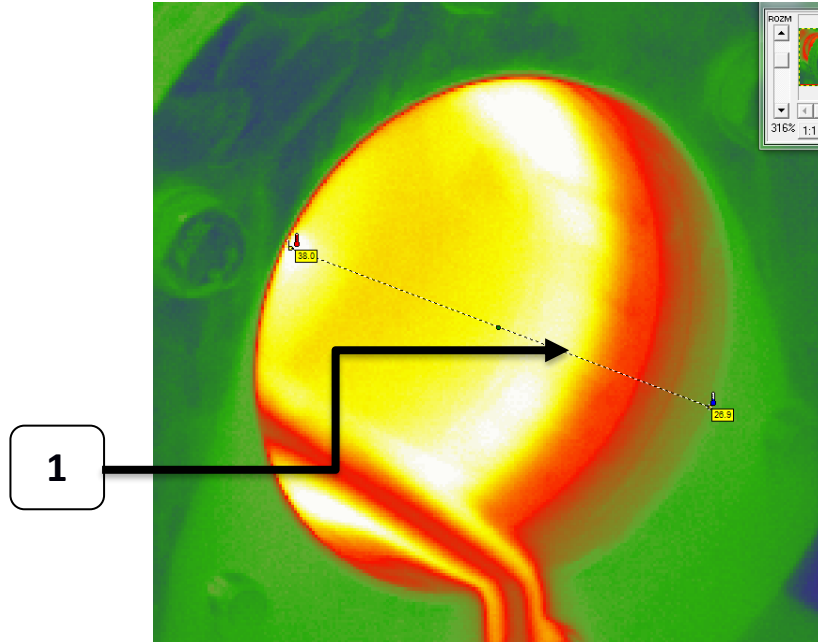


Rys. 92. Termogram układu obróbkowego (oselka ścierna i otwór gładzonego cylindra) po zakończeniu gładzenia; 1 – gładzony cylinder, 2 – głowica gładząca, 3 – oselka ścierna, 4 – dysza chłodząca



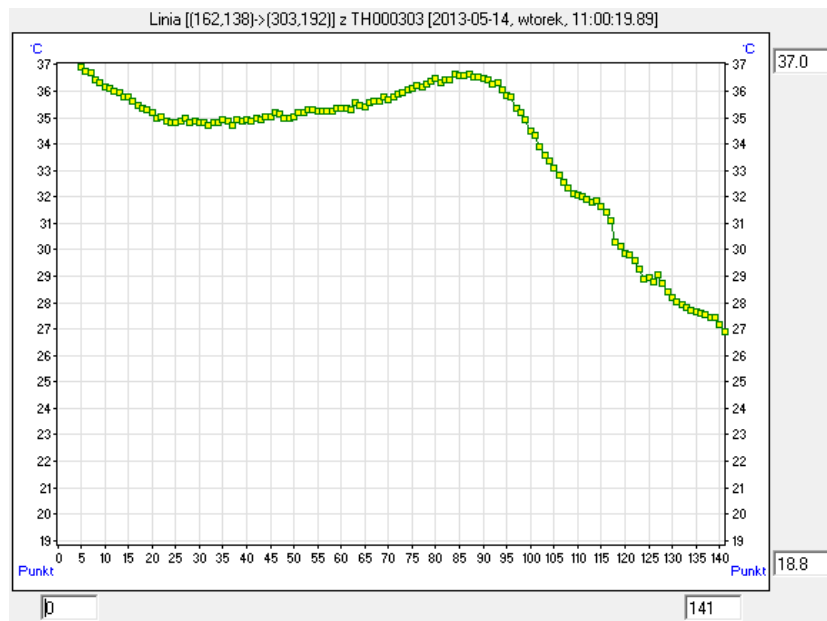
Rys. 93. Przykładowy termogram oselki H70 NM57XM84, po zakończonym etapie gładzenia ($T = 37,5^{\circ}\text{C}$); cyfra 1 wskazuje głowicę gładzącą, cyfra 2 wskazuje oselkę ścierną

Na rysunku rys. 94 pokazano termogram gładzonego otworu, który wykonano po 180 sekundach gładzenia. Cyfra 1 wskazuje linię, według której na rys. 95 stworzono wykres zmiany temperatury.



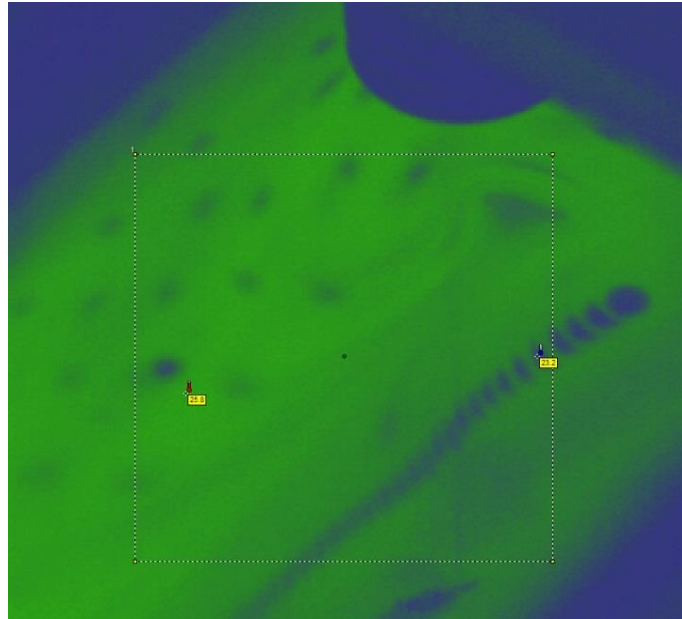
Rys. 94. Termogram cylindra po gładzeniu z zaznaczoną linią, gdzie wyznaczono charakterystykę temperaturową (rys. 95);

Na rys. 95 zaprezentowano wykres zmian temperatury wzdłuż linii oznaczonej cyfrą 1 na rys. 94



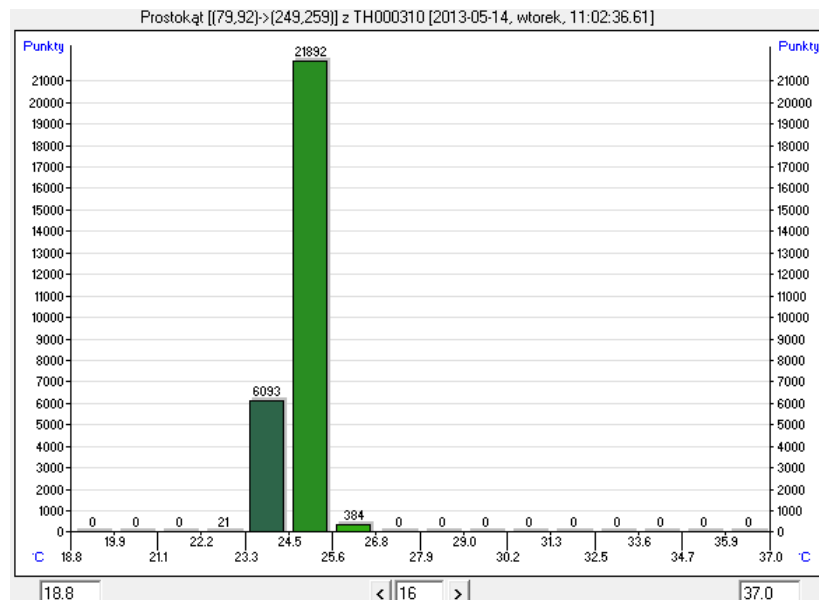
Rys. 95. Wykres zmian temperatury wzdłuż linii oznaczonej cyfrą 1 na rys. 94

Na rysunku rys. 96 pokazano przykładowy termogram oleju w zbiorniku, który także obrazował przyrost temperatury w układzie OUPN.



Rys. 96. Temperatura oleju w wannie ($T_{ol} = 25,8^{\circ}\text{C}$)

Histogram zarejestrowanych temperatur z rys. 96 pokazano na rys. 97. Rysunki 96 i 97 obrazują przyrost temperatury oleju w układzie chłodzącym na skutek przyrostu temperatury przedmiotów gładzonych.

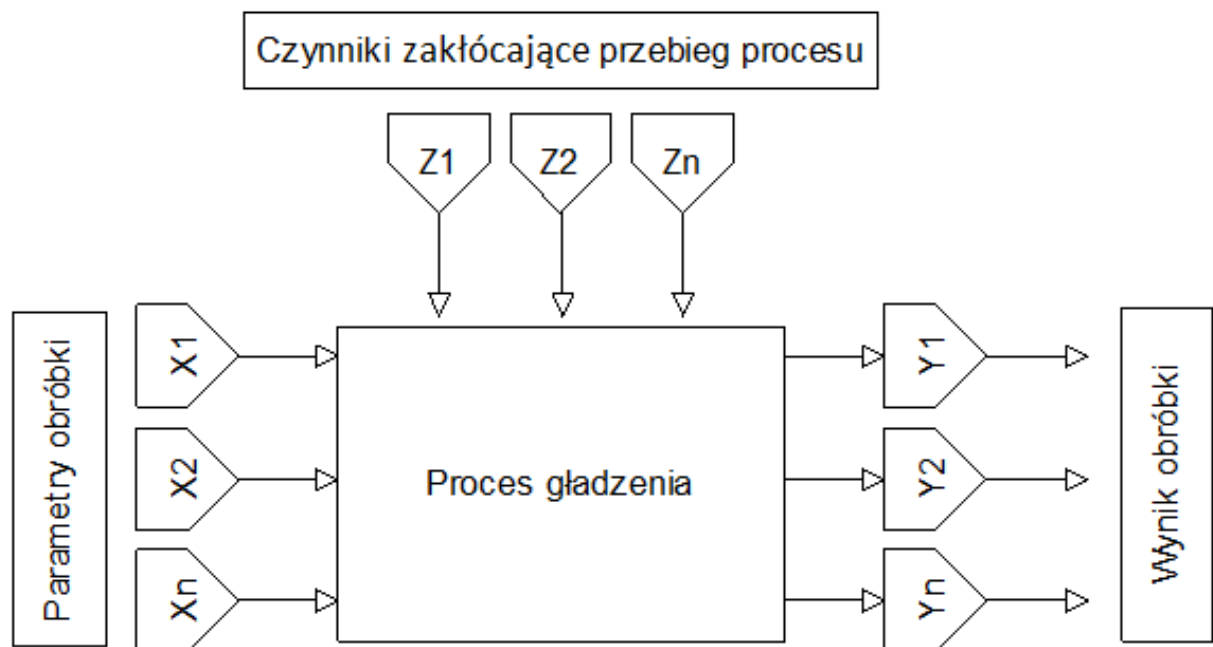


Rys. 97. Histogram temperatury oleju w wannie (rys. 96)

4. BADANIA GŁADZENIA OTWORÓW WALCOWYCH

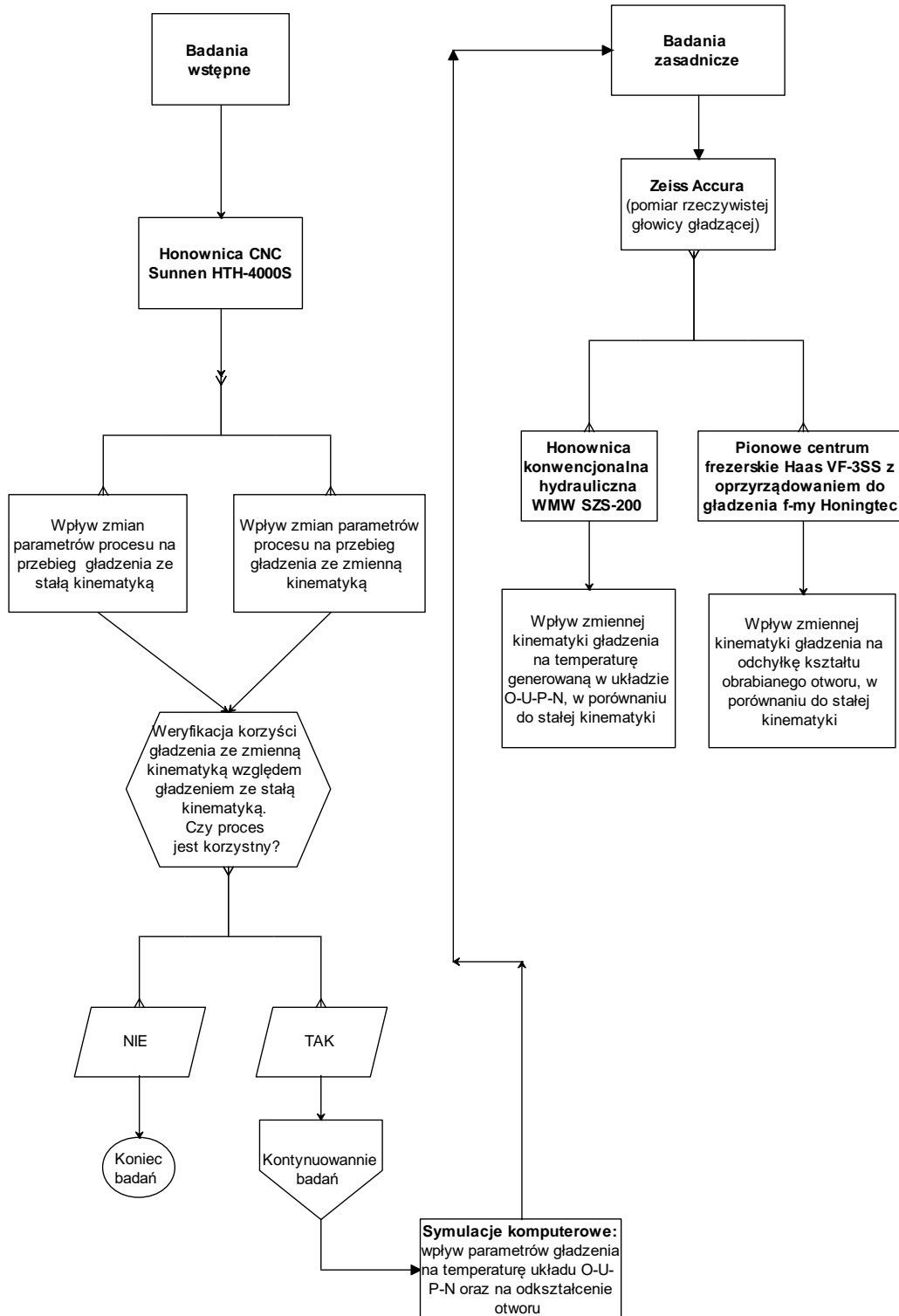
Przebieg gładzenia oraz wynik przeprowadzonej obróbki jest uzależniony od wartości zadanych parametrów procesu, oraz od wartości czynników zakłócających. Na rys. 98 pokazano strukturę procesu gładzenia w postaci schematu blokowego.

Wynik obróbki, a więc odchyłka kształtu gładzonego otworu i chropowatość powierzchni są uzależnione od znanych i zastosowanych parametrów procesu m.in. od rodzaju narzędzia, czasu obróbki, wielkości docisku, prędkości gładzenia oraz od parametrów niesterowalnych zaburzających przebieg procesu, jak np. temperatura otoczenia.



Rys. 98. Schemat funkcjonalny procesu technologicznego; X1, X2, Xn – czynniki wejściowe, Z1, Z2, Z3 – zakłócenia, Y1, Y2, Yn - czynniki wyjściowe

Badania eksperymentalne gładzenia przeprowadzono wg schematu pokazanego na rys. 99.



Rys. 99. Schemat badań eksperymentalnych

4.1. Modele planów eksperymentów użyte w badaniach wstępnych

Badania własne gładzenia podzielono na badania wstępne i zasadnicze. Celem badań wstępnych była analiza wpływu poszczególnych parametrów procesu na wynik gładzenia, stworzenie modeli matematycznych ubytku materiału oraz wzrostu temperatury w układzie OUPN w trakcie obróbki. Celem badań wstępnych było również zweryfikowanie wpływu zmiennej kinematyki gładzenia na wielkość przyrostu temperatury, w celu weryfikacji zasadności prowadzenia dalszych badań.

Badania eksperymentalne przeprowadzono wg planów trójpoziomowych dla dwóch czynników wejściowych (wg planu eksperymentów PS/DK 3²) a także dla trzech czynników wejściowych (wg planu eksperymentów PS/DK 3³). Metody obliczeniowe zaczerpnięto z literatury [101].

4.1.1. Plan badawczy dla 3 czynników, trójpoziomowy PS/DK 3³

Plany trójpoziomowe ze skutkami interakcji, w których czynniki wejściowe przyjmują wartości na trzech poziomach zmienności PS/DK 3³ [101] i umożliwiają uzyskanie modelu matematycznego badanego procesu w postaci wielomianu drugiego stopnia:

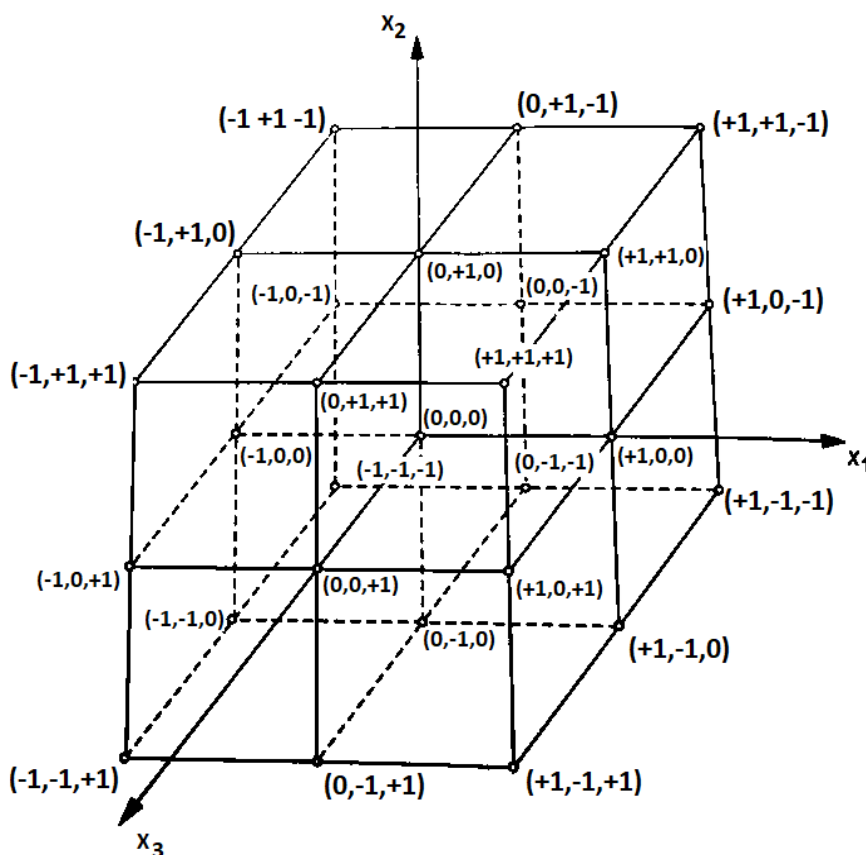
$$y = b_0 + \sum b_k x_k + \sum b_{kk} x_k^2 + \sum b_{kj} x_k x_j \quad (4.1)$$

Dla 3 czynników wejściowych, dla planu PS/DK 3³ ze skutkami interakcji, wzór (4.1) przyjmuje postać:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (4.2)$$

Zasadnicze badania eksperymentalne prowadzono wg planów PS/DK 3³, w których wybrane parametry procesu: prędkość obrotowa głowicy, posuw głowicy i wielkość ziarna ściernego w oselce, przyjmowały wartości na trzech poziomach.

Graficzną interpretację planu badawczego eksperymentalnego PS/DK 3^3 pokazano na rys. 100.



Rys. 100. Graficzna interpretacja planu trzypoziomowego eksperymentu PS/DK 3^3 [101]

Wartość k -tego współczynnika równania regresji b_k wyznaczono jako:

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ki} \bar{y}_i \quad (4.3)$$

gdzie:

x_{ki} - poziom zmienności k -tego czynnika wejściowego w i -tym doświadczeniu („+1” lub „-1”) odczytany z odpowiedniej kolumny matrycy planowania (tab. 4 i 5),

\bar{y}_{ki} - średnia wartość czynnika wynikowego z pomiarów równoległych w i -tym doświadczeniu,

N - całkowita liczba doświadczeń wg matrycy planowania

oraz:

$$b_k = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^N x_{ki} \bar{y}_i \quad (4.4)$$

$$b_0 = \frac{1}{27} (4y_1 + y_2 - 2y_3 + y_4 + 4y_5 + y_6 - 2y_7 + y_8 - 2y_9 + y_{10} + 4y_{11} + y_{12} + 4y_{13} + 7y_{14} + 4y_{15} + y_{16} + 4y_{17} + y_{18} - 2y_{19} + y_{20} - 2y_{21} + y_{22} + 4y_{23} + y_{24} - 2y_{25} + y_{26} - 2y_{27}) \quad (4.5)$$

$$b_1 = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{27} x_{1i} \bar{y}_i \quad (4.6)$$

$$b_1 = \frac{1}{18} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9 - y_{19} - y_{20} - y_{21} - y_{22} - y_{23} - y_{24} - y_{25} - y_{26} - y_{27}) \quad (4.7)$$

$$b_2 = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{27} x_{2i} \bar{y}_i \quad (4.8)$$

$$b_2 = \frac{1}{18} (y_1 + y_2 + y_3 - y_7 - y_8 - y_9 + y_{10} + y_{11} + y_{12} - y_{16} - y_{17} - y_{18} + y_{19} + y_{20} + y_{21} - y_{25} - y_{26} - y_{27}) \quad (4.9)$$

$$b_3 = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{27} x_{3i} \bar{y}_i \quad (4.10)$$

$$b_3 = \frac{1}{18} (y_1 - y_3 + y_4 - y_6 + y_7 - y_9 + y_{10} - y_{12} + y_{13} - y_{15} + y_{16} - y_{18} + y_{19} - y_{21} + y_{22} - y_{24} + y_{25} - y_{27}) \quad (4.11)$$

$$b_{11} = \frac{1}{18} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9 - 2y_{10} - 2y_{11} - 2y_{12} - 2y_{13} - 2y_{14} - 2y_{15} - 2y_{16} - 2y_{17} - 2y_{18} + y_{19} + y_{20} + y_{21} + y_{22} + y_{23} + y_{24} + y_{25} + y_{26} + y_{27}) \quad (4.12)$$

$$b_{22} = \frac{1}{18} (y_1 + y_2 + y_3 - 2y_4 - 2y_5 - 2y_6 + y_7 + y_8 + y_9 + y_{10} + y_{11} + y_{12} - 2y_{13} - 2y_{14} + 2y_{15} + y_{16} + y_{17} + y_{18} + y_{19} + y_{20} + y_{21} - 2y_{22} - 2y_{23} - 2y_{24} + y_{25} + y_{26} + y_{27}) \quad (4.13)$$





$$b_{33} = \frac{1}{18}(y_1 - 2y_2 + y_3 + y_4 - 2y_5 + y_6 + y_7 - 2y_8 + y_9 + y_{10} - 2y_{11} + y_{12} + y_{13} - 2y_{14} + y_{15} + y_{16} - 2y_{17} + y_{18} + y_{19} - 2y_{20} + y_{21} + y_{22} - 2y_{23} + y_{24} + y_{25} - 2y_{26} + y_{27}) \quad (4.14)$$

$$b_{12} = \frac{1}{12}(y_1 + y_2 + y_3 - y_7 - y_8 - y_9 - y_{19} - y_{20} - y_{21} + y_{25} + y_{26} + y_{27}) \quad (4.15)$$

$$b_{13} = \frac{1}{12}(y_1 - y_3 + y_4 - y_6 + y_7 - y_9 - y_{19} + y_{21} - y_{22} + y_{24} - y_{25} + y_{27}) \quad (4.16)$$

$$b_{23} = \frac{1}{12}(y_1 - y_3 - y_7 + y_9 + y_{10} - y_{12} - y_{16} + y_{18} + y_{19} - y_{21} - y_{25} + y_{27}) \quad (4.17)$$

W planach trójpoziomowych czynniki wejściowe b_k występują na trzech poziomach:

- wyższym, oznaczanym: +1,
- średnim, oznaczanym: 0,
- niższym, oznaczanym: -1,

Metodyka planów trójpoziomowych wymaga kodowania czynników wejściowych wg wzoru:

$$x_k = \frac{\hat{x}_k - \hat{x}_{k0}}{\Delta\hat{x}_k} \quad (4.18)$$

gdzie:

x_k - zakodowana wartość k - tego czynnika wejściowego,

\hat{x}_k - wartość (maksymalna lub minimalna) k -tego czynnika wejściowego na poziomie górnym lub dolnym,

\hat{x}_{k0} - wartość k - tego czynnika obliczona jako:

$$\hat{x}_{k0} = \frac{\hat{x}_{k\max} + \hat{x}_{k\min}}{2} \quad (4.19)$$

gdzie:

$\Delta\hat{x}_k$ - jednostka zmienności k - tego czynnika:

$$\Delta\hat{x}_k = \frac{\hat{x}_{k\max} - \hat{x}_{k\min}}{2} \quad (4.20)$$



Po wykonaniu obliczeń procedura odkodowania polega na podstawieniu do wzoru:

$$y = b_0 + b_1 \left(\frac{\hat{x}_1 - \hat{x}_{10}}{\Delta \hat{x}_1} \right) + \dots + b_k \left(\frac{\hat{x}_k - \hat{x}_{k0}}{\Delta \hat{x}_k} \right) \quad (4.21)$$

Zastosowanie planu badawczego PS/DK 3^3 wymaga przeprowadzenia 27 eksperymentów (tab. 4).

Tab. 4. Matryca planu trzypoziomowego PS/DK 3^3 , dla trzech czynników wejściowych (x_1 – prędkość obrotowa głowicy, x_2 - wartość posuwu liniowego, x_3 – wielkość ziarna)

PARAMETRY WEJŚCIOWE										
Lp.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	0	+	+	0	+	0	0
3	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-
4	+	+	0	+	+	0	+	0	+	0
5	+	+	0	0	+	0	0	0	0	0
6	+	+	0	-	+	0	+	0	-	0
7	+	+	-	+	+	+	+	-	+	-
8	+	+	-	0	+	+	0	-	0	0
9	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+
10	+	0	+	+	0	+	+	0	0	+
11	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0
12	+	0	+	-	0	+	+	0	0	-
13	+	0	0	+	0	0	+	0	0	0
14	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	+	0	0	-	0	0	+	0	0	0
16	+	0	-	+	0	+	+	0	0	-
17	+	0	-	0	0	+	0	0	0	0
18	+	0	-	-	0	+	+	0	0	+
19	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+
20	+	-	+	0	+	+	0	-	0	0
21	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-
22	+	-	0	+	+	0	+	0	-	0
23	+	-	0	0	+	0	0	0	0	0
24	+	-	0	-	+	0	+	0	+	0
25	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-
26	+	-	-	0	+	+	0	+	0	0
27	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+

Sprawdzenie powtarzalności warunków wykonywania doświadczeń:

Ocena powtarzalności warunków wykonywania doświadczeń wymaga porównania wariancji wyników pomiarów.

Wygodnym kryterium oceny powtarzalności warunków wykonywania doświadczeń jest kryterium Cochra. Należy wyznaczyć wartości empiryczne współczynnika G dla weryfikacji hipotezy o powtarzalności wariancji:

$$G = \frac{S^2(y)_{i_{\max}}}{\sum_{i=1}^N S^2(y)_i} \quad (4.22)$$

Otrzymaną wartość G , przy przyjętym poziomie istotności α i w zależności od ilości stopni swobody f_1 (57) i f_2 (58), porównuje się z wartością krytyczną.

Liczba stopni swobody to:

$$f_1 = N \quad (4.23)$$

$$f_2 = r - 1 \quad (4.24)$$

gdzie:

N – liczba wszystkich pomiarów,

r – liczba pomiarów równoległych (powtarzalność doświadczeń).

Oceny stabilności warunków wykonywania doświadczeń dokonuje się poprzez porównanie otrzymanej wartości G z wartością krytyczną G_{kr} .

$$G_{kr} = G_{(\alpha; f_1; f_2)} \quad (4.25)$$

Jeżeli $G < G_{kr}$ powtarzalność można uznać za odpowiednią.

Ocena istotności współczynników regresji:

Oceny istotności współczynników równania regresji dokonuje się stosując test t-Studenta. Wartość testową współczynnika t_k oblicza się ze wzoru:

$$t_k = \frac{|b_k|}{\sqrt{\frac{S^2(y)}{Nr}}} \quad (4.26)$$

Wartość wariancji wchodzącą do wzoru (4.26) oblicza się jako:

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2(y)_i \quad (4.27)$$

$$S^2(y)_i = \frac{\sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{r-1} \quad (4.28)$$

gdzie:

y_{ui} - wynik u - tego powtórzenia w i - tym doświadczeniu,

\bar{y}_i - wartość średnia wyników pomiarów równoległych w i - tym doświadczeniu,

N - całkowita liczba doświadczeń w planie (bez pomiarów równoległych),

r - liczba pomiarów równoległych (powtarzalność doświadczeń).

Liczba stopni swobody to:

$$f = N (r - 1) \quad (4.29)$$

zaś wartość tablicowa współczynnika t-Studenta:

$$t_{kr} = t_{(\alpha, f)} \quad (4.30)$$

Jeżeli $t_k < t_{kr} = f_{(\alpha, f)}$ to k -ty współczynnik równania regresji uznaje się za nieistotny i odrzuca się ten wyraz z równania (4.2).

Czasem wygodniej jest określić krytyczną wartość współczynnika bkr jako:

$$b_{kr} = t_{kr} \sqrt{\frac{S^2(y)}{Nr}} \quad (4.31)$$

i porównać ją z wartością każdego ze współczynników regresji w badanym modelu.





Współczynniki równania o wartości bezwzględnej mniejszej niż b_{kr} uznaje się za niewpływające w sposób istotny na przebieg procesu i odrzuca się. W ten sposób można określić istotność współczynników przy założonym poziomie istotności α .

W niektórych przypadkach może zdarzyć się, że współczynnik może nie być statystycznie istotny dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, aczkolwiek może być istotny dla poziomu $\alpha = 0,07$, co umożliwi wóczas na uszeregowanie czynników wejściowych według siły ich wpływu.

Ocena adekwatności równania regresji:

W celu określenia adekwatności równania regresji korzysta się się z testu Fishera, obliczając wartość współczynnika F z nst. wzoru:

$$F = \frac{S_{ad}^2(y)}{S^2(y)} \quad (4.32)$$

gdzie: $S^2(y)$ - wariancja błędów pomiaru obliczana ze wzoru (4.27)

Wariancję adekwatności dla równania regresji wyznacza się ze jako:

$$S_{ad}^2(y) = \frac{r \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N - k - 1}$$

(4.33)

gdzie:

\bar{y}_i - wartość średnia wyników pomiarów w i -tym doświadczeniu,

\hat{y}_i - wartość obliczona z równania regresji dla poziomów czynników wejściowych i wyjściowych dla i - tego doświadczenia,

k - liczba wyrazów równania regresji (bez wyrazu wolnego) po odrzuceniu wyrazów nieistotnych,

r - liczba powtórzeń,

N - całkowita liczba doświadczeń.

Współczynnik F obliczony ze wzoru (4.32) porównano z wartością krytyczną określoną z tablic rozkładu Fishera - Snedecora przy założonym poziomie istotności α i liczbie stopni swobody f_1 i f_2 .

Liczba stopni swobody dla licznika to:

$$f_1 = f_1 = N - K - 1 \quad (4.34)$$

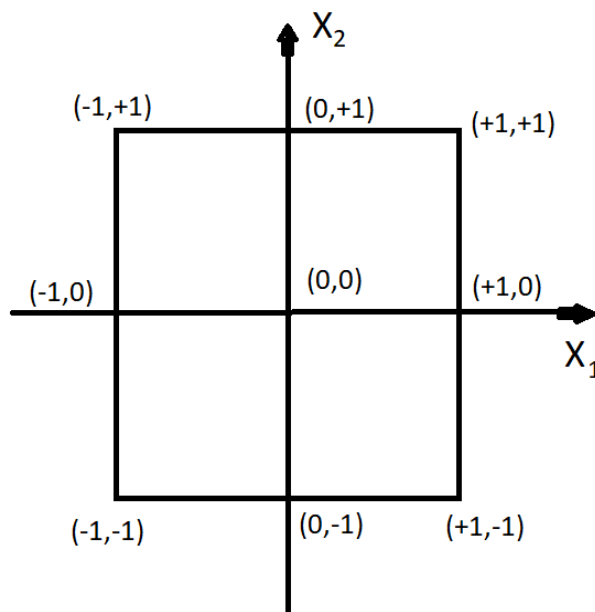
Liczba stopni swobody dla mianownika wynosi:

$$f_2 = f_m = N (r - 1) \quad (4.35)$$

Jeżeli otrzymana krytyczna wartość współczynnika $F < F_{kr} = F_{(\alpha; f_1; f_m)}$ to otrzymane równanie uważa się za adekwatne w zakresie wartości parametrów badanych.

4.1.2. Plan badawczy dla 2 czynników, trójpoziomowy PS/DK 3^2

W planie PS/DK 3^2 , dwa czynniki wejściowe przyjmują trzy poziomy wartości. Graficzną interpretację planu PS/DK 3^2 pokazano na rys. 101.



Rys. 101. Graficzna interpretacja planu trójpoziomowego eksperymentu PS/DK 3^2

Tab. 5. Matryca planu trzypoziomowego PS/DK 3², dla dwóch czynników wejściowych (x_1 – docisk osetki, x_2 – wartość posuwu głowicy)

PARAMETRY WEJŚCIOWE						
Lp.	x_0	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	x_1x_2
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	0	+	0	0
3	+	+	-	+	+	-
4	+	0	+	0	+	0
5	+	0	0	0	0	0
6	+	0	-	0	+	0
7	+	-	+	+	+	-
8	+	-	0	+	0	0
9	+	-	-	-	+	

Współczynniki równania regresji dla planu PS/DK 3² oblicza się ze wzorów:

$$b_0 = \frac{1}{9}(-y_1 + 2y_2 - y_3 + 2y_4 + 5y_5 + 2y_6 - y_7 + 2y_8 - y_9) \quad (4.36)$$

$$b_k = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n x_{ki} \bar{y}_i \quad (4.37)$$

$$b_{11} = \frac{1}{6}(y_1 + y_2 + y_3 - 2y_4 - 2y_5 - 2y_6 + y_7 + y_8 + y_9) \quad (4.38)$$

$$b_{22} = \frac{1}{6}(y_1 - 2y_2 + y_3 + y_4 - 2y_5 + y_6 + y_7 - 2y_8 + y_9) \quad (4.39)$$

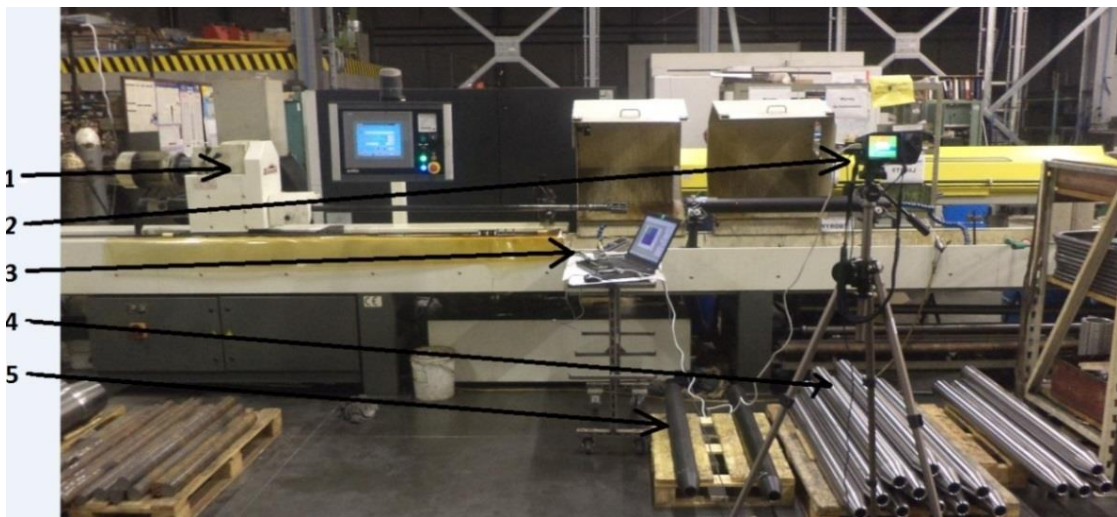
$$b_{12} = \frac{1}{4}(y_1 - y_3 - y_7 + y_9) \quad (4.40)$$

Pozostałe obliczenia wykonuje się w analogiczny sposób jak dla planu PS/DK 3³.

4.2. Badania wstępne

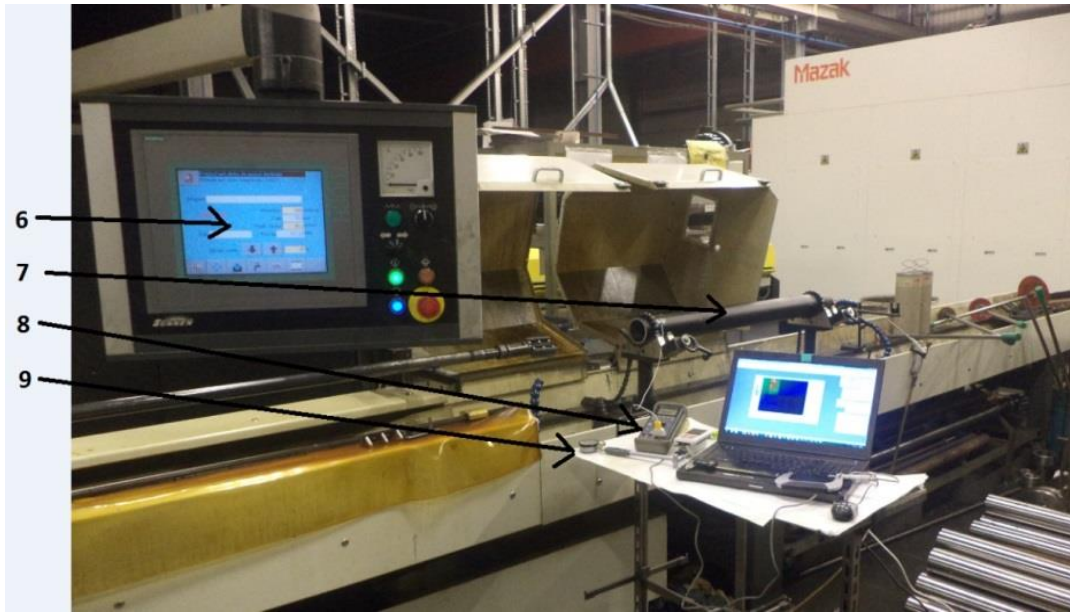
4.2.1. Gładzenie na honownicy CNC Sunnen HTH 4000S

Pierwszym zastosowanym stanowiskiem eksperymentalnym była pozioma honownica CNC, model HTH - 4000S f - my Sunnen (rys. 102). Honownica umożliwia obróbkę otworów o długości do $L = 4000$ mm, z maksymalną średnicą gładzonego otworu do 600 mm. Wrzeciono napędzane jest przez silnik o mocy 6 kW i posiada możliwość zmiany prędkości obrotowej głowicy w zakresie od 15 do 450 obr/min. Skok roboczy głowicy w kierunku osiowym może być przeprowadzany z prędkością $V_{ax} = 0,1 \div 40$ m/min, silnik realizujący ruch osiowy głowicy posiada moc 4,2 kW. Na honownicy Sunnen HTH - 4000S ciśnienie docisku osetki do powierzchni obrabianej jest zadawane w % możliwego do zadania docisku maksymalnego, producent maszyny nie dostarczył informacji umożliwiających na przeliczenie ciśnienia docisku osetki w jednostkach ciśnienia.



Rys. 102. Stanowisko badawcze: 1 - honownica HTH - 4000S CNC firmy Sunnen, 2 - kamera termowizyjna Vigocam V50, 3 - komputer z oprogramowaniem THERM 2.23.2, 4 – przedmioty gładzone nie pomalowane, 5 – przedmiot gładzony (z rys. 110) pomalowany czarną matową farbą

Stanowisko eksperymentalne wyposażono w kamerę termowizyjną Vigocam V50, komputer z oprogramowaniem Therm w wersji 2.23.2, miernik wielofunkcyjny Escort-99 z sondą temperatury oraz profilografometr MarSurf PS1 f - my Mahr (rys. 103).



Rys. 103. Stanowisko badawcze (c.d.): 6 - panel sterowania honownicy, 7 - przedmiot badany, 8 - czujnik Escort-99 z sondą temperatury, 9 – średnicówka

Na rys. 104 pokazano pomiar chropowatości powierzchni gładzonego otworu.



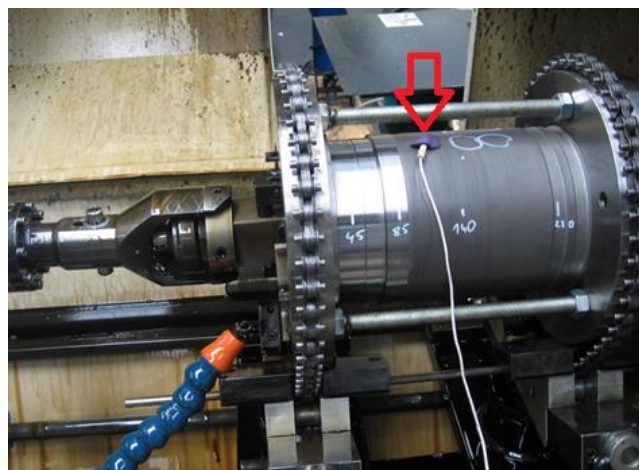
Rys. 104. Pomiar chropowatości gładzonego otworu (przedmiotu z rys. 109) z użyciem profilografometru - my Mahr

Na rys. 105 zaprezentowano miernik Escort-99 z sondą dotykową do pomiaru temperatury, służący do kalibracji kamery termowizyjnej. Na rys. 105 pokazano również przedmiot gładzony (z rys. 110), pomalowany czarną farbą matową, przygotowany do pomiarów z użyciem kamery termowizyjnej.



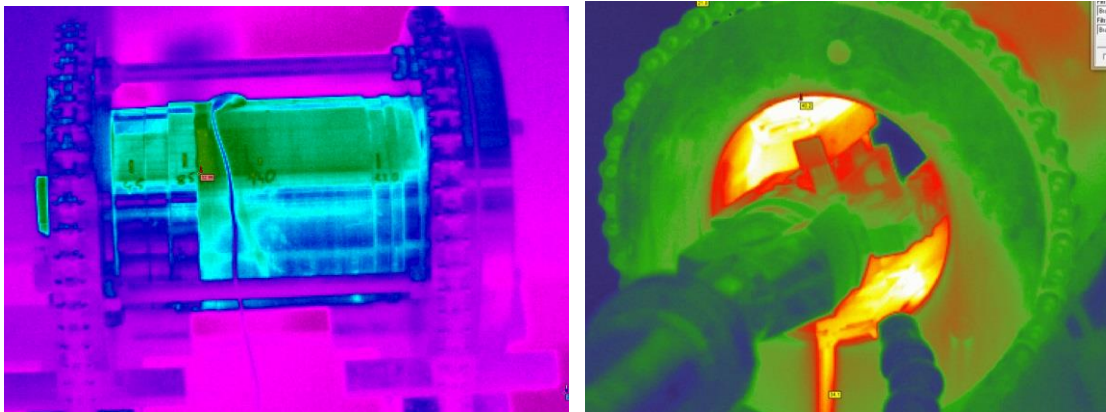
Rys. 105. Pomiar temperatury przy pomocy czujnika dotykowego (kalibracja kamery termowizyjnej)

Na rys. 106 pokazano cylinder silnika (z rys. 82), z zamontowaną sondą dotykową, służącą do kalibracji kamery termowizyjnej. Cylinder nie mógł zostać pomalowany czarną farbą matową, eliminującą refleksy świetlne. Z tego powodu część pomiarów przeprowadzano w nocy, bez światła słonecznego oraz bez sztucznego oświetlenia. Po ustawieniu parametrów procesu gładzenia wyłączano oświetlenie na hali, po wyłączeniu oświetlenia załączano pracę honownicy oraz włączano kamerę termowizyjną.



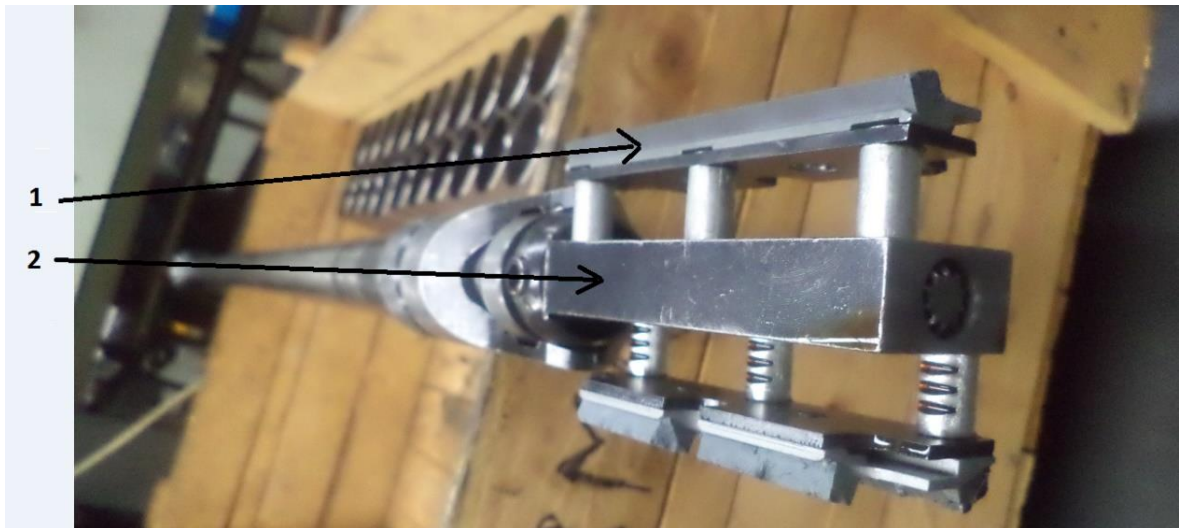
Rys. 106. Stanowisko badawcze: cienkościenna tuleja silnika spalinowego zamocowana na honownicy HTH 4000S. Czerwona strzałka wskazuje termoparę, zamontowaną w celu kalibracji kamery termowizyjnej

Na rys. 107 pokazano przykładowe termogramy cylindra z rys. 82.



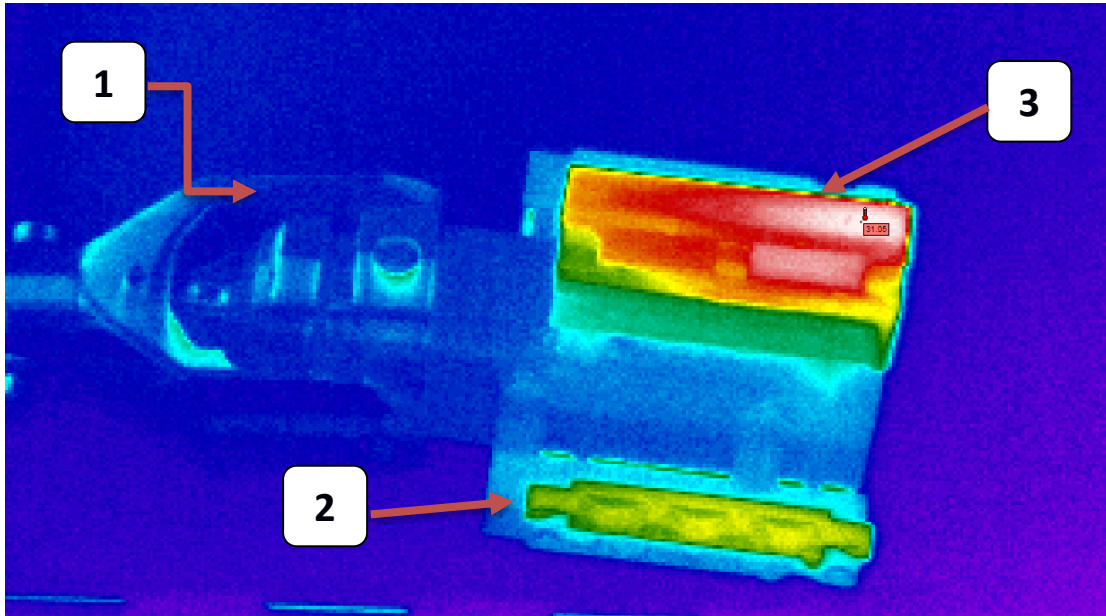
Rys. 107. Termogram cylindra z rys. 82 po uruchomieniu gładzenia otworu

Na rys. 108 przedstawiono głowicę MPS-H50, której zasada działania polega na rozsuwaniu mechanicznym ośki w celu promieniowego dosuwu do powierzchni obrabianej. Głowica MPS-H50 może być stosowana do gładzenia otworów o średnicy w zakresie $50 \div 76$ mm, zaś po zastosowaniu podstawy ośek H70 z dłuższymi trzpieniami zębatymi zakres gładzonych średnic można zwiększyć. Wysuwanie ośek następuje poprzez wałek wielowypustowy, który zazębiając się z trzpieniem podstawy ośki powoduje jej ruch w kierunku promieniowym.



Rys. 108. Fragment stanowiska badawczego: 1 - ośka, 2 – głowica MPS-H50

Na rys. 109 zaprezentowano obraz z kamery termowizyjnej, charakteryzujący głowicę po zakończonej obróbce. Najwyższą temperaturę po zakończonej obróbce posiada ośleka ścierna.

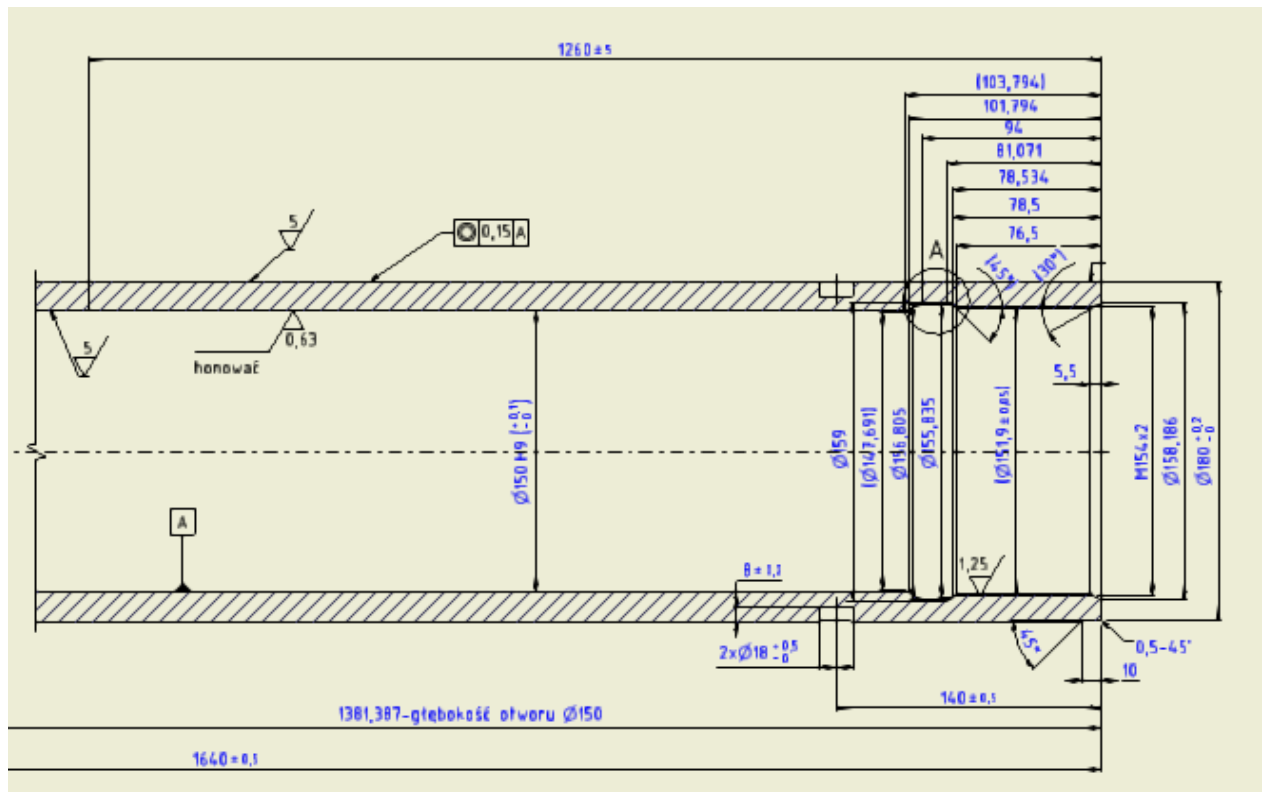


Rys. 109. Termogram po przeprowadzonej operacji gładzenia otworu, poz. 1 – głowica gładząca, poz. 2 – ślizg (usztynwiający i prowadzący głowicę po obrabianym otworze), poz. 3 - ośleka

Na rys. 110 zamieszczono przedmiot z gładzonym otworem o średnicy 150 H9 mm, z wymaganą długością gładzenia $L = 1260$ mm. Przedmiot pokazany na rys. 110 to cylinder pneumatycznej maszyny przeciskowej (potoczna nazwa „kret”), służącej do przeprowadzania rur instalacyjnych o różnych średnicach pod drogą asfaltową, pod torowiskiem kolejowym itp., bez konieczności wykonywania przekopu.

Seryjna produkcja maszyn przeciskowych, z cylindrami o różnych średnicach gładzonych otworów, charakteryzuje się koniecznością jak najszybszego usuwania nadmiaru materiału przeznaczanego do obróbki oraz wymogiem poprawy kształtu otworu powstałego wskutek obróbki poprzedzającej, czyli po głębokim wierceniu oraz po wytaczaniu za pomocą długich wytaczadeł z korpusem stalowym, z systemem tłumienia drgań.

Od dokładności wykonania otworu cylindra (pokazanego na rys. 110) zależy m.in. jakość wykonywania przecisków, czyli precyzyjne trafianie (wyjście) maszyny pneumatycznej, w zaplanowane miejsce po drugiej stronie wykonywanego przecisku.

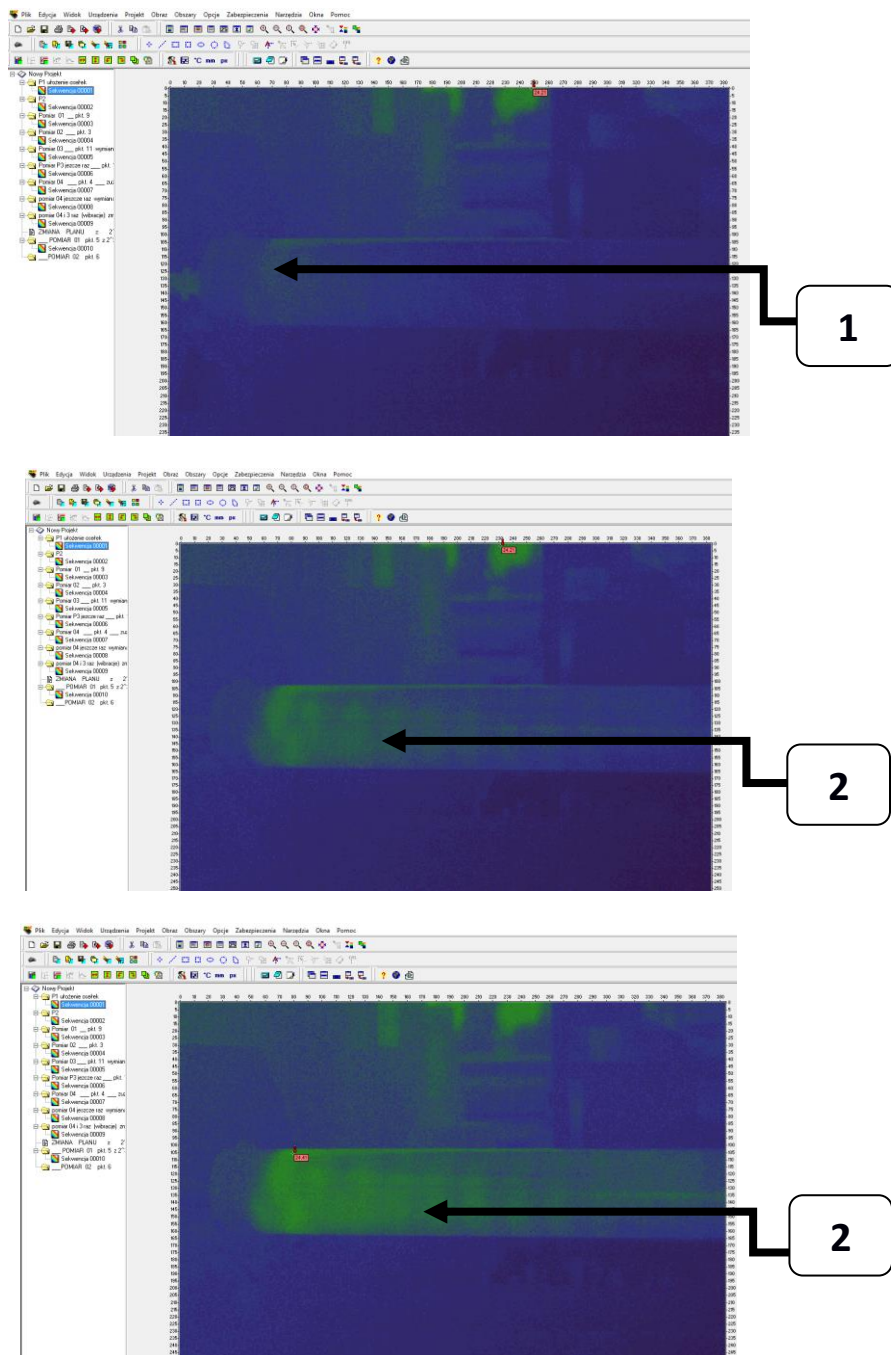


Rys. 110. Otwór gładzony cylindra maszyny przeciskowej o średnicy 150 H9 mm i długości 1260 mm

Przy produkcji cylindrów, pokazanych na rys. 110, gładzenie nie jest używane w celu uzyskania odpowiedniej tekstury powierzchni obrabianej, posiadającej sieć mikrokanalów zapewniających dystrybucję oleju smarowego, ponieważ podczas pracy maszyny przeciskowej powierzchnia zostanie porysowana między innymi drobinami kwarcu itd., który dostaje się do maszyny w trakcie jej pracy.

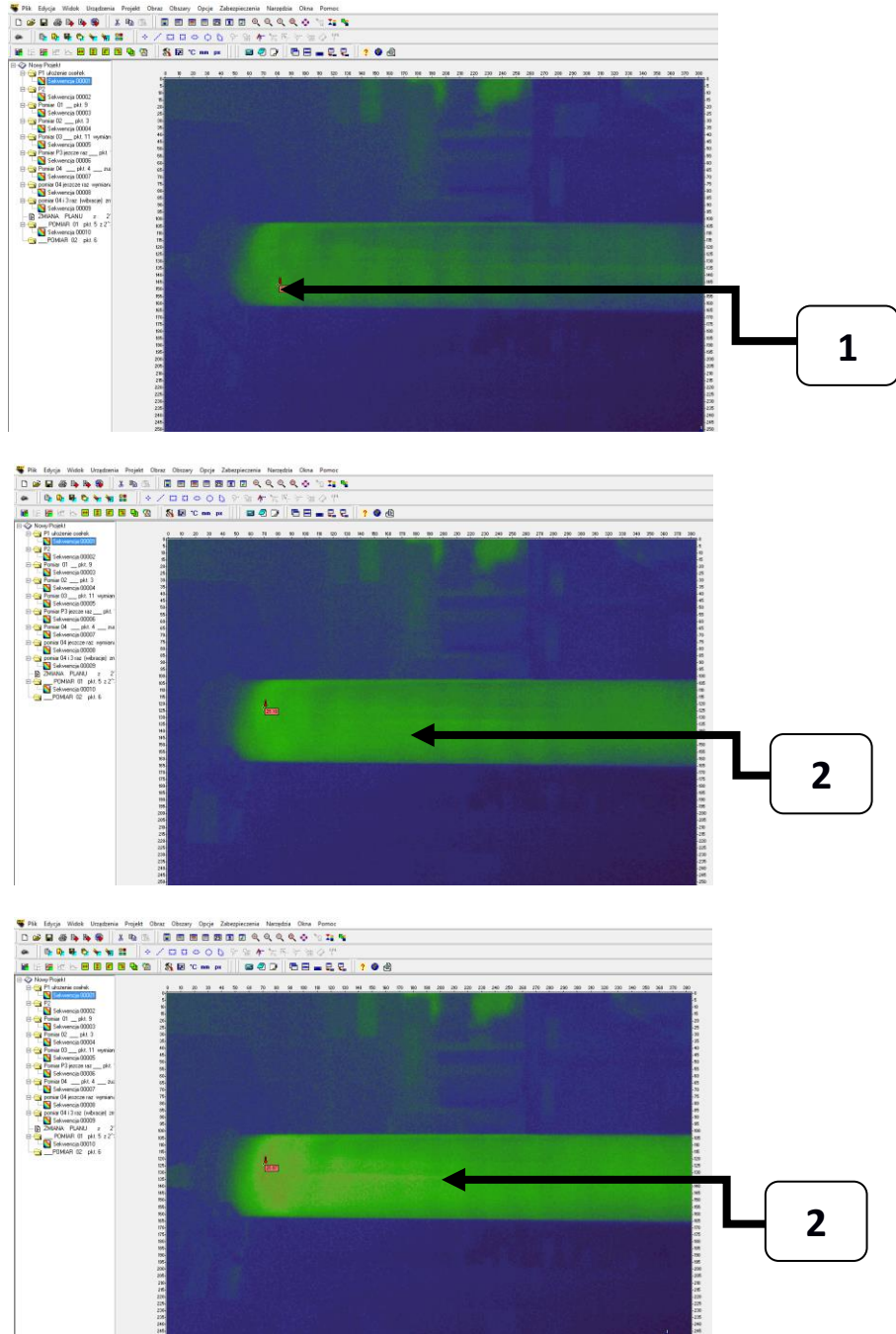
Gładzenie, podczas produkcji cylindrów z rys. 110 stosowane jest w celu zmniejszenia odchyłki walcowości z poprzedniego procesu technologicznego, którym jest wytaczanie, przeprowadzane za pomocą długich wytaczadeł z tłumieniem drgań, na tokarce Mazak CyberTech Turn 4500M.

Na rysunkach 111 ÷ 113 zobrazowano stopniowy wzrost temperatury podczas gładzenia przedmiotu z rys. 110. Na rys. 111 zauważyć można spiralę ciepła, która przemieszczając się powoduje stopniowe nagrzewanie się całego przedmiotu w trakcie obróbki.



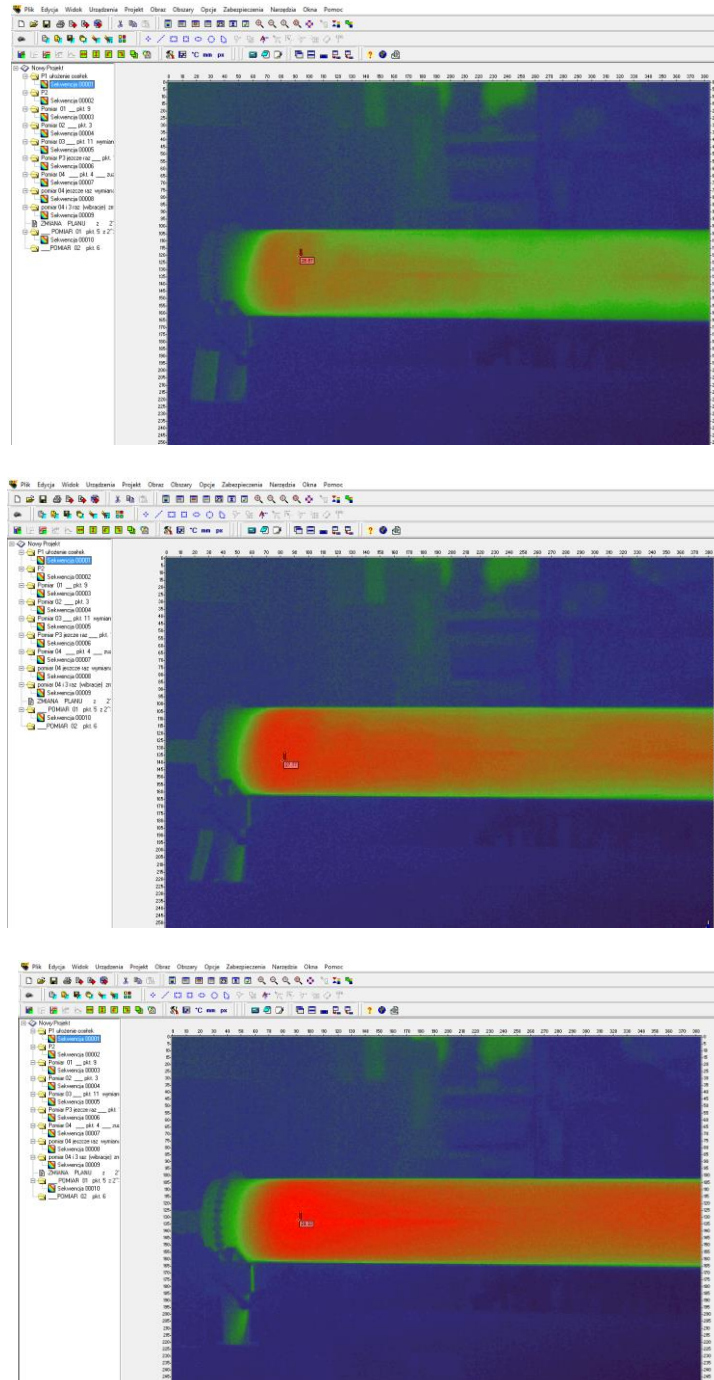
Rys. 111. Obrazy z kamery termowizyjnej prezentujące kolejną sekwencję nagrzewania się cylindra z rys. 110. Cyfra 1 wskazuje na pierwszy zauważalny fragment spirali ciepła, który stopniowo przesuwa się po całej długości cylindra, cyfra 2 wskazuje zaobserwowaną spiralę ciepła

Spirala ciepła zauważalna jest tylko wówczas, kiedy przedmiot gładzony zostanie pomalowany czarną farbą matową, która eliminuje odbijanie promieni słonecznych zakłócających pomiar przeprowadzany za pomocą kamery termowizyjnej.



Rys. 112. Obrazy z kamery termowizyjnej prezentujące kolejną sekwencję nagrzewania się cylindra z rys. 110. Cyfra 1 wskazuje na miejsce występowania największej temperatury, które pokrywa się z miejscem pojawienia się spirali ciepła, co sugeruje, że honownica rozpoczyna wysuw osełek w tym miejscu. Cyfra 2 wskazuje zaobserwowaną spiralę ciepła

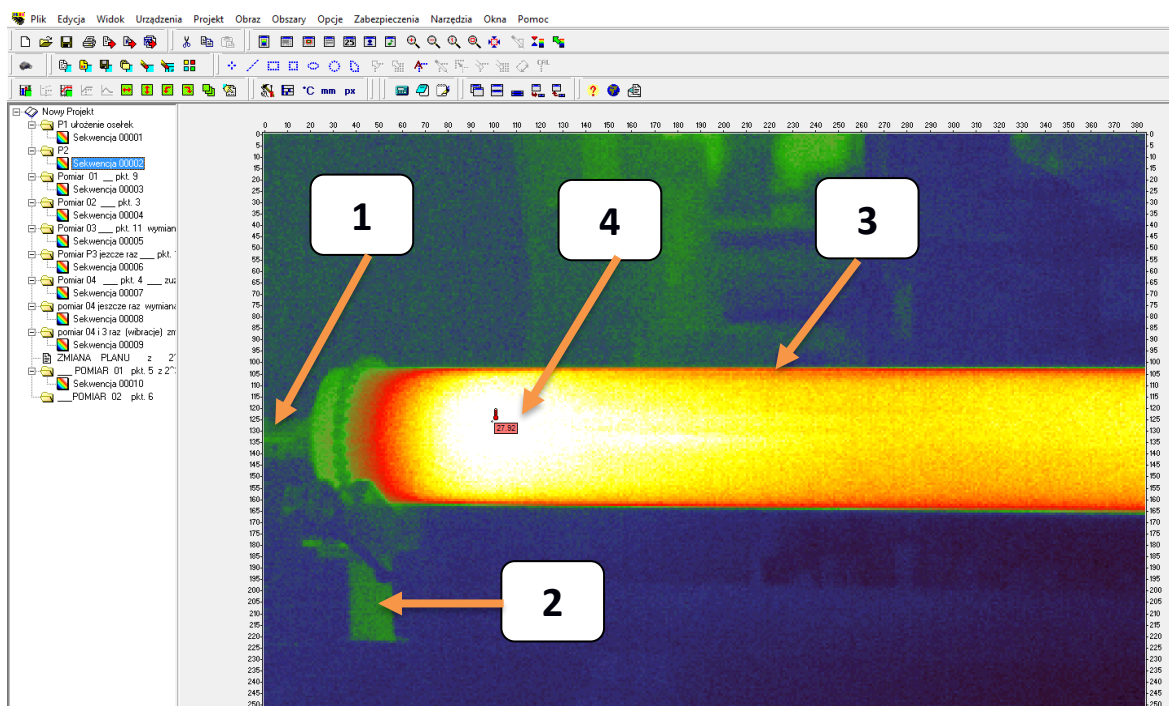
Pierwsza sekwencja z rys. 111 obrazuje temperaturę układu *OUPN* równą temperaturze otoczenia. Widoczne niejednorodności koloru tła, na rys. 111 ÷ 114, spowodowane są refleksami świetlnymi przedmiotów (wyposażenia hali produkcyjnej), których nie można było pomalować czarną farbą matową.



Rys. 113. Obrazy z kamery termowizyjnej prezentujące kolejną sekwencję nagrzewania się cylindrów z rys. 110

Na rys. 114 pokazano ostatnią sekwencję z filmu, nagranych za pomocą kamery termowizyjnej, prezentującego przyrost temperatury ΔT przedmiotu obrabianego.

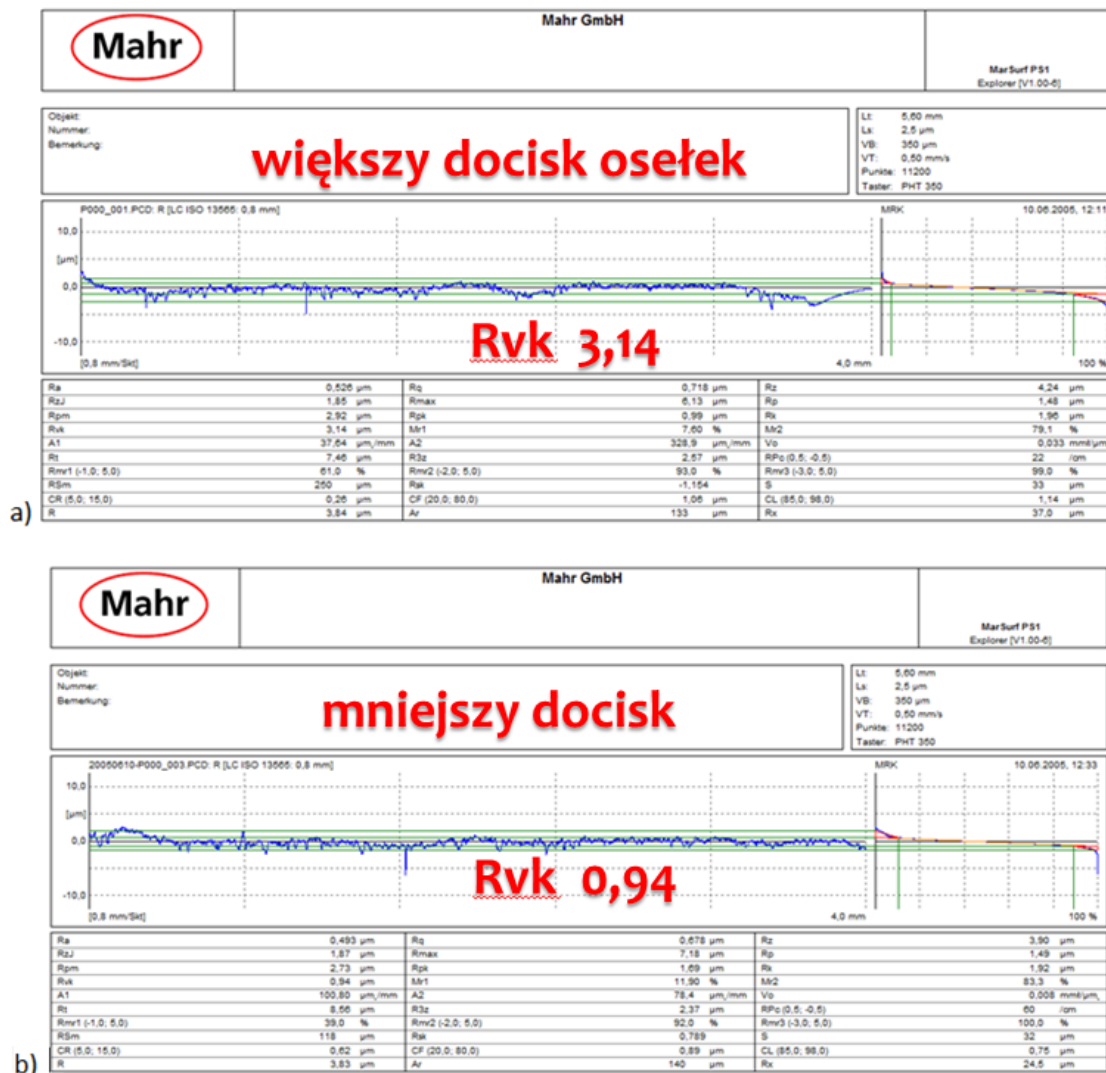
Począwszy od pierwszej sekwencji z rys. 111, charakteryzującej się największą ilością koloru ciemno granatowego, obrazującego temperaturę $T = 20^{\circ}\text{C}$, a kończąc na rys. 114, na którym zauważalny jest biały kolor charakteryzujący przekroczenie maksymalnej temperatury w danym zakresie pomiarowym zobrazowano, że przyrost temperatury o więcej niż $\Delta T = 60^{\circ}\text{C}$ jest zjawiskiem występującym podczas gładzenia.



Rys. 114. Obrazy z kamery termowizyjnej charakteryzujący ostatnią sekwencję nagrzewania się cylindrów z rys. 110; poz. 1 – trzpień z głowicą gładzącą, poz. 2 – podpora uchwytu mocującego przedmiot do obróbki, poz. 3 – przedmiot gładzony (z rys. 110), poz. 4 – miejsce występowania najwyższej zmierzonej temperatury

Na rysunkach 111 ÷ 114 miejsce występowania największej temperatury pokrywa się z miejscem pojawienia się spirali ciepła (cyfra 1 na rys. 111) co sugeruje, że honownica rozpoczyna wysuw osełek w tym miejscu.

Na rys. 115 pokazano przykładowe raporty pomiarowe parametrów profilu chropowatości, wykonane w celu weryfikacji wpływu wielkości docisku osetki do powierzchni obrabianej na uzyskiwaną powierzchnię po gładzeniu. Większy docisk osetki do powierzchni gładzonej powoduje między innymi większą głębokość kanałów olejowych (parametr profilu chropowatości R_{vk}).



Rys. 115. Profil chropowatości powierzchni gładzonej:

- a) nacisk osetek 30%, prędkość liniowa osiowa 18 m/min (R_{vk} 3,14 , R_{pk} 0,99 , R_k 1,96 Mr_1 7,6%, Mr_2 79,1%),
 b) nacisk 10%, prędkość liniowa osiowa 18 m/min (R_{vk} 0,94 , R_{pk} 1,69 , Mr_1 11,9%, Mr_2 83,3%)
 (producent maszyny nie dostarczył informacji umożliwiających na przeliczenie ciśnienia docisku osetki w jednostkach ciśnienia)

Badania gładzenia na Honownicy HTH 4000S prowadzono wg planu PS/DK 3², w którym 2 czynniki przyjmują 3 poziomy zmienności. Tabela 6 obrazuje parametry wejściowe wstępnych badań gładzenia.

Tab. 6. Czynniki wejściowe wstępnych badań gładzenia (X_1 - docisk – [„%” możliwego obciążenia], X_2 - prędkość liniowa osiowa [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]	

Tabela 7 przedstawia wyniki badań wydajności gładzenia przeprowadzonego na poziomej honownicy CNC HTH - 4000S.

Tab. 7. 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	0,00955833	0,20966
3	30	15	0,19	0,21	0,1	0,167	0,00343333	0,20966
4	20	35	0,11	0,15	0,06	0,107	0,00203333	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	0,00043333	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	0,00013333	0,05466

Równanie regresji ubytku materiału, po odrzuceniu członów nieistotnych oraz po odkodowaniu czynników wejściowych i dla przyjętego zakresu X_1 , przyjmuje postać:

$$y_2 = 0,000485X_1^2 - 0,01165X_1 + 0,12266 \quad (4.41)$$

gdzie: X_1 - wartość docisku osłki do powierzchni gładzonej w % mocy wrzeciona (taką jednostkę docisku osłki do powierzchni gładzonej w swoich obrabiarkach zastosował producent)

Równanie (4.41) jest adekwatne na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Tabela 8 przedstawia wyniki badań przyrostu temperatury w trakcie gładzenia.

Tab. 8. Wyniki badań przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego

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

Równanie regresji dla przyrostu temperatury (4.42) powstającej w gładzeniu (dla danych wejściowych wg tab. 6), po odrzuceniu członów nieistotnych oraz po rozkodowaniu czynników wejściowych i dla przyjętego zakresu X_1 przyjmuje postać:

$$y_2 = -0,039X_1^2 + 2,19833X_1 - 9,65 \quad (4.42)$$

gdzie: X_1 - wartość nacisku ośki do powierzchni gładzonej w % mocy wrzeciona (taką jednostkę docisku ośki do powierzchni gładzonej w swoich obrabiarkach zastosował producent)

Równanie (4.42) jest adekwatne na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Równania (4.41) i (4.42) wskazują, że **największy wpływ zarówno na ubytek materiału oraz na wzrost temperatury przedmiotu gładzonego ma wielkość nacisku ośki.**

4.2.1.1. Przyrost temperatury przedmiotu obrabianego dla stałej i zmiennej kinematyki gładzenia

Celem kolejnych badań wstępnych było zweryfikowanie różnicy pomiędzy gładzeniem przeprowadzonym ze stałą i ze zmienną kinematyką, ze względu na uzyskiwany przyrost temperatury ΔT w układzie OUPN.

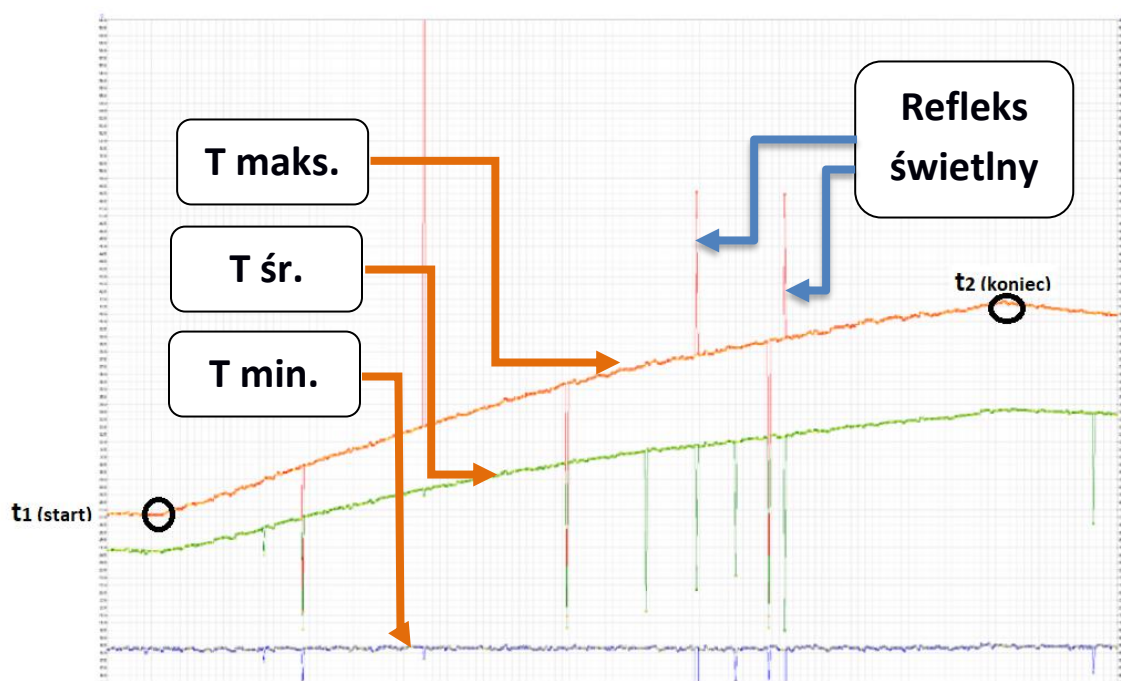
Na honownicy SUNNEN HTH - 4000S, nie posiadającej możliwości zmiany prędkości obrotowej głowicy w czasie pracy, wykonano obróbkę ze średnim przyrostem temperatury $\Delta T = 14,17^\circ\text{C}$ (rys. 116). Widoczne na rys. 116 ÷ 118 skoki temperatury, zarówno dla linii czerwonej obrazującej temperaturę najwyższą, jak i dla linii zielonej, odnoszącej się do średniej wartości temperatury, oraz dla linii niebieskiej oznaczającej najniższą wartość zmierzonej temperatury, są spowodowane refleksami świetlnymi, które zostały zanotowane podczas gładzenia w trakcie obróbki na hali produkcyjnej (wszystkie badania przeprowadzono na hali produkcyjnej).

Na rys. 116 i rys. 117 został przedstawiony przyrost temperatury przedmiotów gładzonych, po zmodernizowaniu honownicy HTH - 4000S, polegającym na umożliwieniu zmiany prędkości obrotowej głowicy gładzącej w czasie jednego skoku roboczego głowicy.

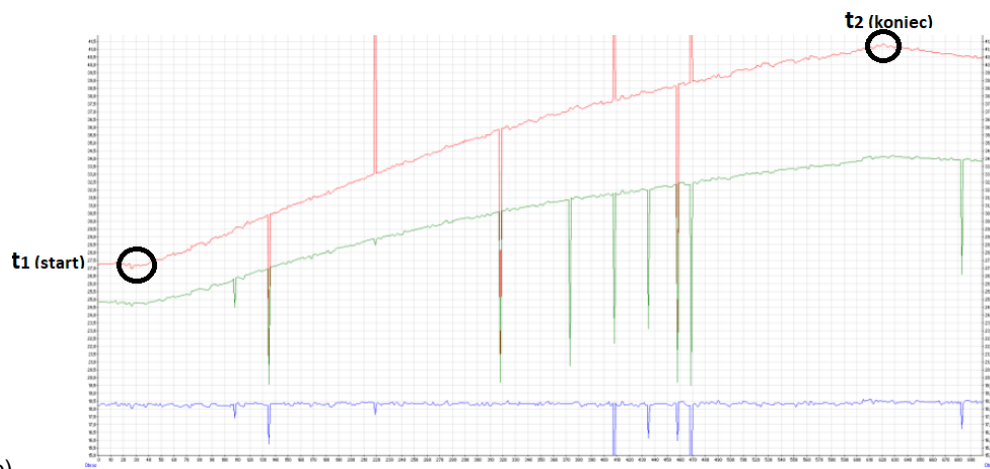
Przyrost temperatury dla gładzenia ze zmienną kinematyką jest niższy niż dla gładzenia tradycyjnego, czyli bez zmiany parametrów gładzenia podczas cyklu. Wynik ten stał się podstawą decyzji do wykonania badań zasadniczych.

Na rys. 116 ÷ 118 zobrazowano temperaturę przedmiotu gładzonego, której wartość wzrasta w trakcie procesu. Kolorem czerwonym wskazano zmierzoną temperaturę maksymalną, która występowała na przedmiocie obrabianym. Kolor niebieski wskazuje zmierzoną temperaturę otoczenia, kolor zielony to wartość temperatury uśrednionej. Obserwowane na rys. 116 ÷ 118 pojedyncze skoki (piki) temperatury to efekt występujących refleksów świetlnych, których nie można było wyeliminować w trakcie trwania eksperymentów przeprowadzanych na hali warsztatu f-my Terma Sp. z o.o.

Na rys. 116 pokazano dwa wykresy, prezentujące dwa pomiary, i obrazujące temperaturę przedmiotu obrabianego, dla gładzenia wykonanego bez zmiany prędkości obrotowej. Wartość średnia zmierzonego przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego wynosi $\Delta T = 14,17^{\circ}\text{C}$.



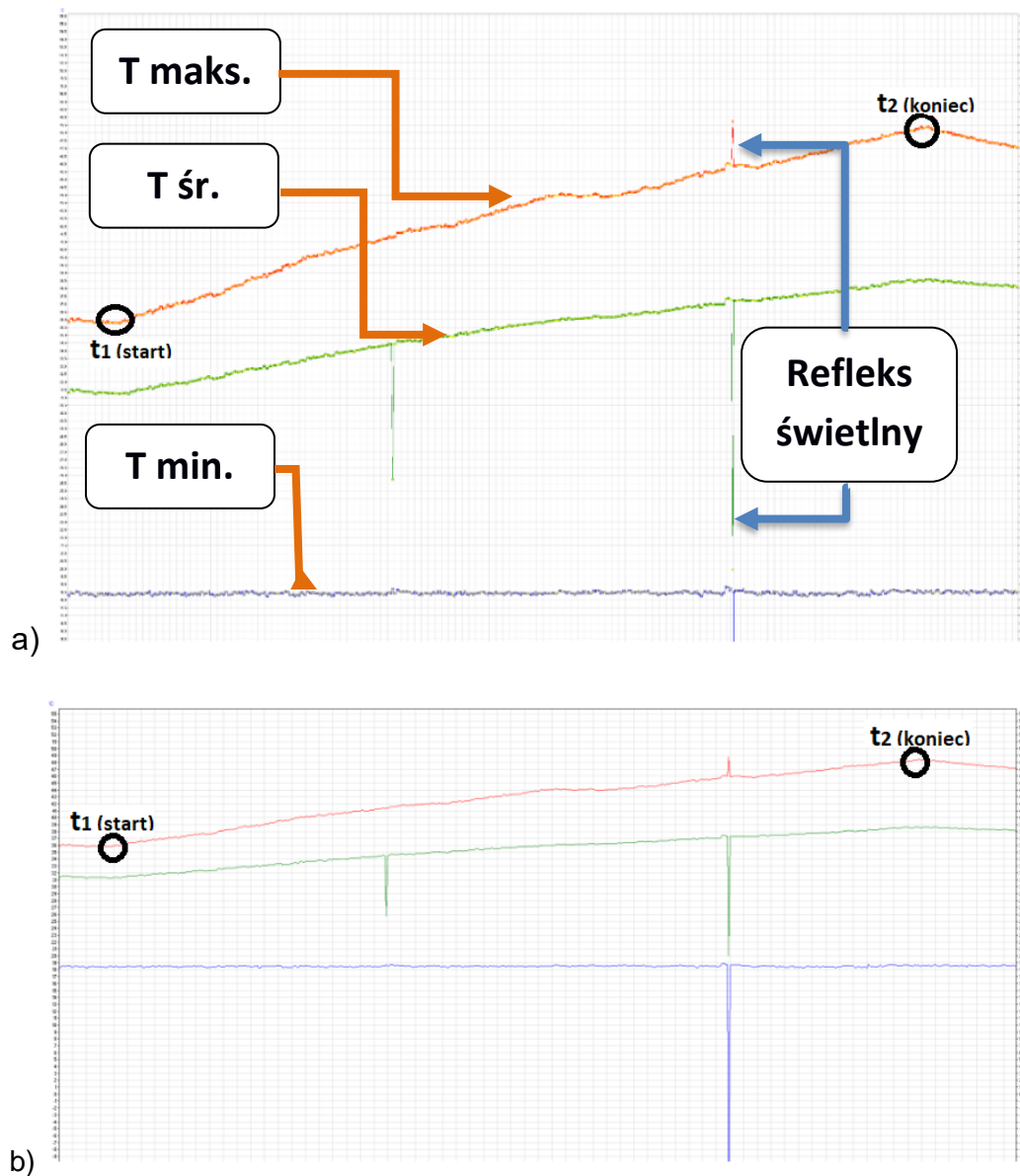
a)



b)

Rys. 116. Temperatura przedmiotu gładzonego T przy stałej prędkości obrotowej głowicy, zaobserwowany średni przyrost temperatury uzyskany w czasie $t = 10$ min gładzenia wynosi $\Delta T_{\text{śr}} = 14,17^{\circ}\text{C}$: a) pomiar pierwszy, b) pomiar drugi. Wykresy wygenerowano w oprogramowaniu THERM. Oś pionowa – temperatura, oś pozioma – czas

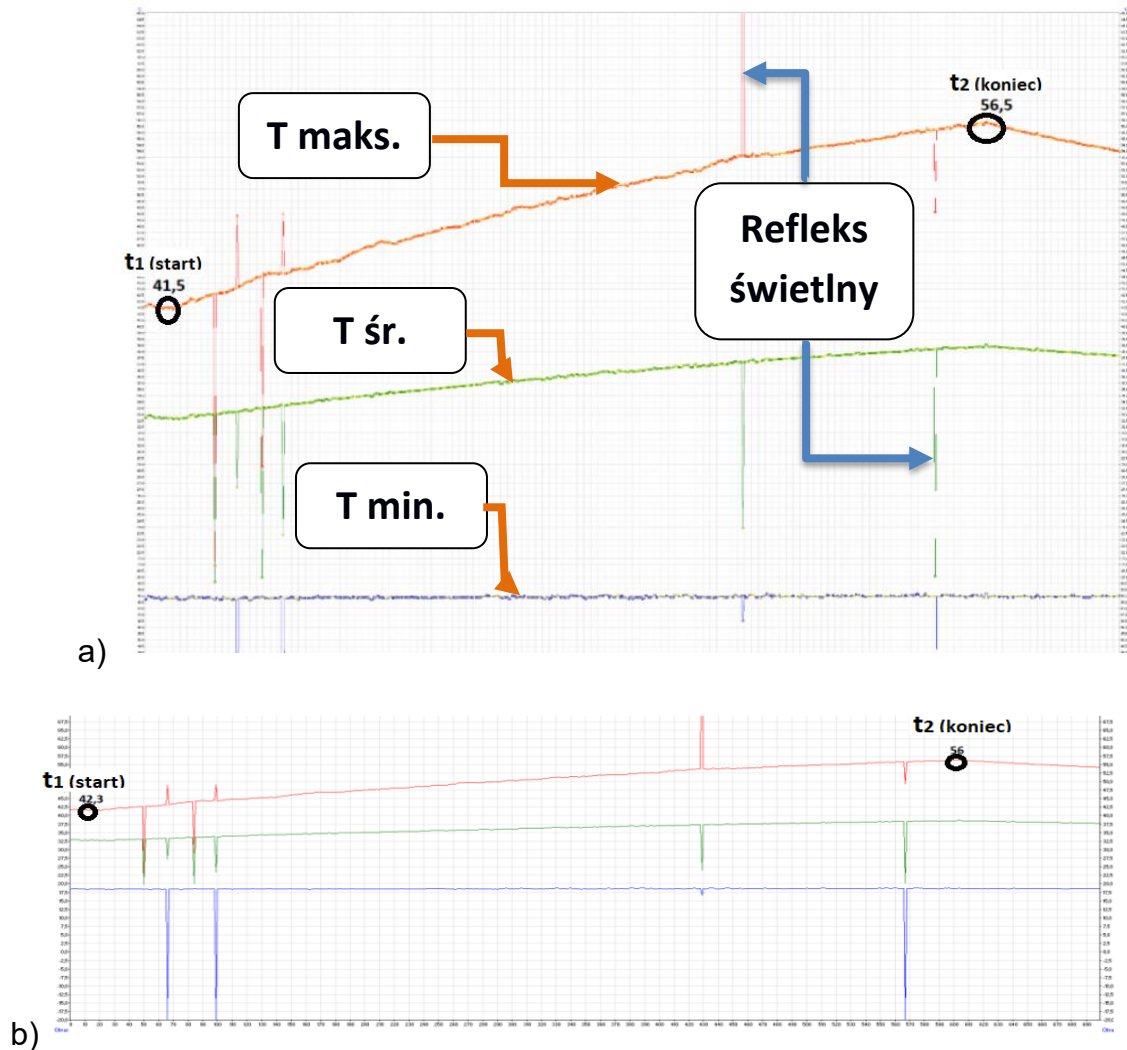
Występujące refleksy świetlne nie były brane pod uwagę przy wyliczaniu średniej wartości temperatury przedmiotu gładzonego. Na rys. 117 pokazano dwa wykresy, prezentujące dwa pomiary, i obrazujące temperaturę przedmiotu obrabianego dla gładzenia wykonanego ze zmianą prędkości obrotowej w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min, dla których średnia wartość przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego wynosi $\Delta T = 14,36^\circ\text{C}$.



Rys. 117. Temperatura przedmiotu gładzonego T dla gładzenia przeprowadzanego ze zmianą prędkości obrotowej, w trakcie pojedynczego skoku głowicy, w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min, uzyskany średni przyrost temperatury w czasie $t = 10$ min gładzenia wynosi $\Delta T_{sr} = 14,36^\circ\text{C}$, a) pomiar pierwszy: przyrost temperatury $\Delta T = 12,49^\circ\text{C}$, b) pomiar drugi: przyrost temperatury $\Delta T = 16,22^\circ\text{C}$. Wykresy wygenerowano w oprogramowaniu THERM. Oś pionowa – temperatura, oś pozioma – czas

Obróbka ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min powoduje większy wzrost średniej wartości temperatury niż dla gładzenia tradycyjnego.

Na rys. 118 pokazano wykresy prezentujące dwa pomiary temperatury przedmiotu obrabianego, dla gładzenia wykonanego ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 80 \div 120$ obr/min, dla których średnia wartość przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego wynosi $\Delta T = 14,06^\circ\text{C}$.



Rys. 118. Temperatura przedmiotu gładzonego T dla gładzenia przeprowadzanego ze zmianą prędkości obrotowej w trakcie pojedynczego skoku, dla zmiennej prędkości obrotowej w zakresie $n = 80 \div 120$ obr/min, pomiar pierwszy: a), pomiar drugi: b), w czasie $t = 10$ min gładzenia, średnia wartość przyrostu temperatury $\Delta T_{sr} = 14,06^\circ\text{C}$, a) pomiar pierwszy: przyrost temperatury $\Delta T = 14,67^\circ\text{C}$, b) pomiar drugi: przyrost temperatury $\Delta T = 13,44^\circ\text{C}$

Przeprowadzenie obróbki ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 80 \div 120$ obr/min powoduje mniejszy wzrost wartości średniej temperatury niż dla gładzenia tradycyjnego. Większa wartość zmiany prędkości obrotowej, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną kinematyką, wpływa na obniżenie temperatury przedmiotu gładzonego.

4.2.1.2. Odchyłka kształtu walcowości tulei cylindrycznych silników spalinowych gładzonych bez zmiany parametrów obróbki

Intensywność usuwania materiału w najcieńszych przekrojach przedmiotów pokazanych na rys. 119, ze względu na odkształcenia cieplne i sprężyste, wymagała podzielenia procesu na 4 etapy, z maksymalnym czasem trwania pojedynczego etapu obróbki $t = 90$ s i z temperaturą maksymalną przedmiotu nie przekraczającą 40°C . Najcieńsze przekroje ścianek gładzonych cylindrów wymagały zastosowania dodatkowej oscylacji narzędzia.



Rys. 119. Miejsca wykonywania pomiarów średnicy i odchyłki kształtu walcowości gładzonej tulei o zmiennej grubości ścianki (grubość $g_1 < g_3 < g_2 < g_4$)

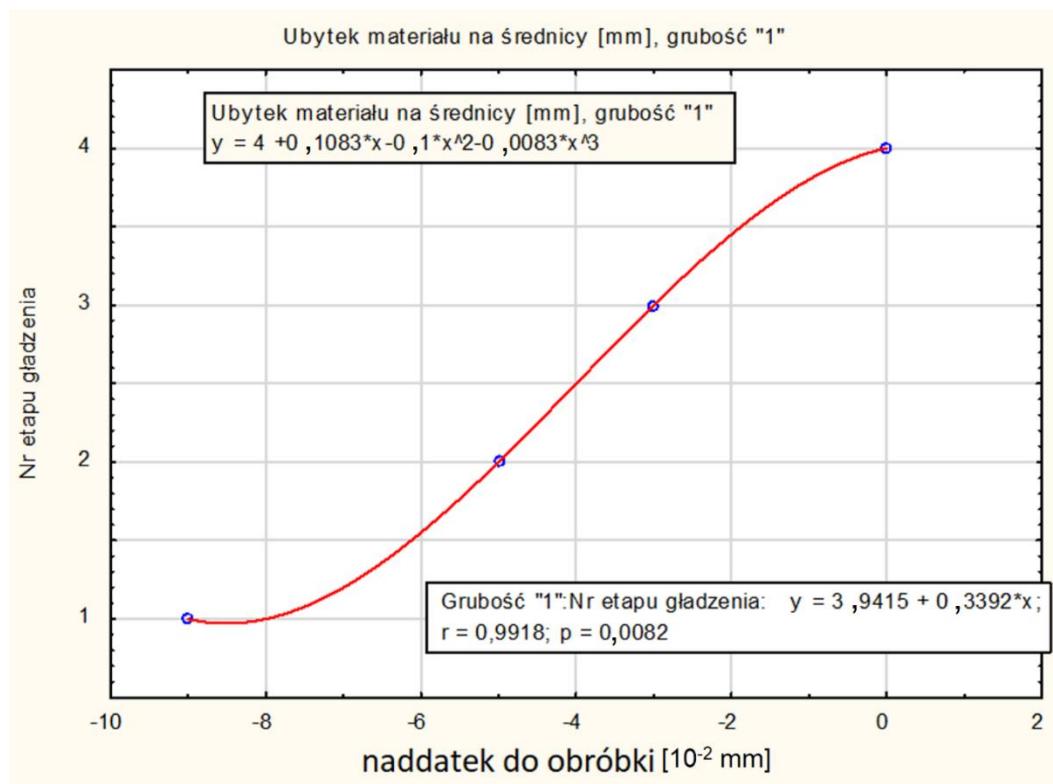
Największym problemem technologicznym, zaobserwowanym podczas obróbki przedmiotów pokazanych na rys. 119, jest zróżnicowana wydajność obróbki w poszczególnych przekrojach cylindra.

Na rys. 120 ÷ 123 zamieszczono wykresy obrazujące ubytek materiału w poszczególnych przekrojach tulei (oznaczonych za pomocą cyfr: „1”, „2”, „3” i „4”), w 4 - ro etapowym procesie gładzenia.

Rys. 120 ÷ 123 prezentują wydajność gładzenia cylindra silnika dla przekrojów o różnej grubości (rys. 82).

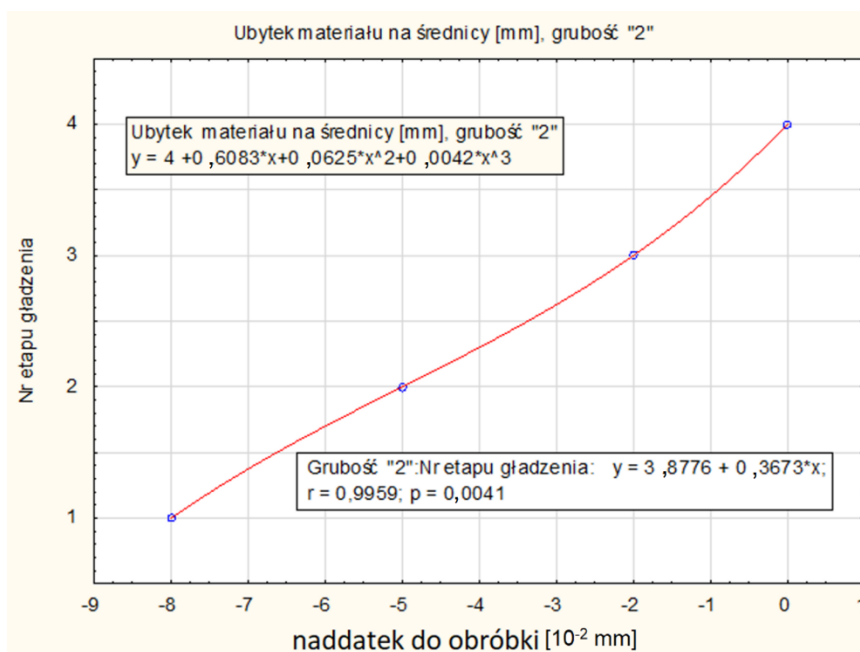
Na wykresach zawarte są informacje o poziomie istotności statystycznej p oraz o mierze współzależności pomiędzy analizowanymi zmiennymi, zwanej współczynnikiem korelacji r . Im mniejsza wartość parametru p , tym większy wskaźnik wiarygodności otrzymanego rezultatu. Współczynnik korelacji może przyjmować wartości z zakresu od -1 do $+1$. Wartość -1 reprezentuje doskonałą korelację ujemną natomiast $+1$ przedstawia doskonałą korelację dodatnią. Wartość bliską 0 zaś oznacza brak korelacji.

Na rys. 120 pokazano wykres obrazujący zmienną wartość usuwanego naddatku dla 4 etapów gładzenia dla przekroju nr 1 (rys. 82, rys. 119).



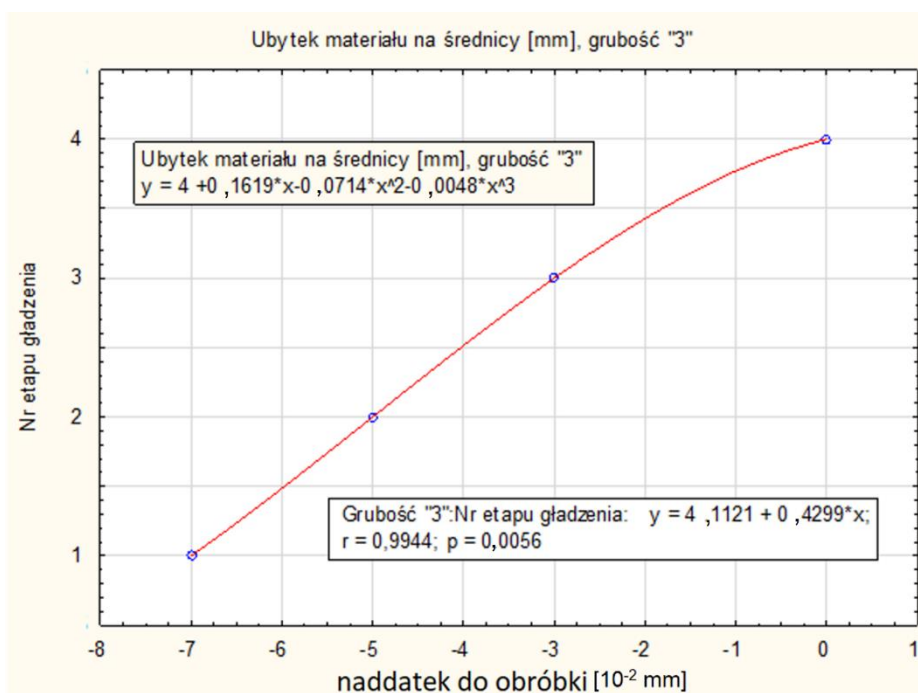
Rys. 120. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego, dla przekroju nr 1 (z rys. 119)

Na rys. 121 pokazano wykres obrazujący zmienną wartość usuwanego naddatku dla 4 etapów gładzenia dla przekroju nr 2 (rys. 119).



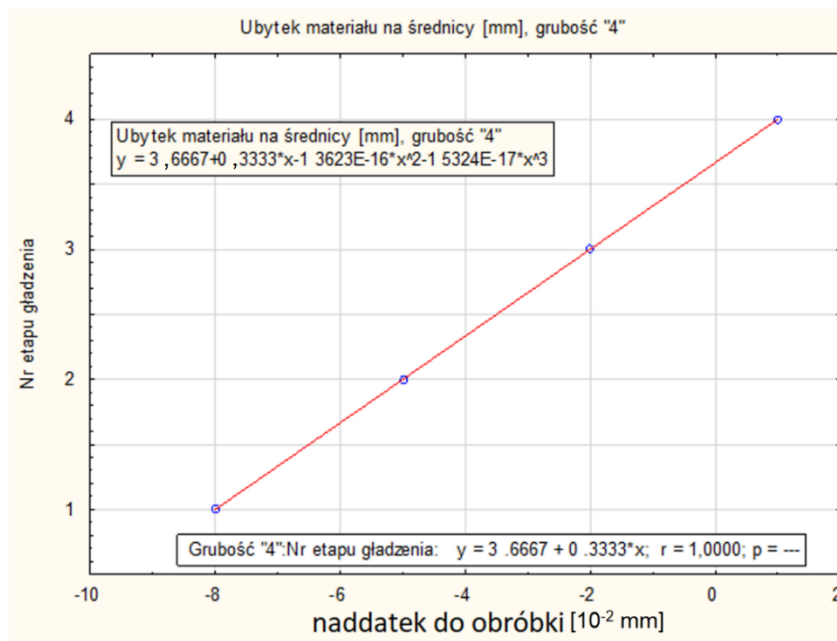
Rys. 121. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego, dla grubości przekroju nr 2 (z rys. 119)

Na rys. 122 pokazano wykres obrazujący zmienną wartość usuwanego naddatku dla 4 etapów gładzenia, dla przekroju nr 3 (rys. 119).



Rys. 122. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego, dla grubości przekroju nr 3 (z rys. 119)

Tylko dla przekroju nr 4 zaobserwowano powtarzalną wartość usuwania naddatku dla każdego etapu obróbkowego, co obrazuje wykres w postaci linii prostej (rys. 123).



Rys. 123. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego, dla grubości przekroju nr 4 (z rys. 119)

4.2.1.3. Wnioski z badań wstępnych

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych można stwierdzić, że:

- Największy wpływ na ubytek materiału i temperaturę gładzonego przedmiotu oraz na chropowatość powierzchni podczas gładzenia ma nacisk oselki.
- Wydajność gładzenia cylindrów silników spalinowych posiadających różne grubości ścianek jest inna dla każdego przekroju.
- Podczas gładzenia przeprowadzanego ze stałymi parametrami obróbkowymi stwierdzono średni wzrost temperatury $\Delta T = 14,17^\circ\text{C}$ w czasie 10 minut.
- Podczas gładzenia ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w trakcie pojedynczego skoku (w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min) uzyskano średni wzrost temperatury $\Delta T = 14,36^\circ\text{C}$ w czasie 10 minut
- Podczas gładzenia ze zmianą prędkości obrotowej głowicy (w zakresie $n = 80 \div 120$ obr/min) w trakcie pojedynczego skoku uzyskano średni wzrost temperatury $\Delta T = 14,056^\circ\text{C}$ w czasie 10 minut, **czyli zmienna kinematyka gładzenia wpływa na obniżenie temperatury gładzonego przedmiotu**

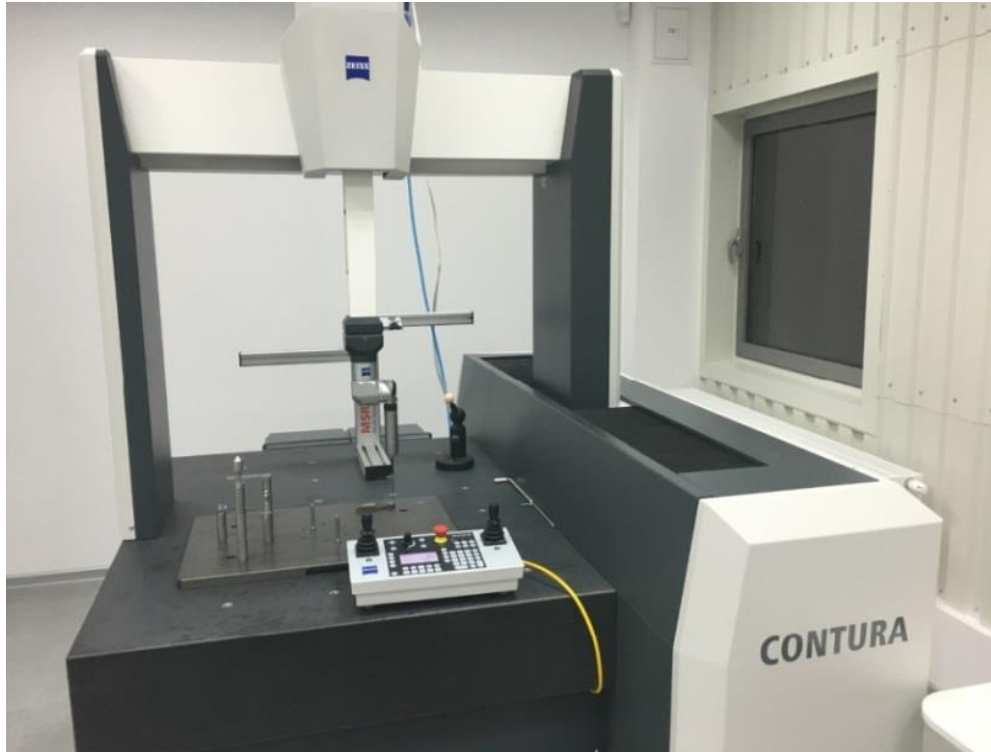
4.2.2. Symulacje komputerowe

Na współrzędnościowej maszynie pomiarowej CNC ZEISS Contura wykonano pomiary głowicy gładzącej, w celu opracowania modelu 3D głowicy gładzącej w systemie CAD, w sposób odzwierciedlający fizyczny model. Na rys. 124 i 125 pokazano stanowisko pomiarowe – maszynę współrzędnościową CNC Zeiss Contura z oprogramowaniem pomiarowym CAD / CAM Calypso.



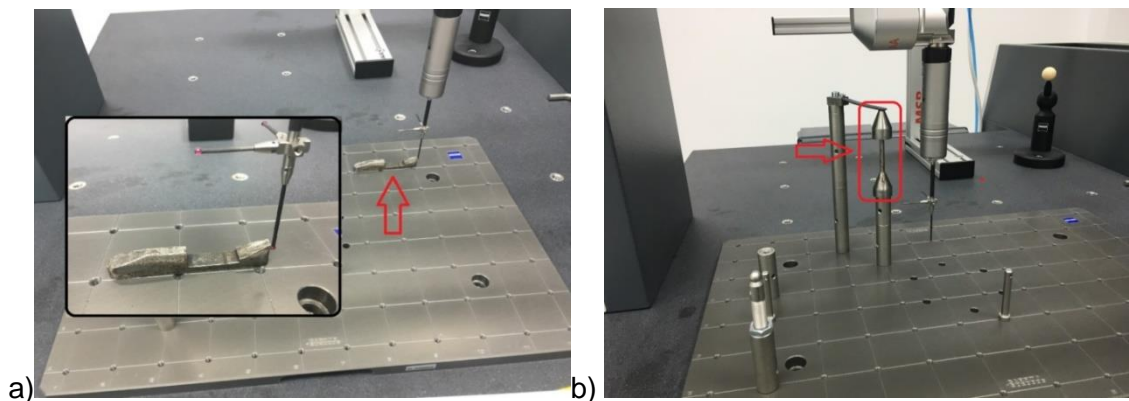
Rys. 124. Stanowisko pomiarowe - maszyna współrzędnościowa CNC ZEISS Contura (1 – komputer z oprogramowaniem pomiarowym CAD / CAM Calypso, 2 – korpus głowicy, 3 – ośelka, 4 – prowadnica ośelki)

Na rys. 125 pokazano maszynę współrzędnościową Zeiss Contura z głowicą pomiarową skrętną RDS. Zaprogramowanie maszyny, ustawienie części do pomiaru oraz wykonanie pomiarów przeprowadzono samodzielnie.



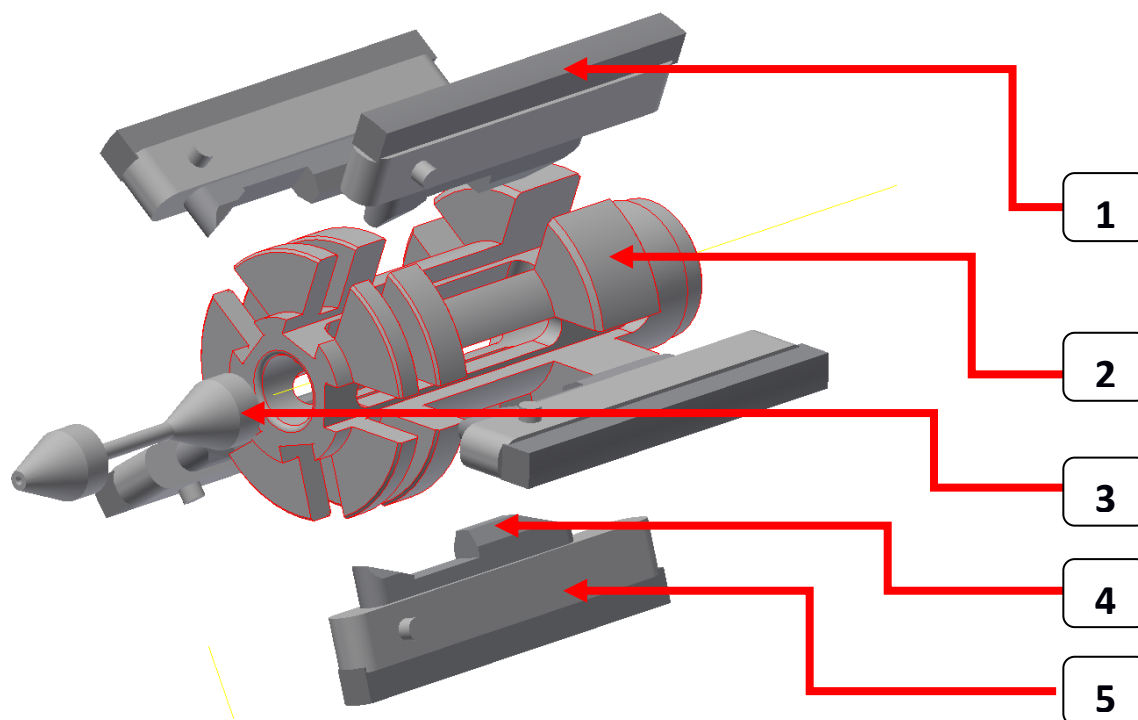
Rys. 125. Maszyna współrzędnościowa CNC Zeiss Contura z głowicą pomiarową skrętną RDS

Na rys. 126 a pokazano pomiar elementu współpracującego z trzpieniem rozprężnym, którego pomiar pokazano na rys. 126 b. Pomiary poszczególnych składowych elementów głowicy roboczej przeprowadzono samodzielnie w celu stworzenia modelu bryłowego 3D głowicy, będącej odzwierciedleniem głowicy używanej w badaniach eksperymentalnych (rys. 127).



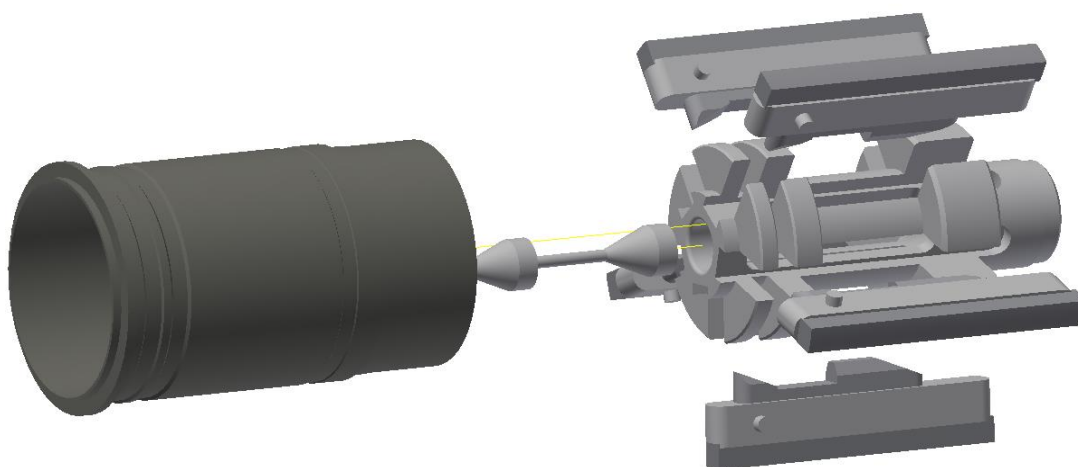
Rys. 126. Pomiary elementów głowicy wykonywane na maszynie współrzędnościowej Zeiss Contura: a) prowadzenie osetki (poz. 4 z rys. 127), b) trzpień rozprężający (poz. 3 z rys.127)

Na rys. 127 pokazano model 3D głowicy gładzącej, który użyto w symulacjach numerycznych procesu gładzenia. Model stworzono samodzielnie, na podstawie raportów pomiarowych uzyskanych z maszyny współrzędnościowej Zeiss Contura z głowicą pomiarową skrętną RDS (rys. 125).



Rys. 127. Model głowicy umożliwiający przeprowadzenia symulacji numerycznej (1 – oselka, 2 – korpus głowicy, 3 – trzpień rozprężny, 4 – prowadzenie oselki, 5 - podstawa oselki)

Na rys. 128 pokazano model 3D głowicy oraz przedmiotu gładzonego.



Rys. 128. Model głowicy i cylindra

Na rys. 129 pokazano wybrane parametry wejściowe, wprowadzone do symulacji komputerowej modułu obliczeniowego programu SolidWorks 2016, takie jak własności materiału poszczególnych elementów głowicy gładzącej, wielkość siatki pomiarowej użytej w symulacji oraz schematyczną wizualizację obciążenia termicznego oselek ściernych.

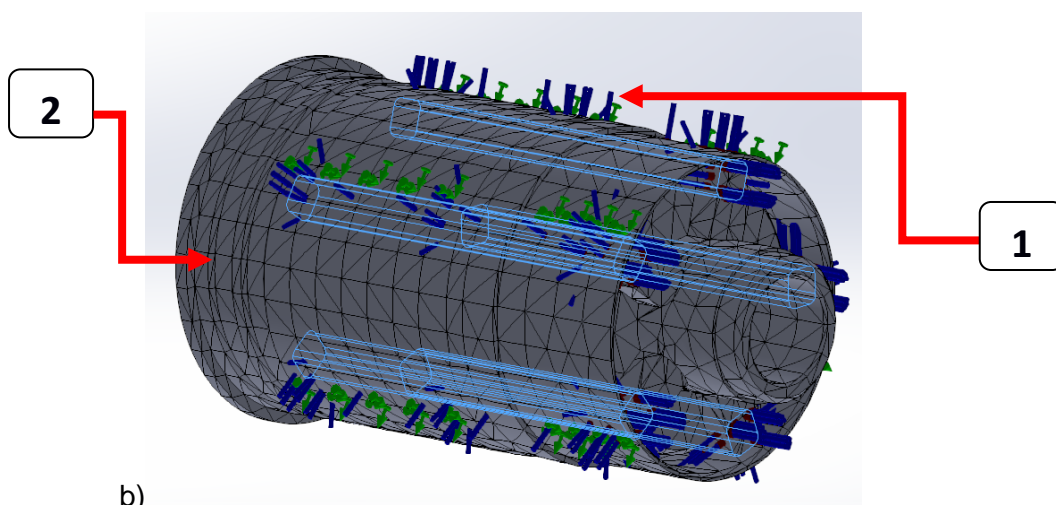
Ustawienia siatki:

Śr. wielkość elementu (ułamek średnicy modelu)	0,1
Min. wielkość elementu (ułamek śr. wielkości)	0,2
Współczynnik gradacji	1,5
Maks. kąt obrotu	60 deg
Utwórz zakrzywione elementy siatki	Nie
Użyj dla siatki zespołu pomiaru w oparciu o wielkość części	Tak

Material(y)

Nazwa	Stal, stopowa	
Ogólne	Gęstość masy	7,73 g/cm ³
	Granica plastyczności	250 MPa
	Wytrzymałość na rozciąganie	400 MPa
Napężenie	Moduł Younga	205 GPa
	Współczynnik Poissona	0,3 ul
	Moduł sprężystości	78,8462 GPa
Nazwa(y) części	Korpus_głowicy_D100.ipt Trzpien_głowicy_D100.ipt Podstawka_kamienia.ipt Podstawka_kamienia.ipt Podstawka_kamienia.ipt Podstawka_kamienia.ipt Podstawka_kamienia.ipt Łoże_kamienia.ipt Łoże_kamienia.ipt Łoże_kamienia.ipt Łoże_kamienia.ipt Łoże_kamienia.ipt Łoże_kamienia.ipt Tuleja_cienkościenna__mala_v2.ipt	

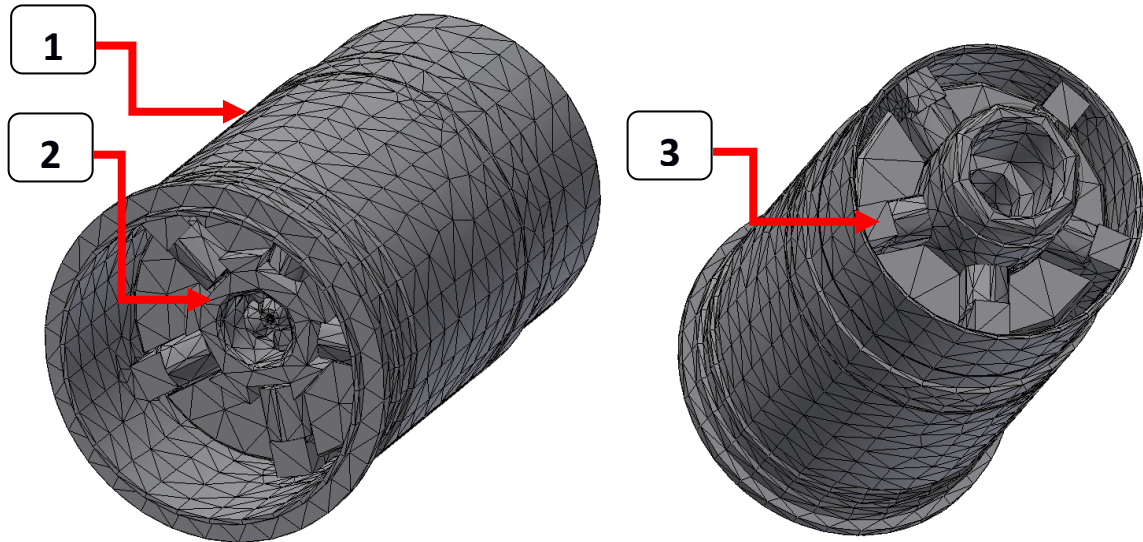
a)



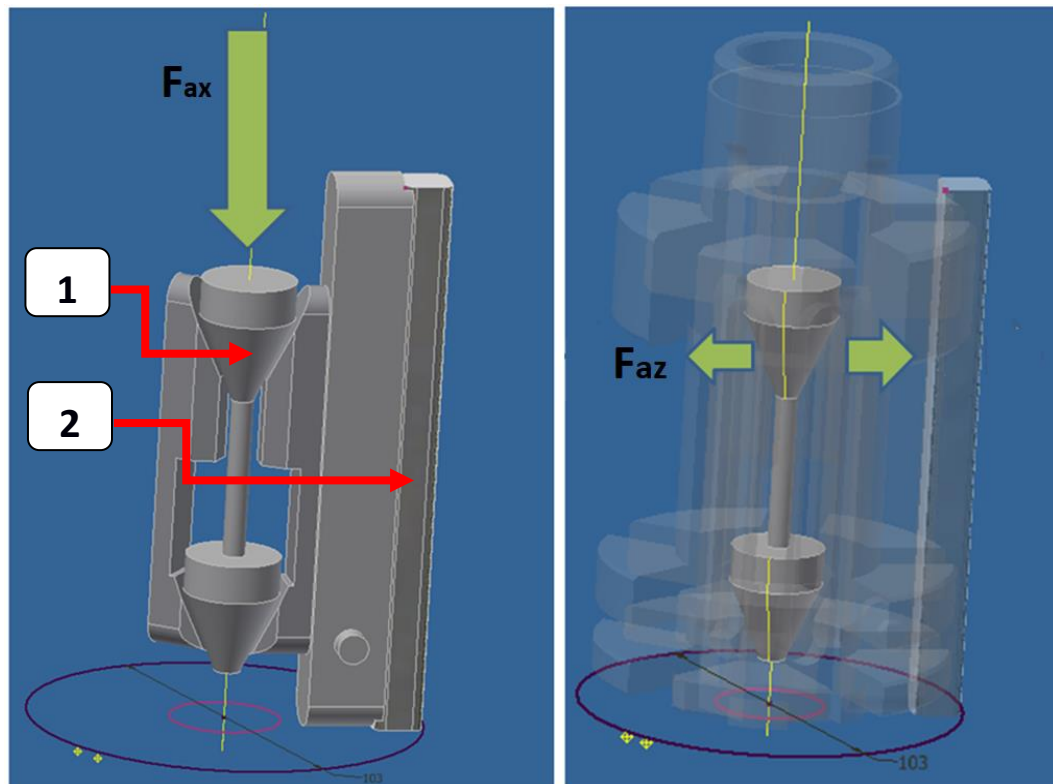
b)

Rys. 129. Przykładowe parametry wprowadzone do modułu obliczeniowego symulacji numerycznej programu SolidWorks 2016: a) materiał użyty w symulacji, b) wizualizacja obciążenia temperaturą $T = 40^{\circ}\text{C}$ oselek ściernych. Cyfra 1 wskazuje komputerową wizualizację termicznego obciążenia osetki, 2 – gładzony cylinder

Model 3D głowicy z naniesioną siatką pomiarową, który został poddany symulacjom komputerowym, zaprezentowano na rys. 130, a na rys. 131 pokazano kierunki i zwroty wektorów siły: osiowej F_{ax} oraz promieniowej F_{az} .



Rys. 130. Model głowicy i cylindra z nałożoną siatką obliczeniową: 1 – gładzony cylinder, 2 – głowica gładząca, 3 – osetka ścierna

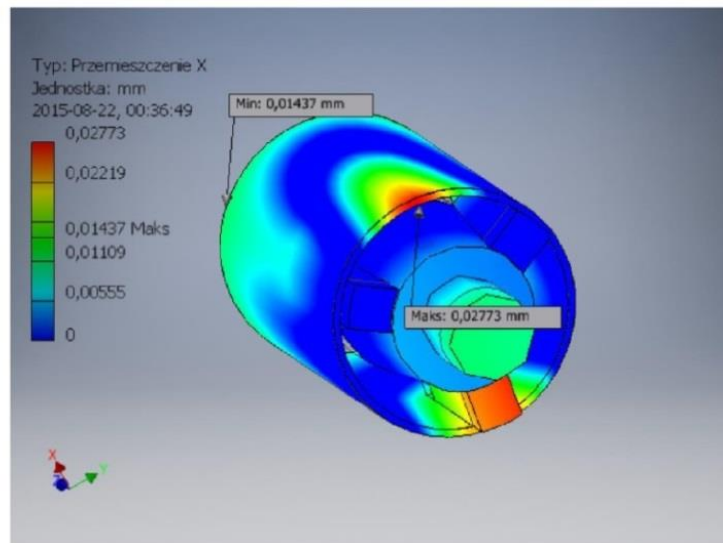


Rys. 131. Model głowicy gładzącej i oznaczenie składowych sił skrawania; 1 – trzpień rozprężny, 2 – osetka ścierna

4.2.2.1. *Odształcenia przedmiotów cienkościennych o stałej grubości przekroju*

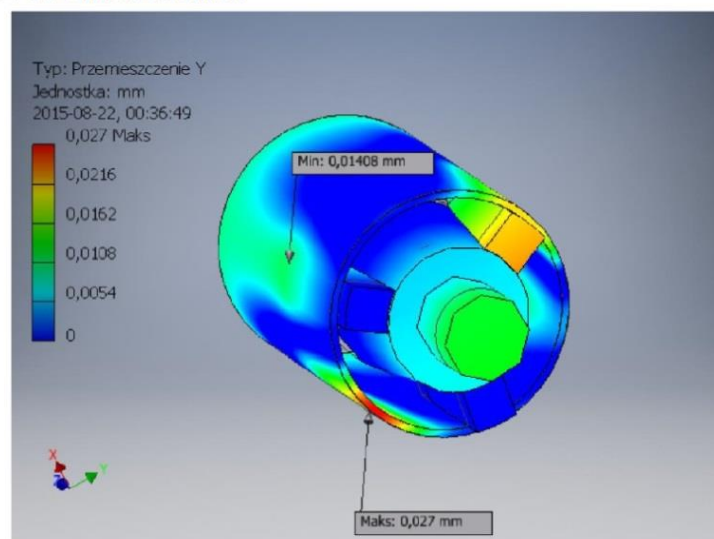
Na rys. 132 ÷ 137 zaprezentowano obrazy z przeprowadzonej symulacji komputerowej, prezentujące wielkość odkształceń cylindra dla 3 wartości docisku oselki (stosowanych podczas obróbki) do powierzchni gładzonego otworu. Dla nacisku oselki $p = 0,5$ MPa otrzymano odkształcenie w kierunku X (kierunek pionowy) 0,027 mm (rys. 132), a w kierunku Y (kierunek poziomy) 0,027 mm (rys. 133).

Przemieszczenie X



Rys. 132. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku osi X (nacisk 0,5 MPa)

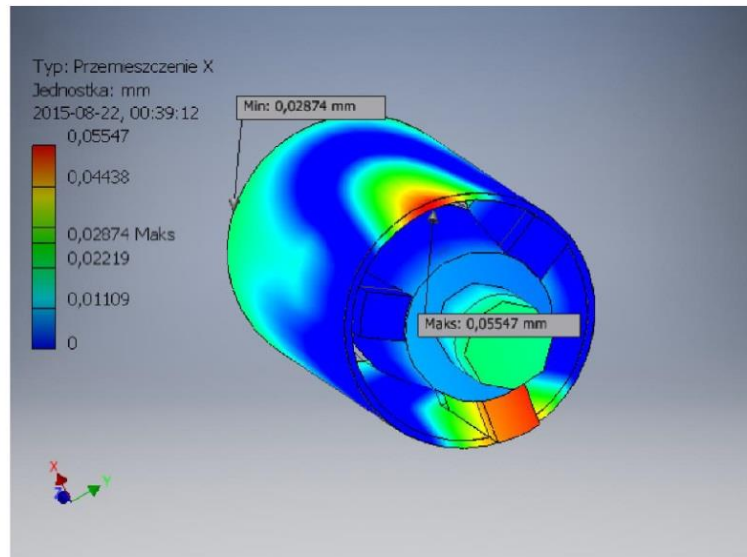
Przemieszczenie Y



Rys. 133. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku osi Y (nacisk 0,5 MPa)

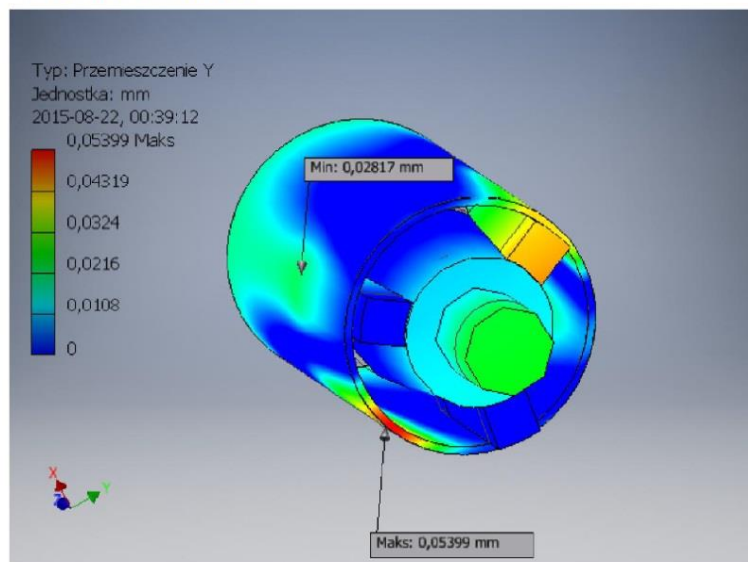
Symulację odkształceń cylindra przeprowadzono z parametrami stosowanymi podczas gładzenia. Dla nacisku osetki $p = 1,0$ MPa otrzymano odkształcenie w kierunku X (kierunek pionowy) 0,055 mm (rys. 134) i w kierunku Y (kierunek poziomy) 0,054 mm (rys. 135).

☐ **Przemieszczenie X**



Rys. 134. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku X (nacisk 1,0 MPa)

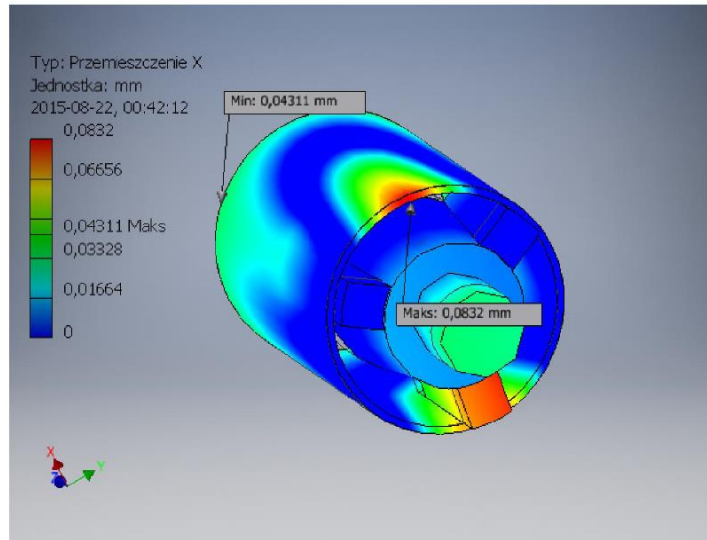
☐ **Przemieszczenie Y**



Rys. 135. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku Y (nacisk 1,0 MPa)

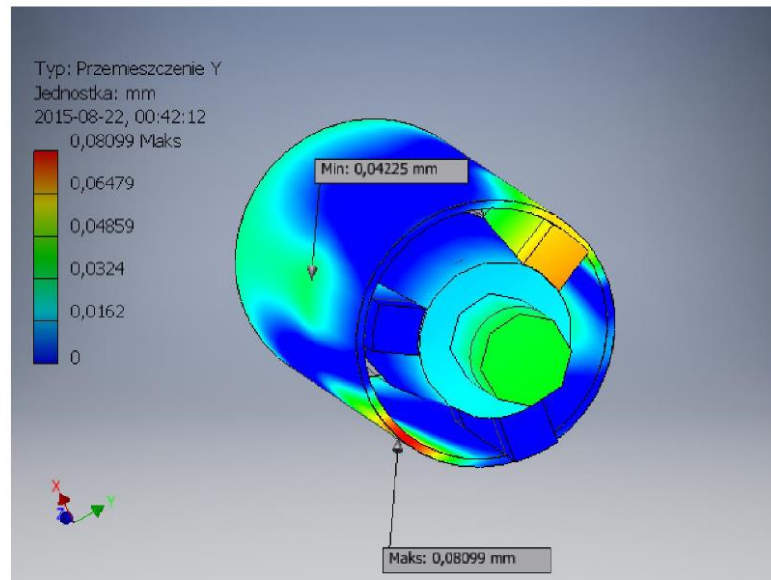
Dla nacisku oselki $p = 1,5$ MPa otrzymano odkształcenie w kierunku X (kierunek pionowy) 0,08 mm (rys. 136) i w kierunku Y (kierunek poziomy) 0,08 mm (rys. 137).

Przemieszczenie X



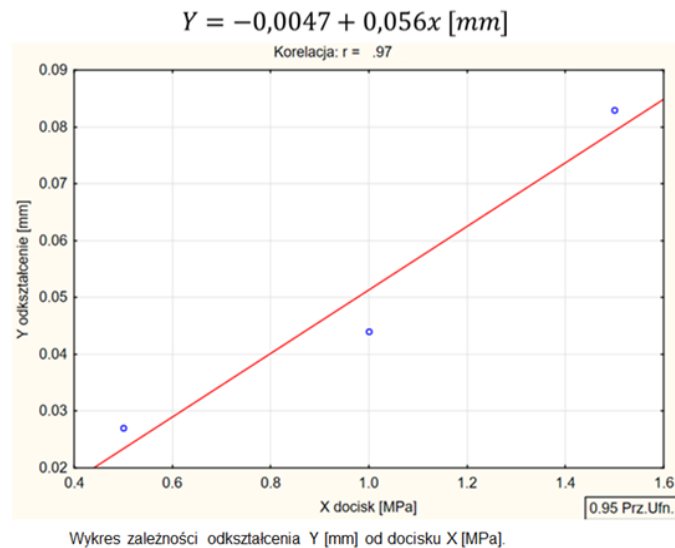
Rys. 136. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku X (nacisk 1,5 MPa)

Przemieszczenie Y



Rys. 137. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku Y (nacisk 1,5 MPa)

Na rys. 138 pokazano przyrost odkształcenia cylindra w zależności od docisku ośki do powierzchni gładzonej. Dla cylindra o stałej grubości przekroju odkształcenie otworu w funkcji docisku ośki do powierzchni obrabianej jest funkcją liniową.



Rys. 138. Wpływ nacisku ośki na odkształcenie cylindra (dla $X \in <0,5, 1,5>$)

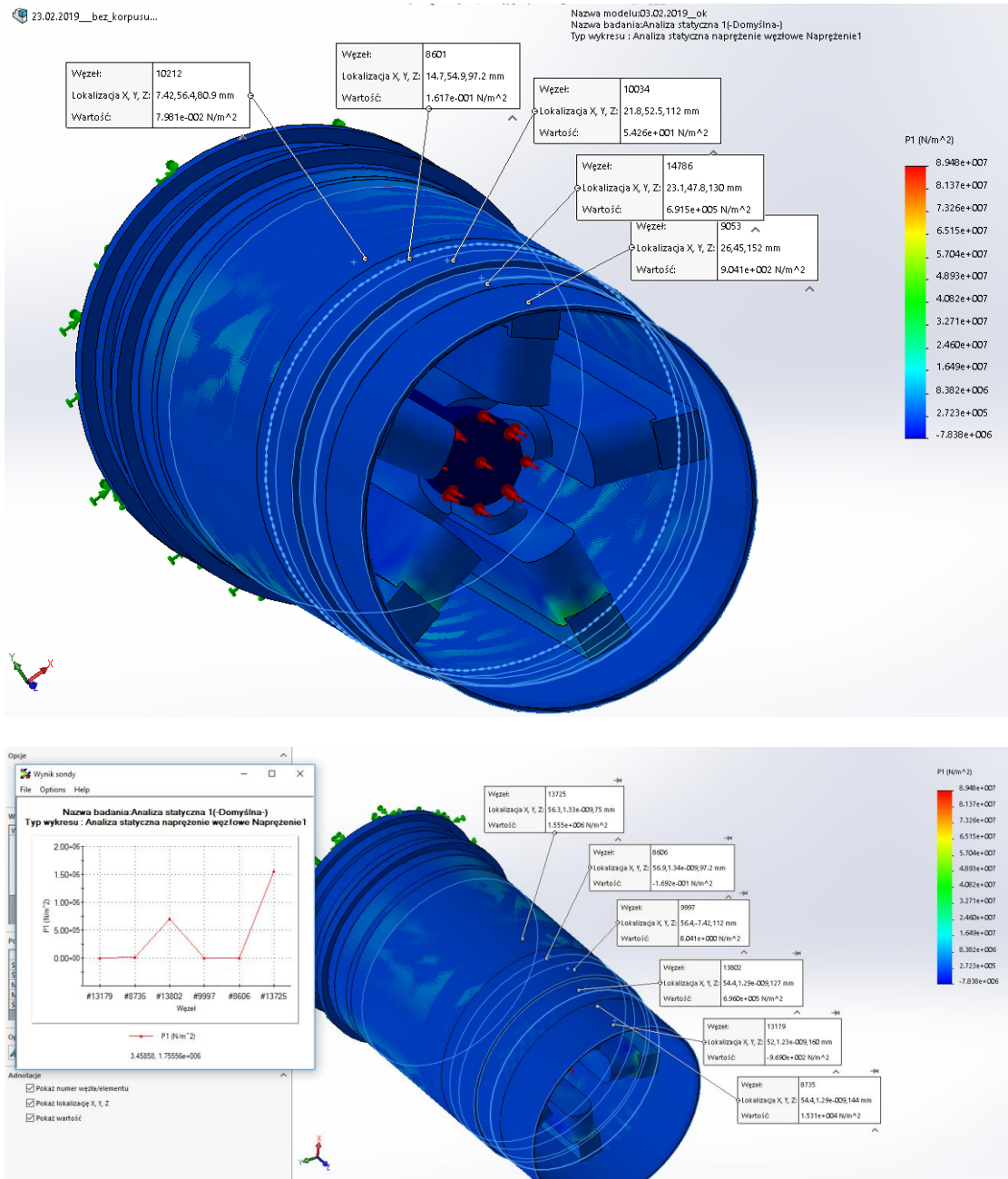
W kolejnym rozdziale pracy zostanie pokazane, że występujące odkształcenia cylindra o różnej grubości ścianki przyjmują odmienne wartości dla poszczególnych przekrojów, co stwarza znaczny problem technologiczny podczas przeprowadzania obróbki.

4.2.2.2. *Odkształcenia przedmiotów cienkościennych o zmiennej grubości przekroju*

Na rys. 139 zamieszczono obraz zarejestrowany podczas symulacji komputerowych, prezentujący wartość naprężeń, które mają różną wartość w poszczególnych przekrojach przedmiotu gładzonego cienkościennego, o różnych grubościach ścianki. Bez względu na wielkość zadanego obciążenia, w przedmiocie występuje zróżnicowany stan naprężeń.

W odróżnieniu od sytuacji opisanej na rys. 138, gdzie dla przedmiotu o stałej grubości ścianki występuje liniowy stan odkształcenia przedmiotu obrabianego, dla przedmiotu cienkościennego o różnych grubościach przekrojów nie ma korelacji odkształcenia w funkcji zadanego obciążenia (rys. 139).

Przekroje o różnych grubościach nagrzewają się w różnym tempie, studzą się w różnym czasie, dodatkowo odkształcają się w sposób odrębny dla przekrojów o różnej grubości. Wszystko to wpływa na komplikację seryjnej obróbki np. cienkościennych tulei cylindrów silników spalinowych.

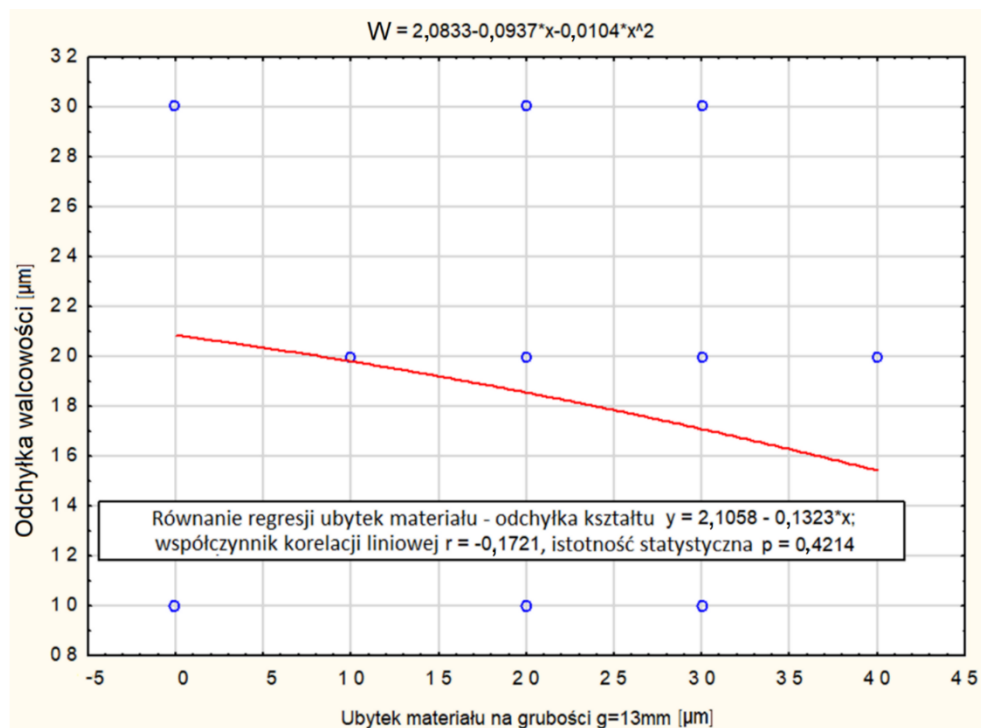


Rys. 139. Widok okna z programu Solidworks Simulation 2016 – pomiar naprężeń w różnych przekrojach tulei cienkościennych ze zmienną grubością ścianki (z rys. 82)

Na rys. 140 podano odchyłki walцовości otrzymane podczas gładzenia tulei cienkościennych (rys. 82, rys. 139) dla przekroju o największej grubości. Poszczególne punkty pokazane na wykresie odpowiadają odchyłce kształtu walцовości gładzonego otworu, zmierzonej na najgrubszym przekroju tulei. Pomiary wykonano dla 24 tulei.

Nie stwierdzono korelacji, dla przedmiotów cienkościennych i ze zmienną grubością ścianki, pomiędzy poszczególnymi grubościami ścianki i wydajnością obróbki a zmierzoną odchyłką walцовości. Oznacza to, że nie jest powtarzalna i przewidywalna wielkość odkształcenia oraz możliwy do uzyskania wymiar średnicy gładzonego otworu na przekrojach o różnych grubościach.

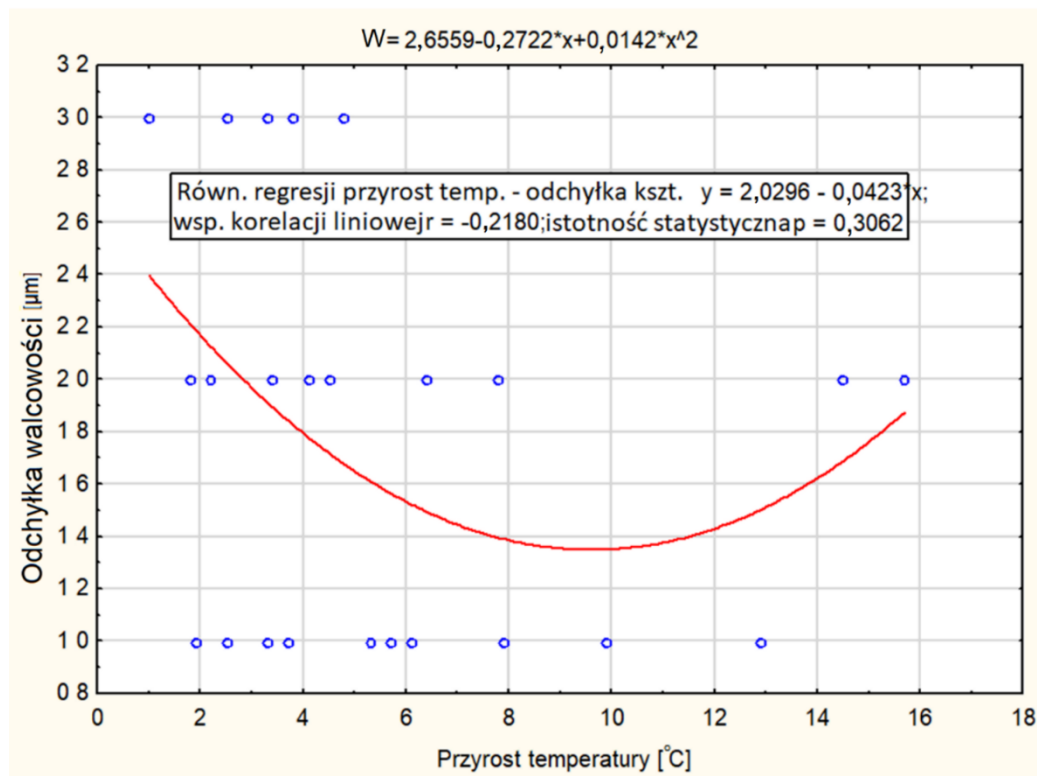
Ze względu na występującą temperaturę i odkształcenia cieplne obróbka przedmiotów cienkościennych i ze zmienną grubości ścianki stwarza duże kłopoty wykonawcze.



Rys. 140. Wykres odchyłki walцовości W gładzonego otworu w funkcji wydajności obróbki

Na rys. 141 podano wartość zmierzonych, w najgrubszym przekroju cylindra, odchyłek kształtu otrzymanych podczas seryjnego gładzenia tulei cienkościennych pokazanych na rys. 82. Przy czterech etapach gładzenia, przeprowadzanych w tym samym odcinku czasu t , wartość odchyłki kształtu jest zróżnicowana. Poszczególne punkty pokazane na rys. 141 odpowiadają odchyłce kształtu walcowości gładzonego otworu, zmierzonej na najgrubszym przekroju tulei. Pomiary wykonano na 24 tulejach.

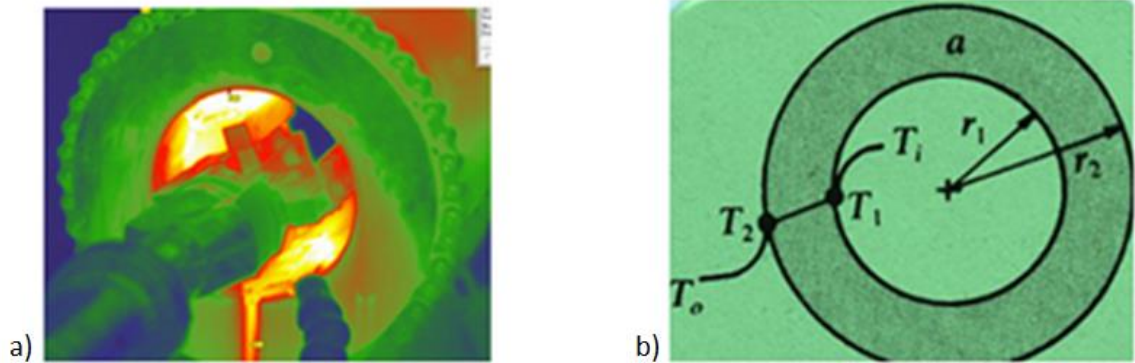
Nie stwierdzono korelacji przyrostu temperatury i wielkości odkształcenia gładzonego otworu (rys. 141) zmierzonego w najgrubszym przekroju cylindra o zmiennej grubości ścianki (rys. 82), co znacząco w praktyce warsztatowej utrudnia przeprowadzanie seryjnej obróbki gładzenia, ze względu na brak możliwości oszacowania czasu pozostającego do zakończenia obróbki.



Rys. 141. Wykres odchyłki kształtu walcowości W gładzonego otworu w funkcji przyrostu temperatury gładzonego otworu

4.2.2.3. Symulacja odkształceń termicznych w procesie gładzenia

Przeprowadzono symulacje numeryczne odkształcania się gładzonych cylindrów na skutek przyrostu temperatury, na danych otrzymanych z ich seryjnej obróbki, i z użyciem modelu 3D głowicy wykonanego w odzwierciedleniu do fizycznej głowicy. Na rys. 142 pokazano termogram układu obróbkowego OUPN oraz układ pola temperatur występujących podczas gładzenia.

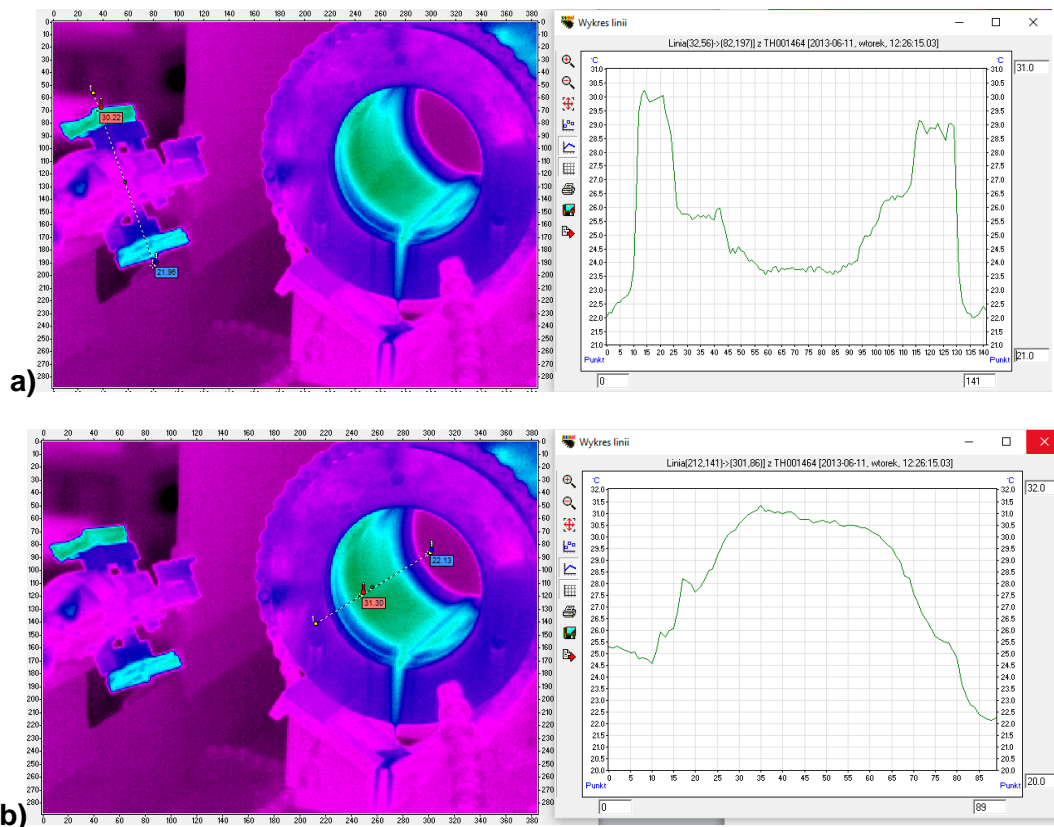


Rys. 142. Termogram układu obróbkowego a) szkic przepływu strumienia ciepła przez przedmiot o przekroju rury, b) T_1 – temperatura wewnątrz, T_2 – temperatura zewnętrzna, r_1 – promień wewnętrzny cylindra, r_2 – promień zewnętrzny cylindra

Strumień ciepła \dot{Q} przepływającego z wnętrza gładzonego cylindra do zewnątrz (rys. 142) przedstawia się za pomocą typowego wzoru:

$$\dot{Q} = 2\pi kL \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.42)$$

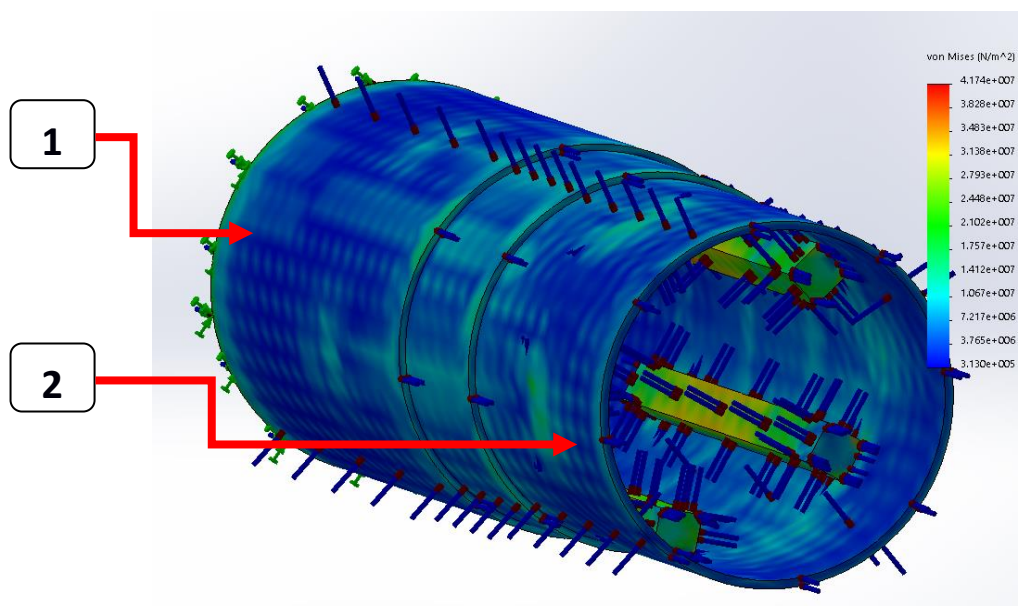
Na rys. 143 pokazano przykładowe termogramy oselki oraz cylindra po zakończonej operacji gładzenia cylindra (z rys. 82).



Rys. 143. Termogram: a) oselki, b) cylindra po zakończonej operacji gładzenia otworu

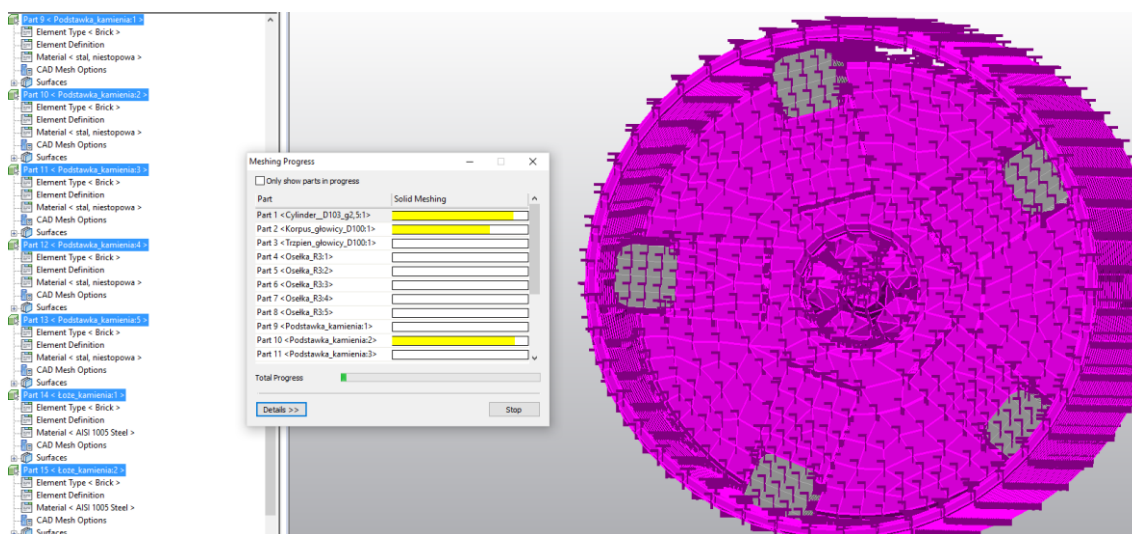
Kolejnym etapem było wprowadzenie danych do programów komputerowych Solidworks Simulation 2016, Autodesk Simulation 2014 i Inventor Professional 2016 oraz wykonanie symulacji komputerowych. Wybrane dane, uzyskane podczas symulacji numerycznych, zamieszczono w niniejszej pracy.

Na rys. 144 pokazano obraz otrzymany podczas symulacji komputerowej gładzenia cylindra o zmiennej grubości przekroju, z zadaniem obciążeniem termicznym dla narzędzi ściernych i cylindra, w postaci nie zdeformowanej. Zadano temperaturę oselek $T_{os} = 40^{\circ}\text{C}$, temperaturę cylindra $T_{cyl} = 20^{\circ}\text{C}$.



Rys. 144. Widok izometryczny niezdeformowanego cylindra o zmiennej grubości ścianki; poz. 1 – przekrój najgrubszy, poz. 2 – przekrój najcieńszy

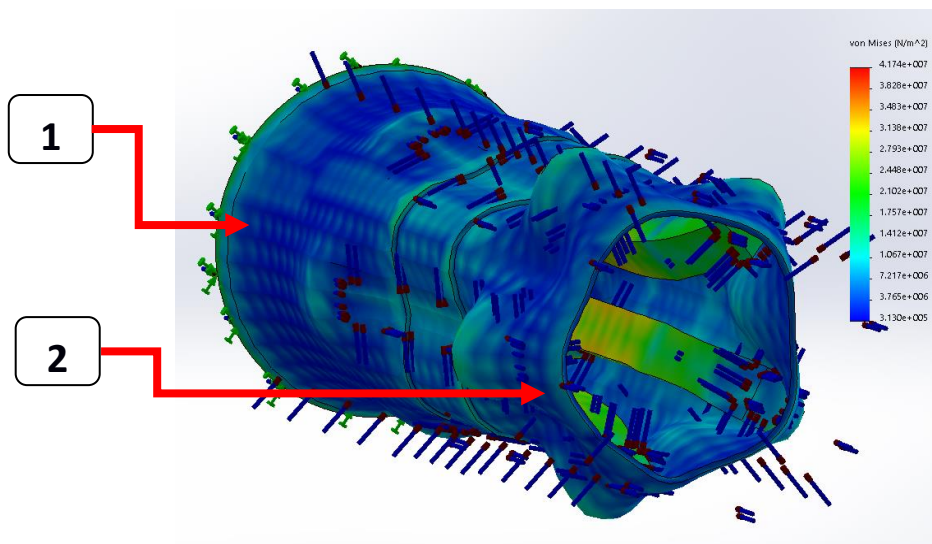
Na rys. 145 przedstawiono generowanie obliczeń dla bryły z rys. 144. Obliczenia wykonano w programie Autodesk Simulation 2013.



Rys. 145. Generowanie symulacji w programie Autodesk Simulation 2013

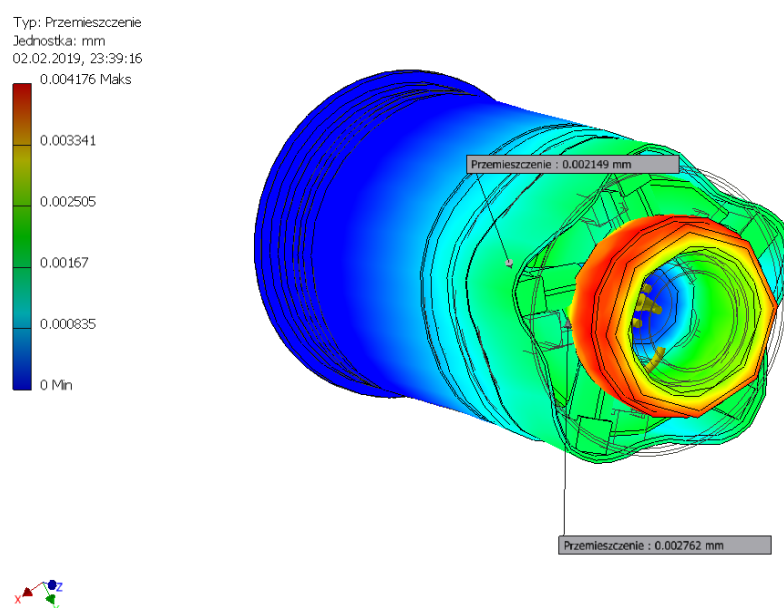


Na rysunkach rys. 146 ÷ 149 pokazano otrzymane obrazy symulacji gładzenia. Zaobserwowano, że występują niejednorodne odkształcenia przedmiotu cienkościennego ze zmienną grubością ścianki, dla obciążeń cieplnych jakie zaobserwowano podczas gładzenia (rys. 146). Wielkość odkształcenia otworu gładzonego cylindra zmniejsza się wraz ze wzrostem grubości przekroju.



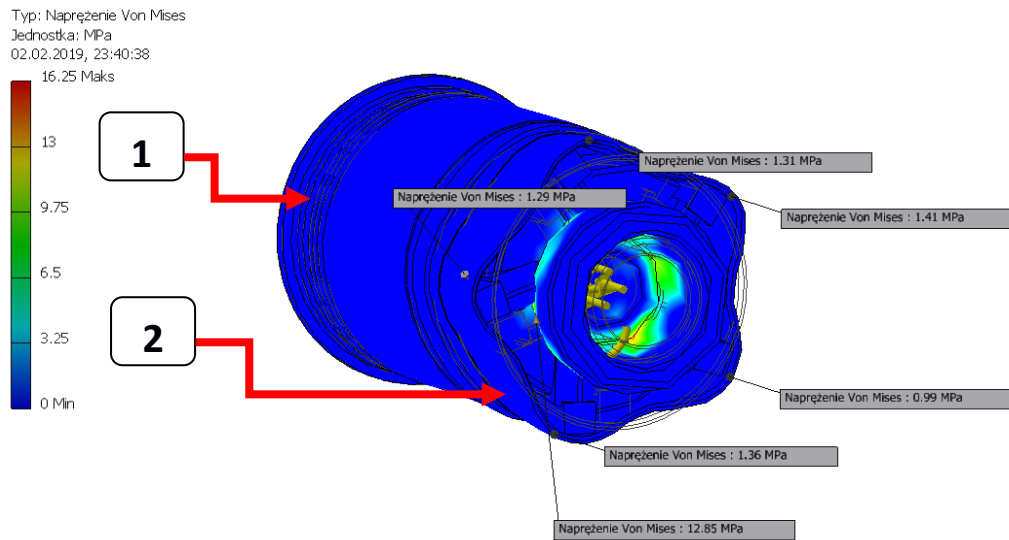
Rys. 146. Widok izometryczny zdeformowanego cylindra o zmiennej grubości ścianki; poz. 1 – przekrój najgrubszy i najmniejsze odkształcenie, poz. 2 – przekrój najcieńszy i największe odkształcenia

Podczas przemieszczenia głowicy w kierunku osiowym, największą wartość odkształcenia cylindra zaobserwowano w najcieńszym jego przekroju (rys. 147).



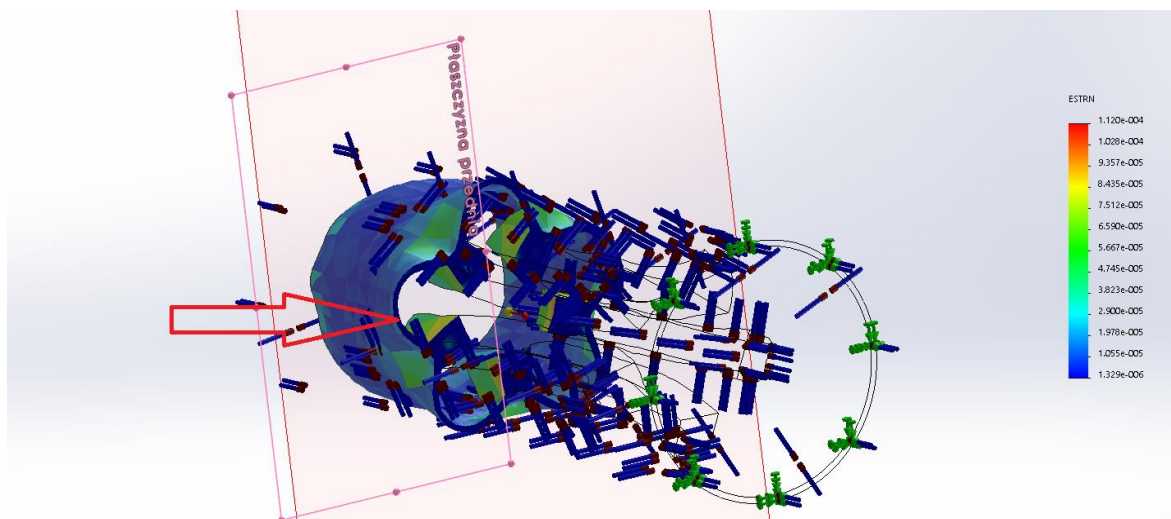
Rys. 147. Obraz symulacji komputerowej – odkształcenia cylindra o zmiennej grubości ścianki

Na rys. 148 pokazano obraz zarejestrowany podczas symulacji komputerowych, obrazujący naprężenia von Mises'a, które mają różną wartość w przekrojach o różnej grubości gładzonego cylindra. Zgodnie z hipotezą Hubera, o wyężeniu decyduje nie ta część energii, która bierze udział w odkształceniu objętościowym, lecz jedynie ta część, która bierze udział w odkształceniu postaci.



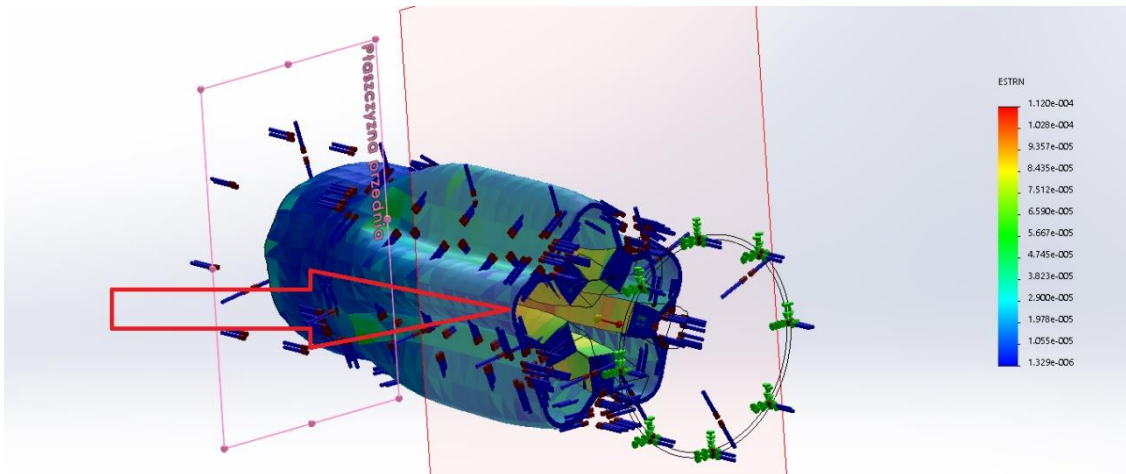
Rys. 148. Obraz symulacji komputerowej – naprężenia w cylindrze o zmiennej grubości ścianki; poz. 1 – przekrój najgrubszy i najmniejsze odkształcenie, poz. 2 – przekrój najcieńszy i największe odkształcenia

Na rys. 149 zamieszczono obraz zarejestrowany podczas symulacji numerycznej gładzenia, prezentujący odkształcenia, których wielkość jest różna w przekrojach o różnej grubości. Rys. 149 prezentuje odkształcenia w przednim przekroju,



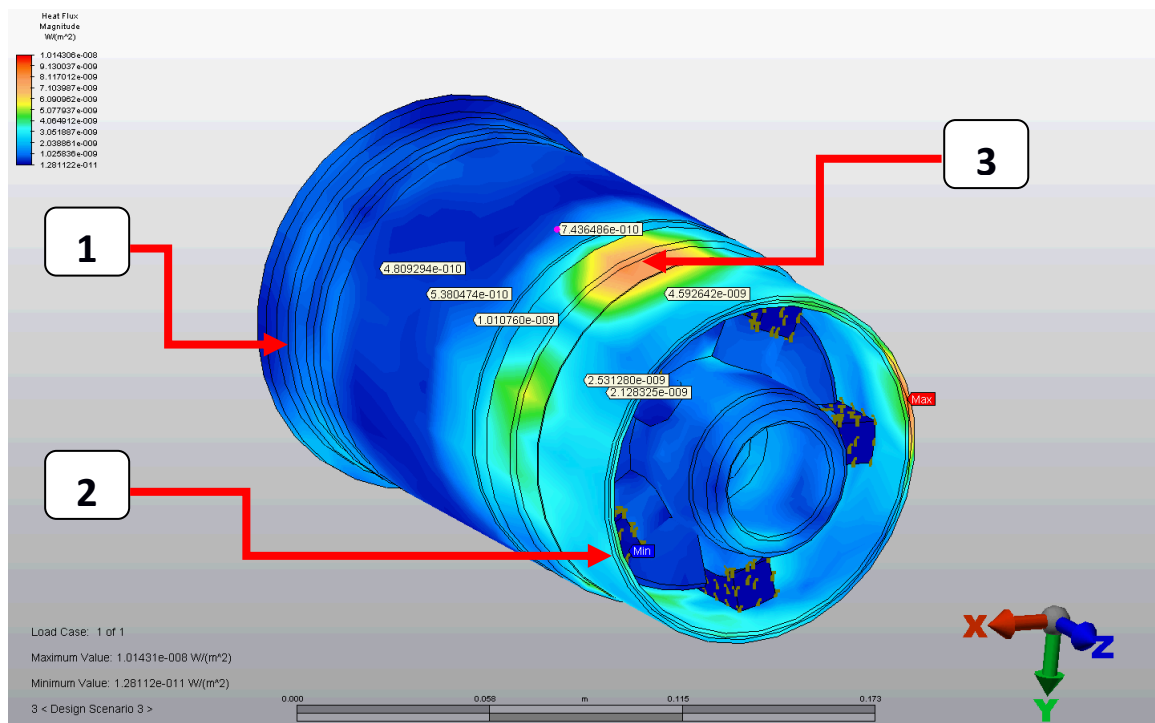
Rys. 149. Widok izometryczny zdeformowanego cylindra o zmiennej grubości ścianki w przekroju z przodu cylindra

Na rys. 150 zamieszczono obraz zarejestrowane podczas symulacji komputerowych gładzenia, prezentujący odkształcenia gładzonego cylindra w środkowym przekroju.



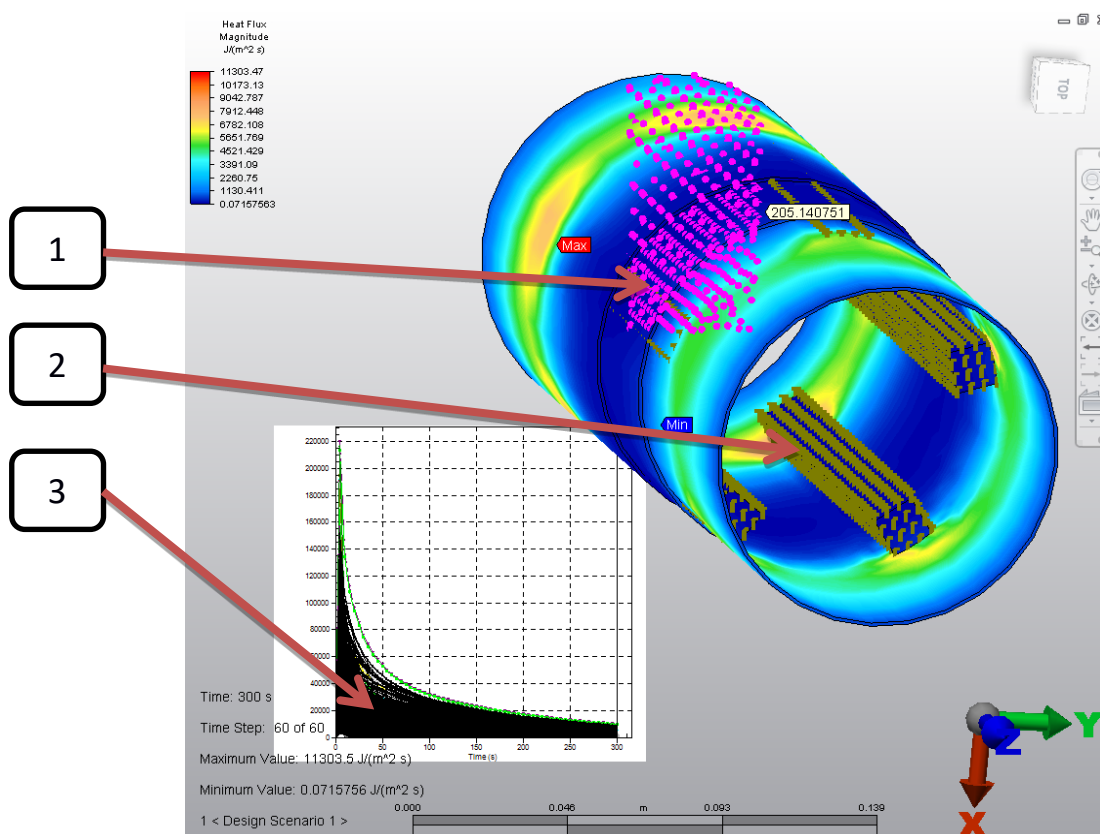
Rys. 150. Widok izometryczny zdeformowanego cylindra o zmiennej grubości ścianki w przekroju z przodu cylindra

Na rys. 151 zamieszczono obraz zarejestrowany podczas symulacji numerycznej gładzenia, prezentujący przepływ strumienia ciepła [W/m²] przez cylinder z rys. 82. Wyraźnie zauważalne jest występowanie różnych wartości strumienia ciepła, w zależności od grubości przekroju elementu gładzonego. Występujące różnice dodatkowo zobrazowano w postaci wykresów na rys. 152 ÷ 154.



Rys. 151. Obraz symulacji komputerowej – przepływ strumienia ciepła; poz. 1 – przekrój najgrubszy, poz. 2 – przekrój najcieńszy, poz. 3 - wartość maksymalna zmierzonego strumienia ciepła

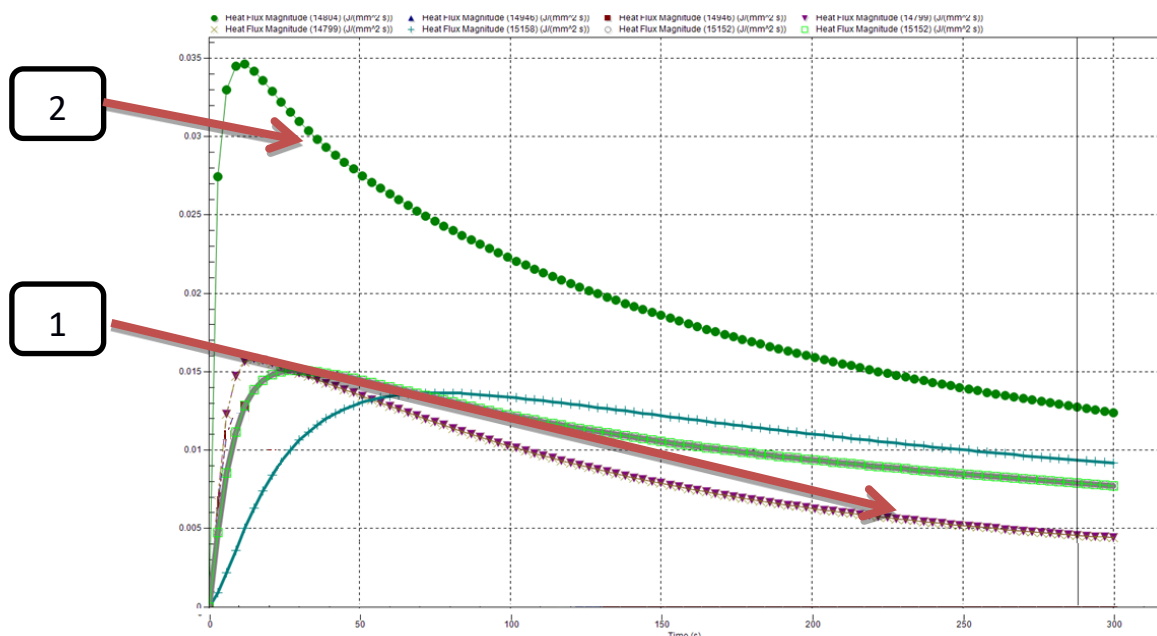
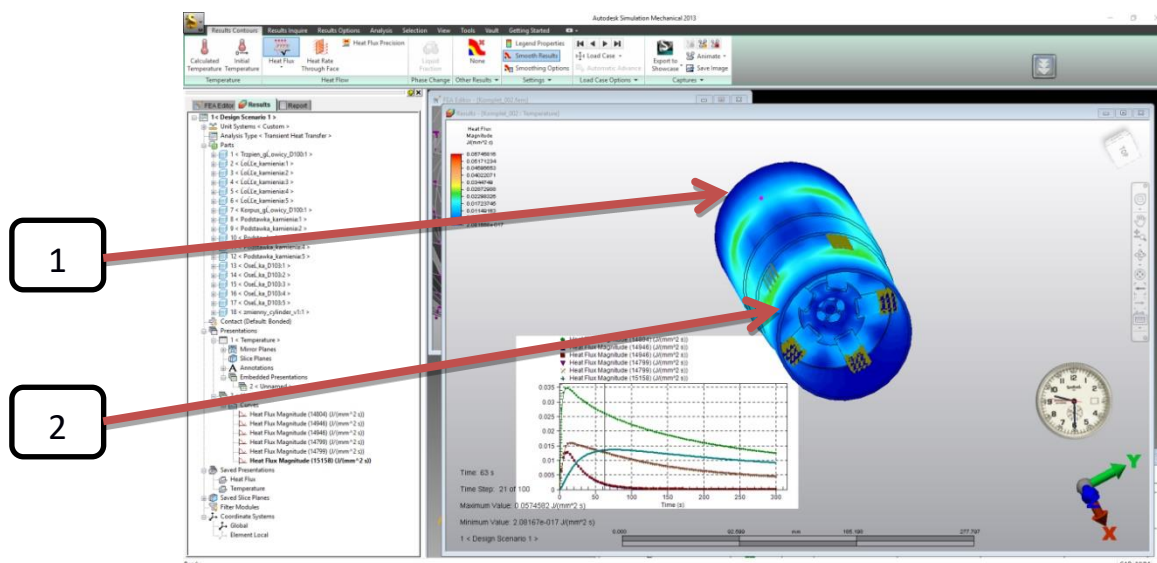
Rys. 152 przedstawia symulację przepływu strumienia ciepła z osełki o temperaturze $T_{os} = 40^{\circ}\text{C}$ do przedmiotu posiadającego temperaturę $T_{cyl} = 20^{\circ}\text{C}$ dla przekrojów o różnych grubościach ścianki, dla czasu przepływu ciepła $t = 300$ s. Na rys. 152 pokazano schematycznie zadane obciążenie cieplne dla osełki (poz. 2) oraz przedstawiono punkty dokonujące pomiarów przepływającego strumienia ciepła (poz. 1).



Rys. 152. Widok okna z programu Autodesk Simulation 2013: pomiar przepływu strumienia ciepła dla przekrojów o różnych grubościach ścianki; cyfra: 1 – sondy odczytujące w symulacji wartość przepływu strumienia ciepła w różnych miejscach cylindra, 2 – obciążenie cieplne osełek, 3 – wyniki dla poszczególnych sond (poz. 1)

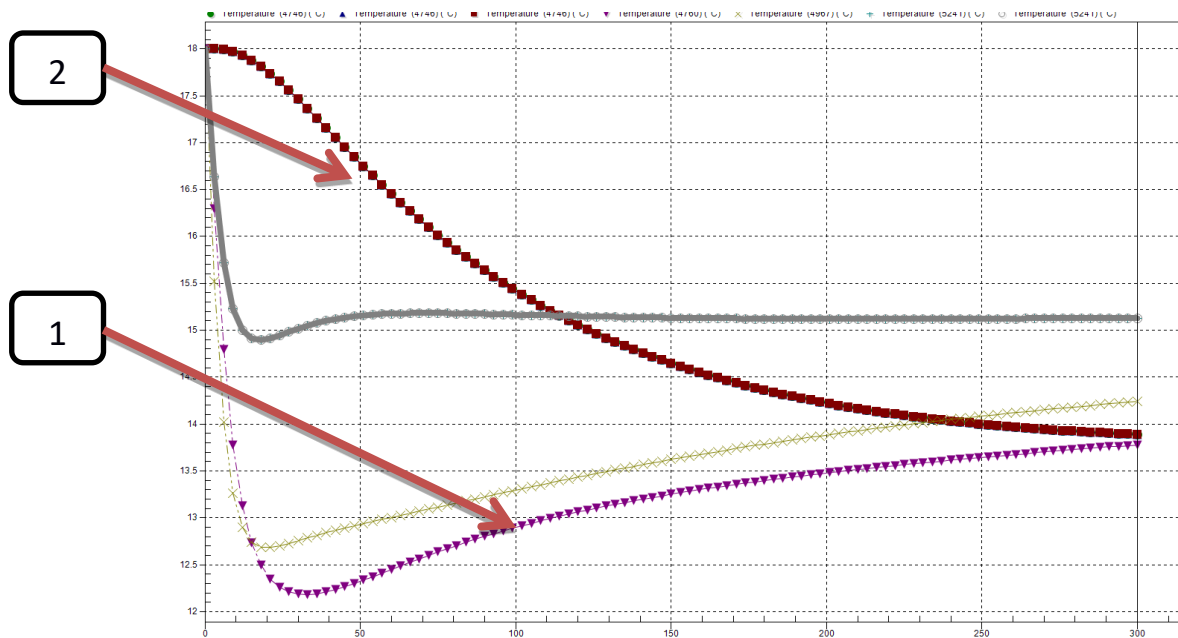
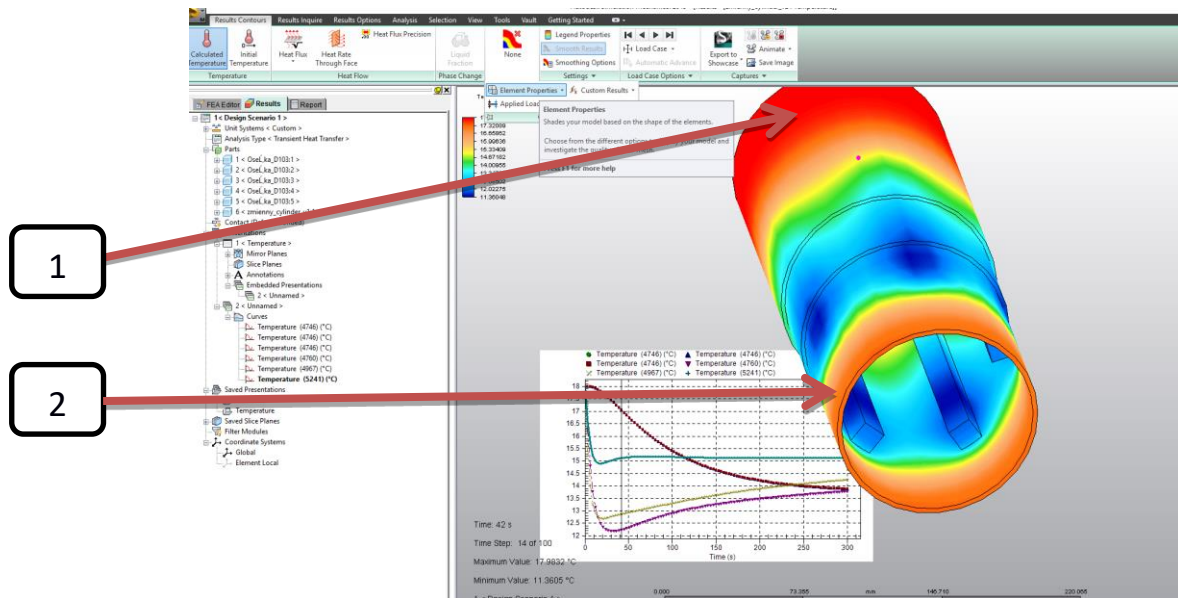
Na rys. 152 zauważyć można, że przepływ strumienia ciepła, od narzędzia obróbkowego poprzez przekrój przedmiotu obrabianego do otoczenia, w różnych miejscach ma różny charakter. Największą wartość zaobserwowano w przekroju najgrubszym. Z przeprowadzonej symulacji numerycznej procesu gładzenia wynika, że przy różnicy 20°C , między temperaturą osełek a temperatura cylindra, występuje 6 mikrometrów odkształcenia średnicy gładzonego otworu.

Na rys. 153 pokazano obraz zarejestrowany podczas symulacji komputerowych, prezentujący przepływ strumienia ciepła z oselki do cylindra. W przekrojach o różnych grubościach przepływ ciepła ma różną charakterystykę. Przekrój najcieńszy najszybciej nagrzewa się (poz. 2 rys. 153) w całej objętości materiału, co komplikuje przebieg gładzenia z powodu występujących odkształceń termicznych. Przepływ strumienia ciepła ma różną charakterystyką dla poszczególnych miejsc na cylindrze.



Rys. 153. Widok okna z programu Autodesk Simulation 2013 – pomiar przepływu strumienia ciepła; poszczególne krzywe obrazują zaobserwowany pomiar dla różnych przekrojów (1 - przekrój najgrubszy, 2 – przekrój najcieńszy)

Na rys. 154 pokazano obraz zarejestrowany podczas symulacji komputerowych, prezentujący spadek temperatury gładzonego przedmiotu w czasie t . Tempo spadku temperatury, w przekrojach o różnej grubości, ma różną charakterystykę. Najwięcej ciepła magazynuje się w najgrubszym przekroju (poz. 1 na rys. 154). Przekrój najcieńszy (poz. 2 na rys. 154) najszybciej nagrzewa się i ulega największym odkształceniom, co wykazane było na rys. 147.



Rys. 154. Widok okna z programu Autodesk Simulation 2013 –zmiana temperatury w czasie; poszczególne krzywe obrazują zaobserwowany pomiar dla różnych przekrojów (1 - przekrój najgrubszy, 2 – przekrój najcieńszy)

4.2.2.3. Wnioski z przeprowadzonych symulacji gładzenia

We wstępnych badaniach eksperymentalnych zaobserwowano zróżnicowany ubytek materiału tulei cienkościennych, w przekrojach o różnych grubościach ścianki, ze względu na różną wartość deformacji cieplnej, oraz ze względu na odkształcenia sprężyste występujące podczas obróbki. Przekroje najcieńsze sprawiają dużo trudności technologicznych związanych z niejednorodnością intensywności obróbki.

Odształcenia termiczne uniemożliwiają wykonanie obróbki w jednym etapie. Gładzenie należy wykonywać w kilku etapach, kolejno następujących po sobie, po uprzednim ostygnięciu przedmiotu do temperatury otoczenia. Kolejny etap gładzenia wymaga znajomości średnicy otworu z poprzedniego etapu obróbki. Pomiar wykonywane są w Izbie Kontroli w temperaturze 20°C, po wyrównaniu się temperatury przedmiotu gładzonego z temperaturą otoczenia.

Poznanie wpływu parametrów obróbki, szczególnie zmiennej kinematyki gładzenia, na uzyskiwaną temperaturę przedmiotu gładzonego, co z kolei wpływa na wielkość odkształceń termicznych, jest zagadnieniem bardzo istotnym w seryjnej obróbce przedmiotów cienkościennych i ze zmienną grubością ścianki.

Kontynuowanie badań z uwzględnieniem różnych zakresów zmiany obrotów głowicy w cyklu obróbkowym może dostarczyć pełnej informacji o możliwości sterowania procesem w taki sposób, aby wzrost temperatury w układzie *OUPN* był jak najmniejszy.

Z symulacji numerycznych wnioski nasuwają się takie same jak z badań eksperymentalnych. Odształcenia przekrojów o różnych grubościach mają zróżnicowaną wartość. Gładzenie należy przeprowadzać w kilku etapach, aby nie doprowadzać do zbytowego nagrzewania się przedmiotu gładzonego. Po każdym etapie należy ostudzić przedmiot do temperatury otoczenia.

4.3. Badania zasadnicze eksperymentalne

Po zakończeniu symulacji komputerowych przystąpiono do badań eksperymentalnych gładzenia. Celem tych badań było potwierdzenie hipotezy o korzystnym wpływie gładzenia ze zmienną kinematyką na zmniejszenie przyrostu temperatury oraz na poprawę odchyłki walcowości gładzonego otworu.

4.3.1. Gładzenie na centrum frezerskim pionowym CNC HAAS VF-3SS

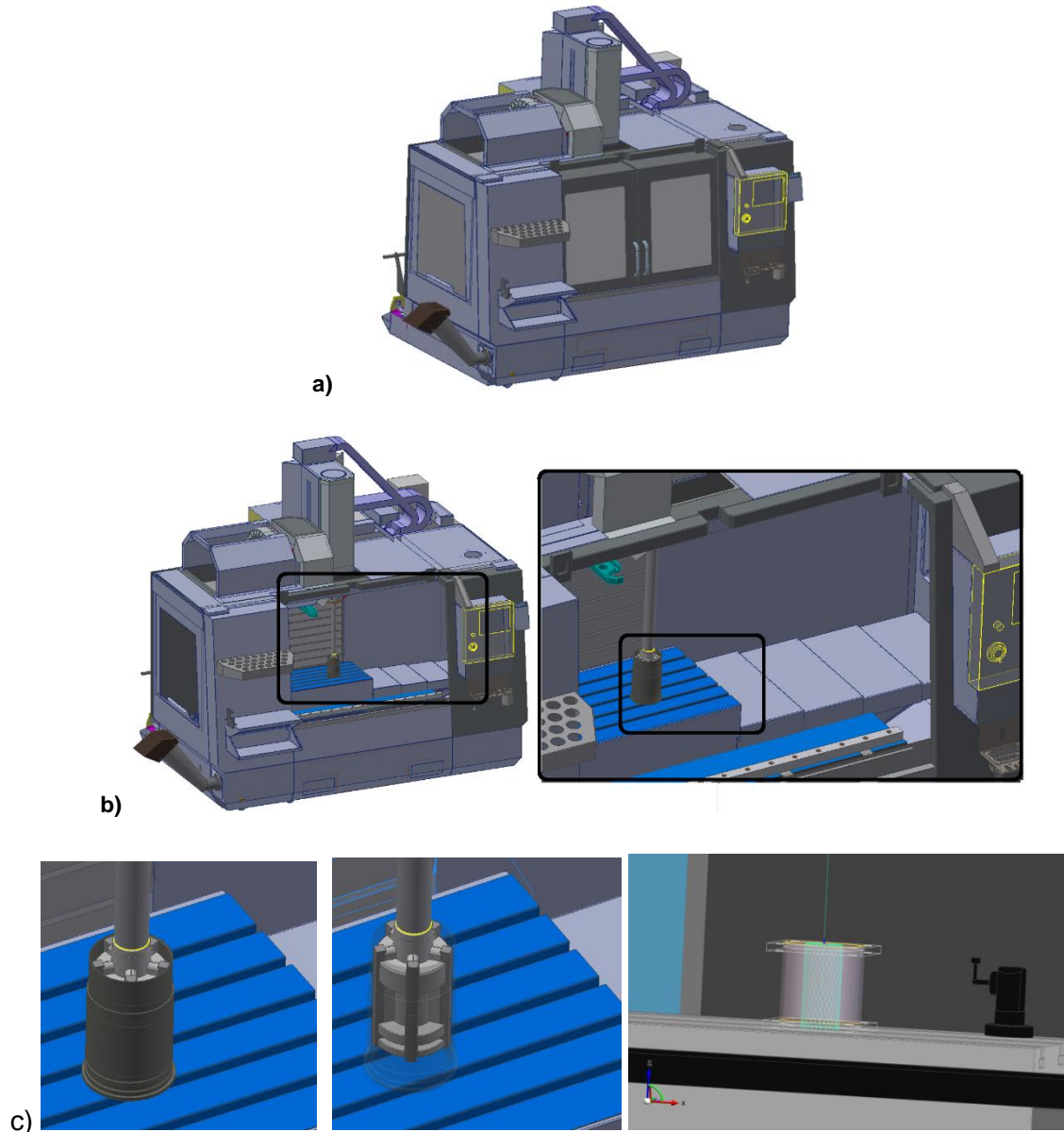
Na rys. 155 pokazano stanowisko badawcze eksperymentalne: pionowe centrum frezerskie CNC f-my HAAS (model VF-3SS) z oprzyrządowaniem do gładzenia f-my Honingtec. Frezarka posiada wrzeciono o mocy 22,4 kW oraz możliwość nastawiania obrotów w zakresie prędkości obrotowej $1 \div 12\,000$ obr/min, jak również możliwość sterowania posuwem osiowym głowicy w osi Z (w zakresie do 35,6 m/min). Pomiar temperatury przedmiotu obrabianego wykonywano za pomocą kamery termowizyjnej VIGOCam, parametry profilu chropowatości mierzono za pomocą profilografometru Mitutoyo Surftest SJ-210.

Obrabiarka umożliwia na przeprowadzanie badań gładzenia ze zmienną kinematyką, poprzez możliwość zadawania zmiennej prędkości obrotowej oraz zmiennej wartości posuwu głowicy.



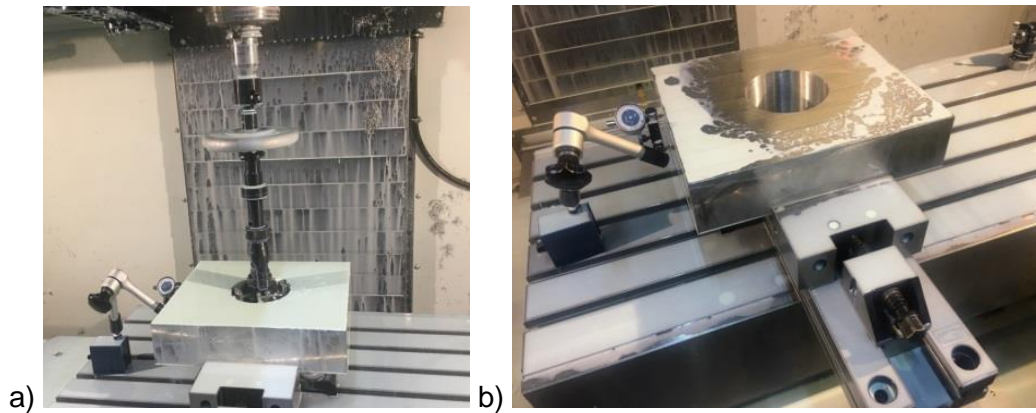
Rys. 155. Frezarka Haas VF-3SS z oprzyrządowaniem do gładzenia: 1) kamera termowizyjna, 2) chropo- watościomierz Mitutoyo SJ-210, 3) miernik natężenia dźwięku, 4) miernikiem drgań, 5) dysza powietrzna, średnicówka mikrometryczna (nie pokazana na zdjęciu)

Na rys. 156 zaprezentowano model stanowiska badawczego oraz gładzony cylinder ze trajektoriami obróbkowymi wygenerowanymi w systemie CAD / CAM. Model maszyny 3D pobrano ze strony producenta.

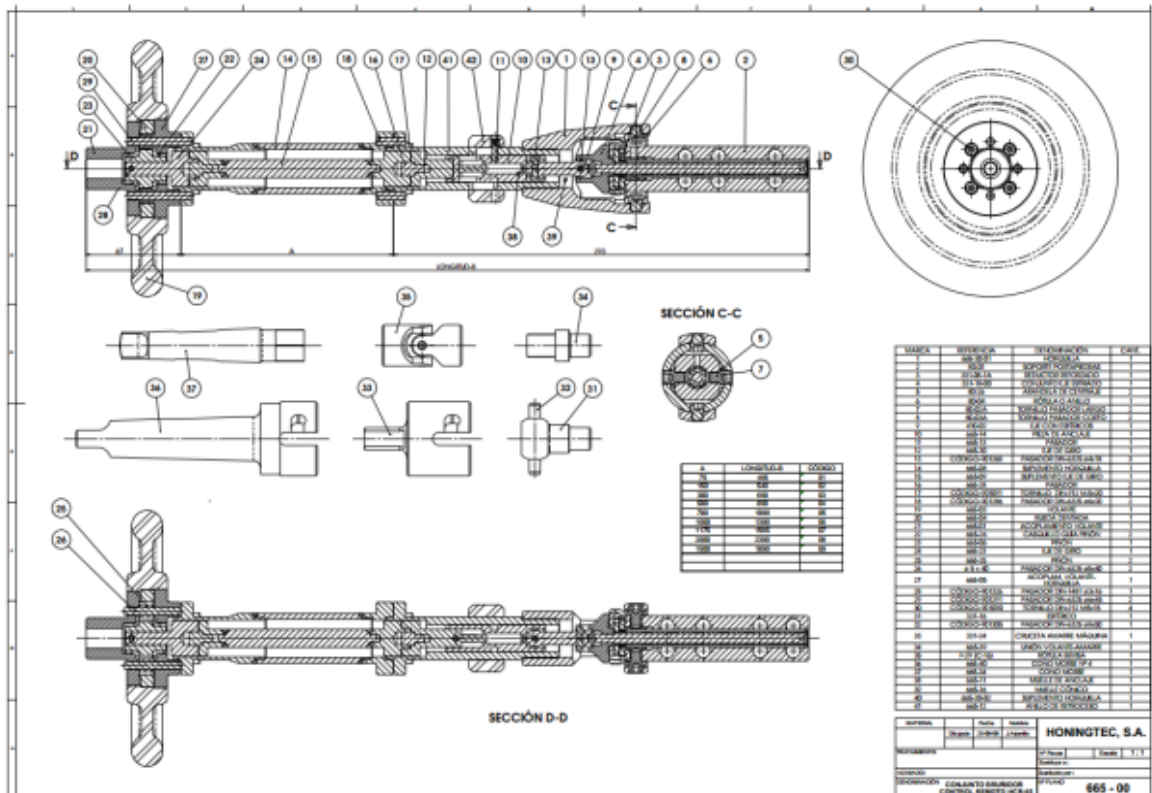


Rys. 156. Model frezarki CNC oraz ścieżki wygenerowane w programie EdgeCAM: a) model bryłowy całej obrabiarki, b) model bryłowy obrabiarki z widocznym przedmiotem obrabianym, c) przedmiot obrabiany i ścieżki obróbkowe wygenerowane w programie EdgeCAM

Na rysunkach 157 i 158 pokazano stanowisko badawcze, oprzyrządowanie do gładzenia f-my Honingtec oraz przedmiot gładzony.

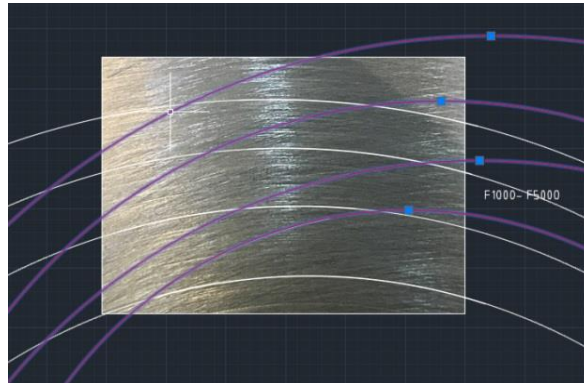


Rys. 157. Stanowisko badawcze: a) oprzyrządowanie do gładzenia f-my Honingtec, b) przedmiot obrabiany



Rys. 158. Oprzyrządowanie do gładzenia f-my Honingtec użyte do przeprowadzenia badań gładzenia na pionowym centrum frezerskim HAAS VF-3SS

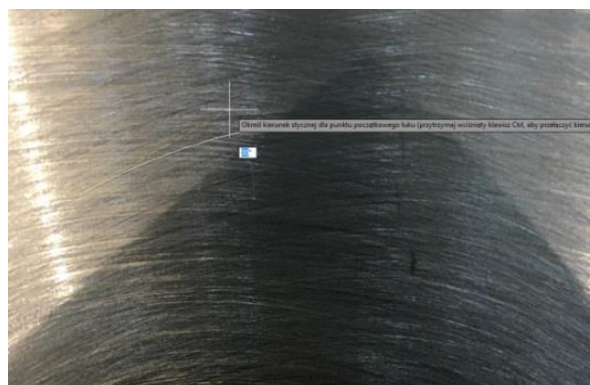
Na rys. 159 ÷ 161, zaprezentowano tekstury powierzchni gładzonych, uzyskane podczas obróbki ze zmiennymi parametrami kinematyki głowicy, stosowanymi w trakcie gładzenia na centrum HAAS VF-3SS (podczas obróbki ze zmienną kinematyką). Na poszczególnych obrazach pokazano różne tekstury powierzchni gładzonej, otrzymane wskutek gładzenia ze zmiennym posuwem osiowym.



Rys. 159. Widok okna Autodesk Mechanical ze zdjęciami powierzchni gładzonej wraz z okręgami wpisanymi w ślady rys wytworzonych przez ziarno ściernic



Rys. 160. Uzyskana tekstura powierzchni gładzonej dla zmiennej prędkości skoku w zakresie 1000 ÷ 3000 mm/min – średni kąt nachylenia stycznej do trajektorii ziarna 14°



Rys. 161. Uzyskana tekstura powierzchni gładzonej dla stałej prędkości skoku głowicy 5000 mm/min - średni kąt nachylenia stycznej do trajektorii ziarna 30°

4.3.1.2. Badania gładzenia ze stałymi parametrami kinematycznymi

W badaniach użyto oselek firmy Honingtec: NY102E1072 do obróbki zgrubnej, NY102E1512 do obróbki kształtującej oraz NY102E1812 do obróbki wykańczającej. Osełki były zamocowane w głowicy gładzącej „HN600”, zaś głowica na trzpieniu pokazanym na rys. 158. Poniżej przedstawiono wyniki procesu gładzenia przeprowadzonego na frezarce CNC dla stałej prędkości obrotowej i dla stałej wartości skoku głowicy. Badania przeprowadzono dla 3 zmiennych wejściowych (tab.9) dla 3 poziomów zmienności (wg planu pomiarowego PS/DK 3³).

Tab. 9. Zmienne wejściowe gładzenia

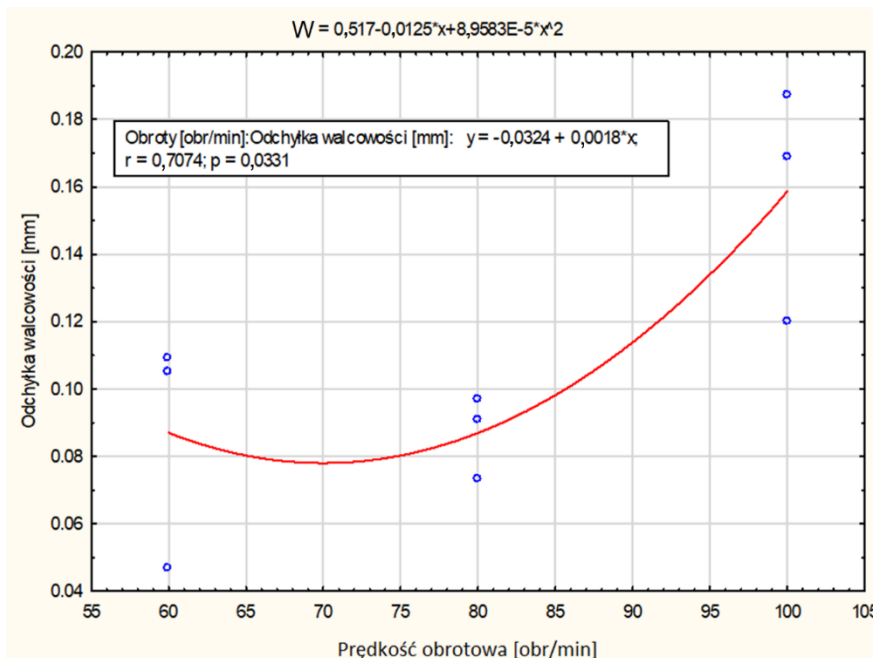
prędkość obrotowa n [obr/min]	/ poziomy X1	posuw V _{ax} [m/min]	/ poziomy X2 X2	oznaczenie ziarna	/ poziomy X3
80	+	5000	+	grube NY102E1071	+
60	0	3000	0	średnie NY102E1512	0
40	-	1000	-	drobne NY102E1812	-

W tab. 10 oraz na rys. 163 pokazano odchyłki walcowości gładzonego otworu

Tab. 10. Stałe wartości parametrów gładzenia (najniższą wartość odchyłki zaznaczono pogrubioną czcionką)

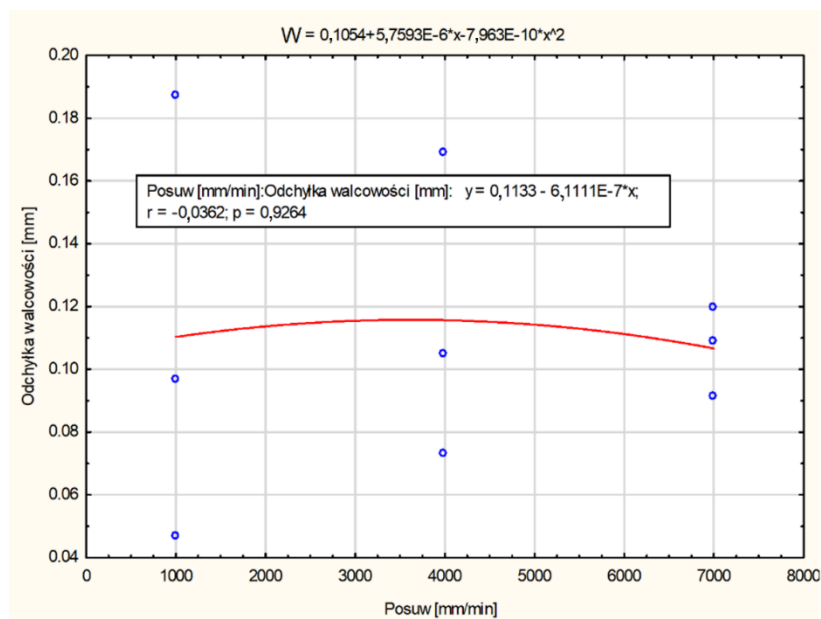
Lp.	posuw V _{ax} [mm/min]	prędkość obrotowa n [obr/min]	odchyłka walcowości W [mm]
1	1000	60	0,047
2	4000	80	0,073
3	7000	100	0,12
4	1000	80	0,097
5	4000	100	0,169
6	7000	60	0,109
7	1000	100	0,187
8	4000	60	0,105
9	7000	80	0,091

Na rys. 163 przedstawiono odchyłki walcowości gładzonego otworu, jakie uzyskano podczas gładzenia przeprowadzanego na centrum frezerskim Haas, **dla 3 poziomów stałej prędkości obrotowej głowicy.**



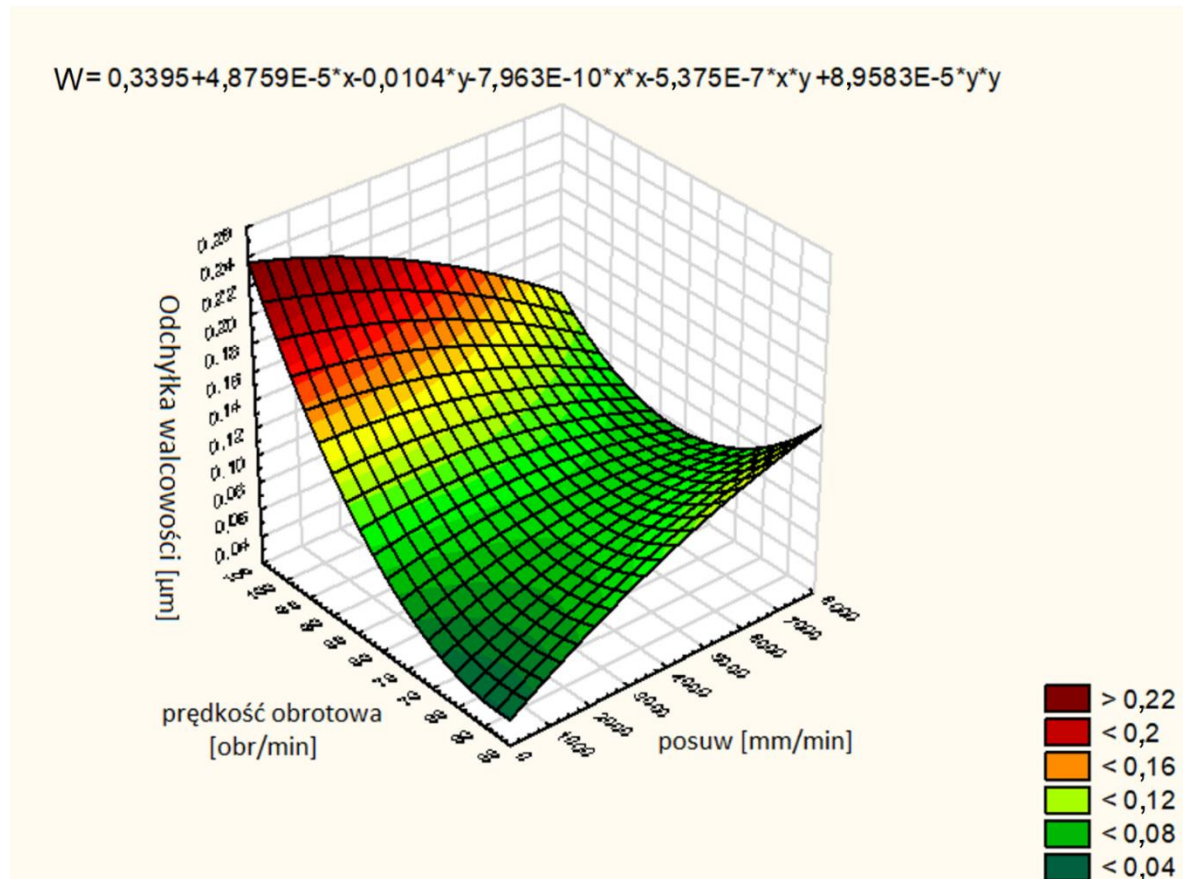
Rys. 163. Gładzenie tradycyjne – odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji prędkości obrotowej

Na rys. 164 podano odchyłki walcowości gładzonego otworu, jakie uzyskano podczas gładzenia przeprowadzanego na pionowym centrum frezerskim HAAS VF-3SS, **dla 3 wartości niezmiennego posuwu liniowego głowicy.**



Rys. 164. Gładzenie tradycyjne – odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji posuwu głowicy

Na rys. 165 przedstawiono uzyskane odchyłki walcowości gładzonego otworu dla obróbki przeprowadzanej dla różnych wartości stałego posuwu głowicy, oraz dla różnych wartości stałej prędkości obrotowej głowicy, czyli dla gładzenia ze zmienną kinematyką. Najmniejsza odchyłka kształtu występuje przy mniejszej prędkości obrotowej i stałej wartości posuwu.



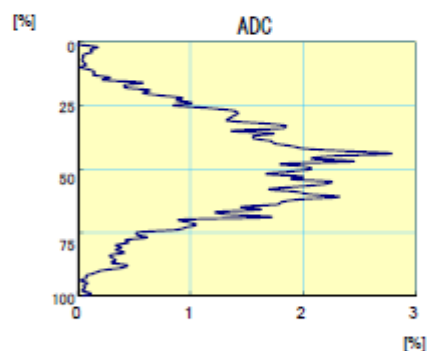
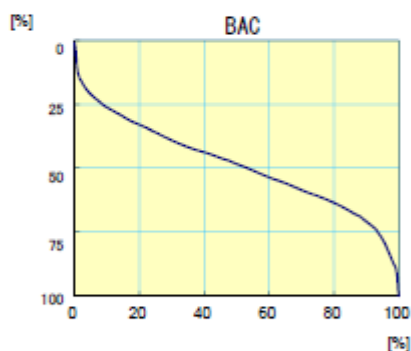
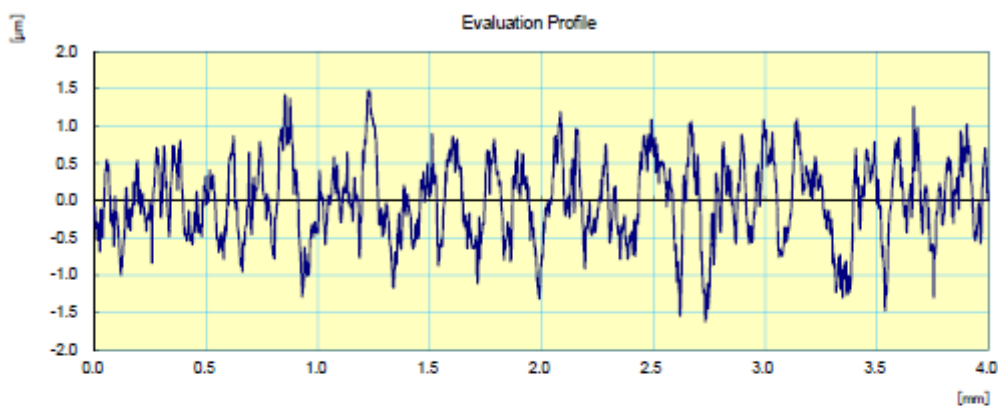
Rys. 165. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji stałej wartości parametrów posuwu osiowego V_{ax} i prędkości obrotowej n głowicy

Na rys. 166 przedstawiono przykładowy raport pomiarowy parametrów profilu chropowości powierzchni po gładzeniu.



21-Oct-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λ_s	2.5 μ m	Filter	GAUSS
Ra	0.438 μ m	Rt	3.093 μ m
Rq	0.533 μ m	Rk	1.495 μ m
Rz	2.516 μ m	Rpk	0.409 μ m
Rp	1.177 μ m	Rvk	0.563 μ m
Rv	1.339 μ m	Mr1	7.763 %
Rsk	-0.137	Mr2	91.138 %
Rc	1.694 μ m	A1	1.59
RSm	119.3 μ m	A2	2.49

Rys. 166. Przykładowy raport pomiarowy parametrów profilu chropowości z profilografometru Mitutoyo SurfTest SJ-210 dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min. Użyte ziarno NY102E181

W tab. 11 przedstawiono dane wejściowe dla badań procesu gładzenia na frezarce CNC ze stałymi parametrami obróbkowymi (stała wartość prędkości obrotowej n i stała wartość posuwu osiowego głowicy gładzącej V_{ax}). Parametry X_1 , X_2 i X_3 posiadały 3 poziomy: X_1 (80 / 60 / 40), X_2 (5000 / 3000 / 1000), X_3 (NY102E181 / NY102E151 / NY102E101).

Tab. 11. Dane wejściowe dla badań procesu gładzenia na frezarce CNC ze stałymi parametrami obróbkowymi

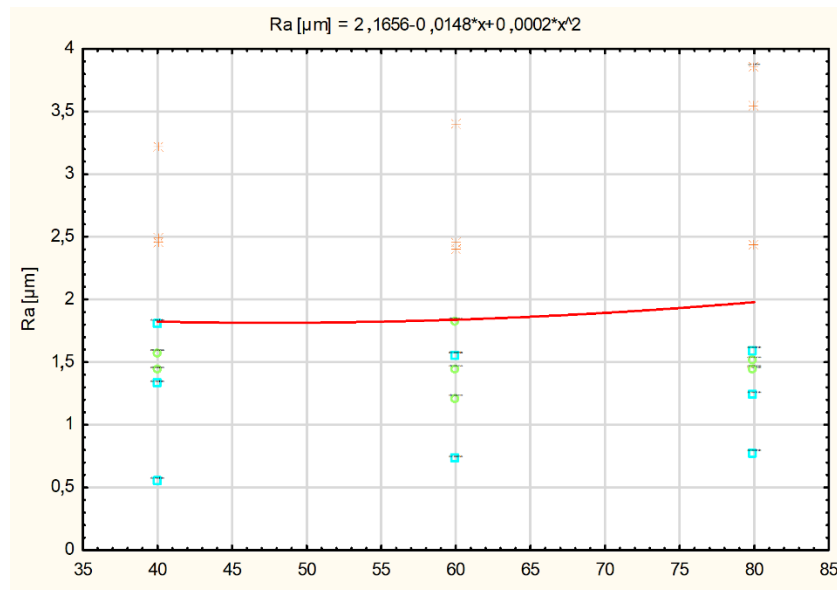
Lp.	X_1 prędkość obrotowa n [obr/min]	X_2 posuw głowicy V_{ax} [mm/min]	X_3 oznaczenie wielkości ziarna	poziom czynnika X_1	poziom czynnika X_2	poziom czynnika X_3
p1	80	5000	NY102E181	+	+	+
p2	80	5000	NY102E151	+	+	O
p3	80	5000	NY102E101	+	+	-
p4	80	3000	NY102E181	+	O	+
p5	80	3000	NY102E151	+	O	O
p6	80	3000	NY102E101	+	O	-
p7	80	1000	NY102E181	+	-	+
p8	80	1000	NY102E151	+	-	O
p9	80	1000	NY102E101	+	-	-
p10	60	5000	NY102E181	O	+	+
p11	60	5000	NY102E151	O	+	O
p12	60	5000	NY102E101	O	+	-
p13	60	3000	NY102E181	O	O	+
p14	60	3000	NY102E151	O	O	O
p15	60	3000	NY102E101	O	O	-
p16	60	1000	NY102E181	O	-	+
p17	60	1000	NY102E151	O	-	O
p18	60	1000	NY102E101	O	-	-
p19	40	5000	NY102E181	-	+	+
p20	40	5000	NY102E151	-	+	O
p21	40	5000	NY102E101	-	+	-
p22	40	3000	NY102E181	-	O	+
p23	40	3000	NY102E151	-	O	O
p24	40	3000	NY102E101	-	O	-
p25	40	1000	NY102E181	-	-	+
p26	40	1000	NY102E151	-	-	O
p27	40	1000	NY102E101	-	-	-

Tabela 12 zawiera wyniki pomiarów profilu chropowatości uzyskanego w etapie badań wykonywanych na frezarce CNC przeprowadzanych ze stałą prędkością obrotową głowicy.

Tab. 12. Zestawienie danych pomiarowych w badaniach przeprowadzonych na frezarce CNC ze stałą prędkością obrotową i ze stałą wartością posuwu głowicy (wg Tab.11)

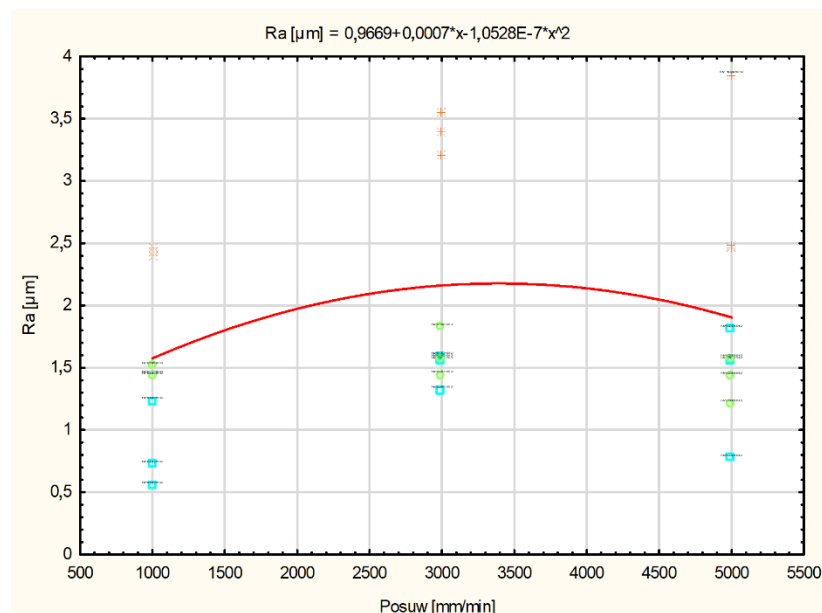
WYNIKI																
Lp.	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	Rsk	Rc	RSm	Rt	Rk	Rpk	Rvk	Mr1	Mr2	A1	A2
1	3,85	4,91	24,2	11,2	13,1	-0,3	14,7	136	31,7	11,8	4,1	7,59	8,23	87,3	17,9	46,6
2	0,77	1	5,79	2,69	3,1	-0,3	3,06	79,2	8,69	2,32	1,08	1,49	9,42	87,9	5,02	8,99
3	1,43	1,86	9,42	4,3	5,11	-0,37	5,67	95,17	13,89	3,9	2,09	3,08	6,53	58,43	10,91	23,82
4	3,55	4,46	21,89	10,09	11,8	-0,3	13,25	139,45	26,44	10,82	4,31	5,93	7,22	85,47	15,41	43,28
5	1,59	2	10,7	5,4	5,29	-0,1	6,11	79,5	12,7	5,14	2,24	2,24	7,29	88,1	8,04	13,4
6	1,44	1,96	9,59	2,59	6,99	-1,55	6,1	150,45	14,92	2,86	1,37	4,85	7,74	79,01	5,53	51,14
7	2,44	3,09	15,2	8,16	7,03	-0	9,36	154	23,6	6,63	4,93	4,75	10,6	85,4	27,4	34,5
8	1,23	1,59	8,54	4,07	4,47	-0,3	4,85	72,8	12,1	3,57	1,9	2,63	9,06	86,3	8,45	17,9
9	1,51	1,97	10,09	4,76	5,32	-0,3	6,11	99,16	14,72	4,13	2,36	3,17	6,91	59,89	12,64	24,04
10	2,46	3,04	14,5	6,83	7,64	-0,3	9,03	150	19,4	7,61	2,74	3,59	6,82	86	9,13	27,5
11	1,55	1,98	10,3	5,11	5,23	-0,1	5,84	71,2	12,6	4,79	2,29	2,44	9,52	88	10,9	14,6
12	1,21	1,59	8,1	3,47	4,63	-0,47	4,97	90,38	11,98	3,09	1,74	2,89	5,77	52,03	9,03	24,7
13	3,4	4,26	20,39	9,92	10,47	-0,21	13,14	137,35	27,4	10,07	4,78	5,74	9,81	87,32	23,32	36,55
14	1,55	1,98	10,8	5,29	5,5	-0,07	5,79	73,52	13,1	4,8	2,24	2,4	9,87	87,62	11,16	14,86
15	1,82	2,35	12,12	6,34	5,78	0,007	7,3	106,0	17,6	5,23	3,24	3,34	8,03	65,35	18,04	21,74
16	2,4	3,18	17,3	8,9	8,41	0,01	10,6	146	23,7	6,79	4,28	4,49	11,2	86,7	24,7	30,1
17	0,72	0,93	5,6	2,67	2,93	-0,2	2,94	71,6	6,9	2,27	1,01	1,31	8,23	88,7	4,13	7,48
18	1,44	1,89	9,68	4,31	5,36	-0,44	5,88	101,2	14,19	3,84	2,11	3,25	6,75	60,21	11,07	26,27
19	2,49	3,14	15,3	7,76	7,52	-0,2	9,41	141	22,6	7,93	3,18	4,07	7,77	87,6	12,3	25,4
20	1,81	2,33	12,2	5,46	6,78	-0,4	6,98	87,2	16,1	5,3	2,36	3,44	9,77	86,4	11,3	23,6
21	1,57	2,06	10,46	4,54	5,91	-0,57	6,39	114,17	15,46	4,07	2,27	3,66	7,4	66,64	11,76	30,65
22	3,21	4,14	21,47	9,93	11,54	-0,33	12,26	153,37	29,14	9,94	4,25	6,17	8,1	87,46	17,21	38,16
23	1,32	1,68	9,05	4,22	4,83	-0,23	5,1	78,7	11,43	4,12	1,7	2,17	8,74	88,14	7,58	13,09
24	1,57	2,07	10,72	4,94	5,77	-0,37	6,49	105,08	15,42	4,29	2,35	3,37	7,31	63,76	12,56	25,91
25	2,46	3,13	16	8,3	7,69	0,06	9,29	124	23,1	7,52	3,78	4,15	10,3	89,4	20,1	22,4
26	0,55	0,71	4,29	2,19	2,1	0,04	2,25	61,1	5,61	1,72	0,9	0,92	9,33	89,4	4,2	4,89
27	1,43	1,87	9,52	4,27	5,25	-0,43	5,79	99,72	14,01	3,8	2,11	3,2	6,65	59,25	11,08	25,8

Wzrost wartości (stałej) prędkości obrotowej głowicy wpływa na wzrost wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_a (rys. 167).



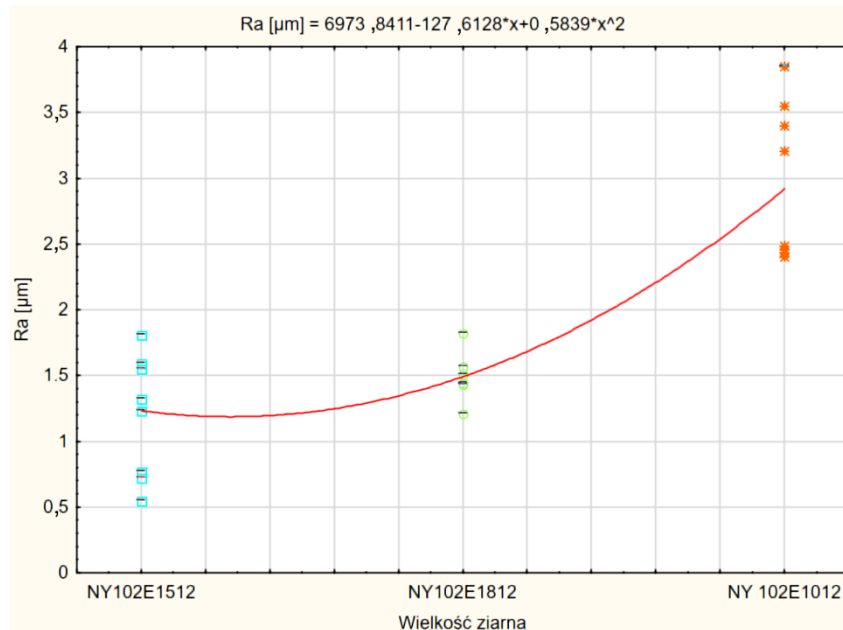
Rys. 167. Wykres zależności parametru R_a w funkcji prędkości obrotowej głowicy i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika - ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)

Wzrost wartości (stałego) posuwu głowicy, do wartości 3000 mm/min, wpływa na wzrost wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_a (rys. 168)



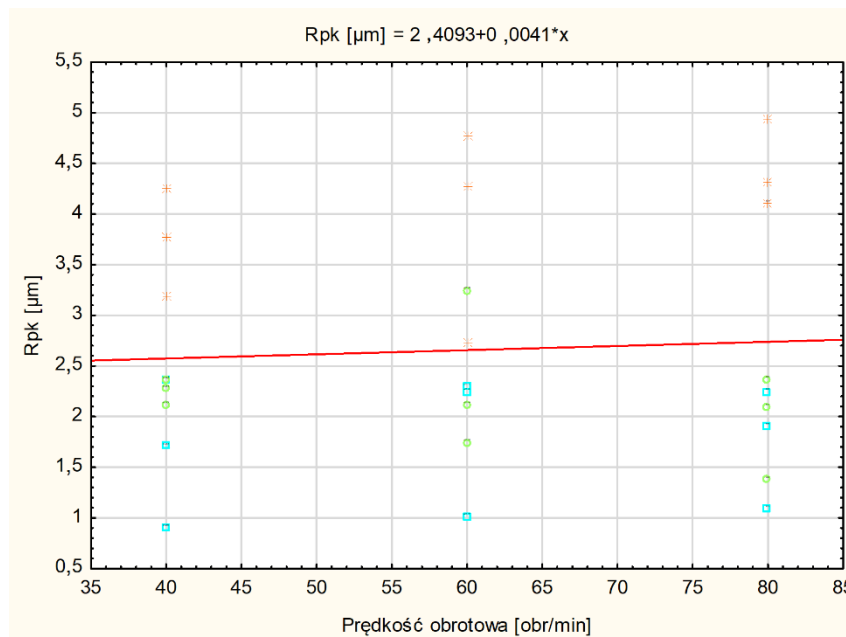
Rys. 168. Wykres zależności parametru R_a w funkcji posuwu i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika - ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)

Drobniejsze ziarno wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_a (rys. 169)



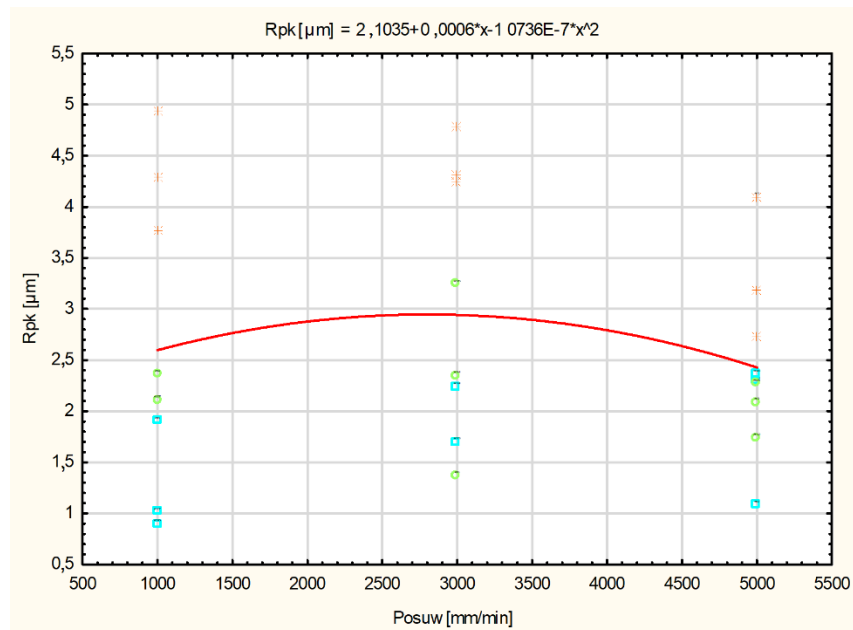
Rys. 169. Wykres zależności parametru R_a w funkcji wielkości ziarna ściernego w oselce (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)

Wzrost wartości prędkości obrotowej głowicy wpływa na wzrost wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{pk} (rys. 170)



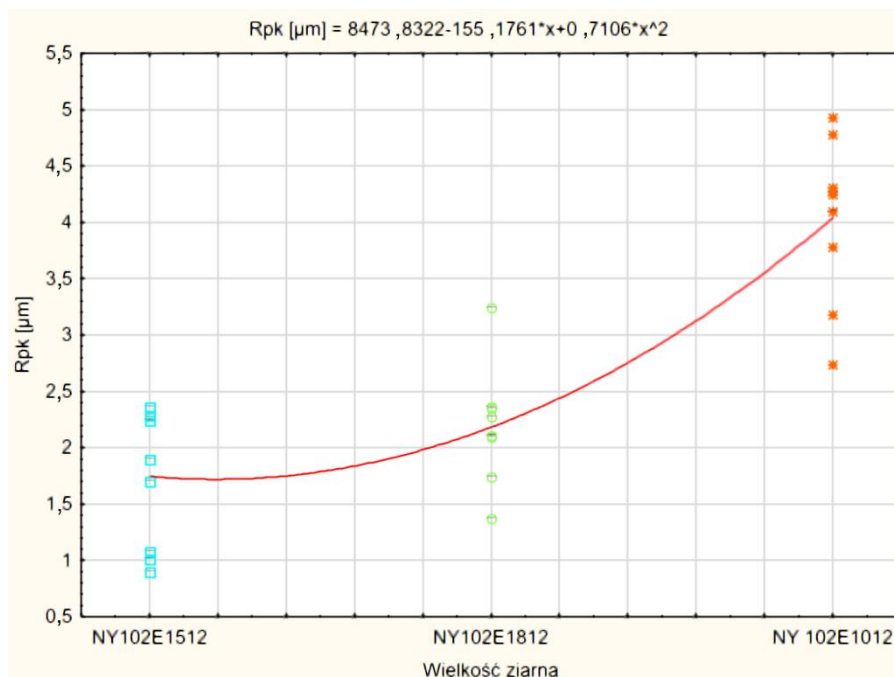
Rys. 170. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji prędkości obrotowej głowicy i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)

Wzrost posuwu głowicy, do wartości 3000 mm/min, wpływa na przyrost wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{pk} (rys. 171)



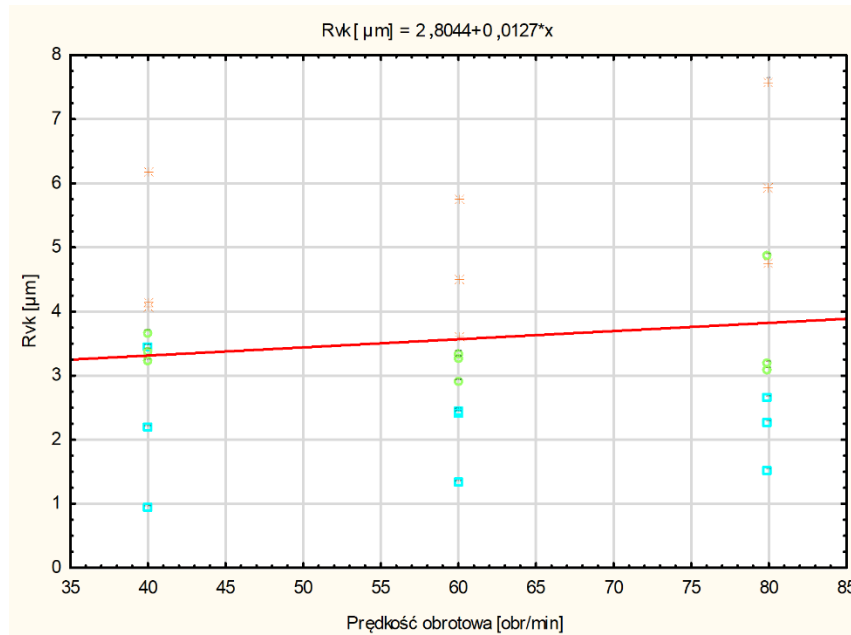
Rys. 171. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji posuwu wzdłużnego i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)

Mniejsze ziarno wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{pk} (rys. 172)



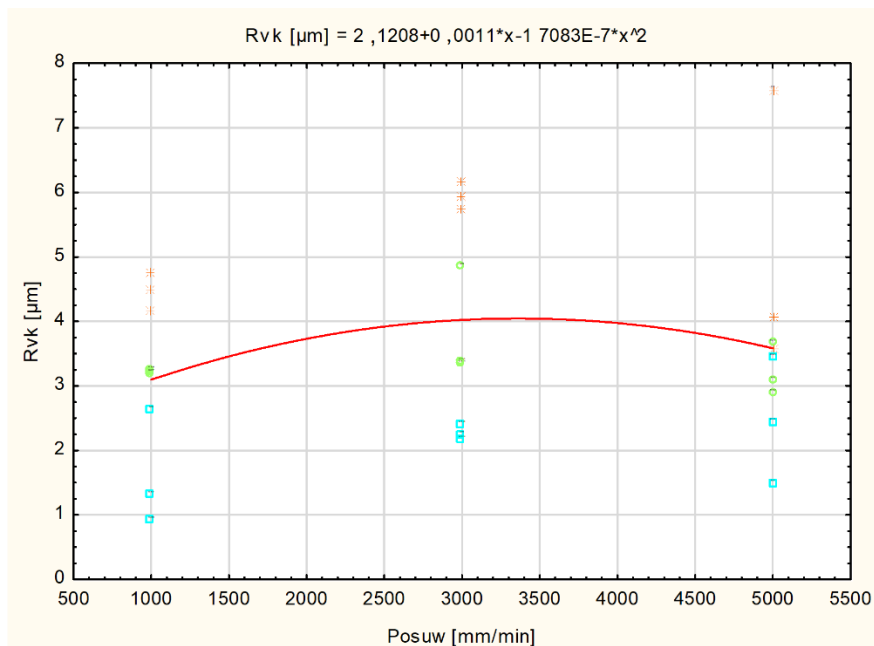
Rys. 172. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji wielkości ziarna ściernego w oselce

Wzrost wartości prędkości obrotowej głowicy wpływa na wzrost wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{vk} (rys. 173).



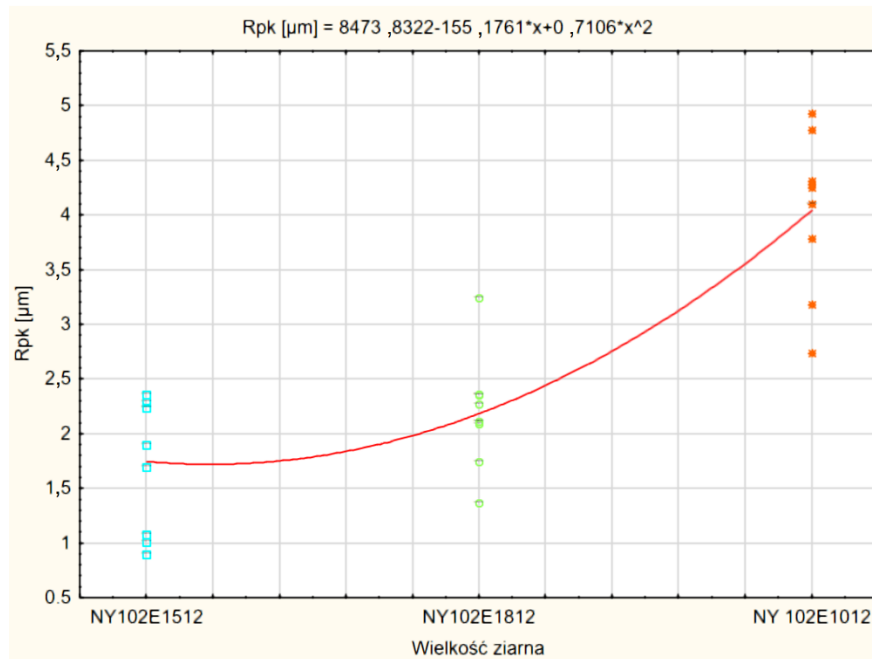
Rys. 173. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji prędkości obrotowej głowicy i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)

Wzrost posuwu głowicy do wartości 3300 mm/min wpływa na wzrost wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{vk} (rys. 174).



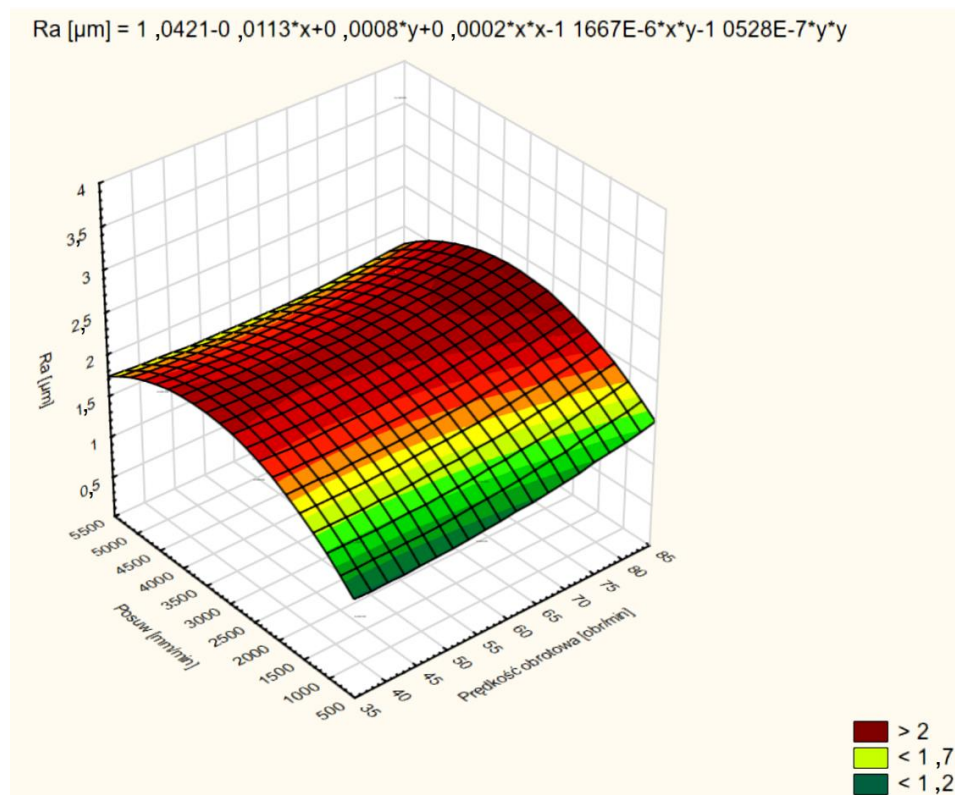
Rys. 174. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji wartości posuwu głowicy i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)

Mniejsze ziarno wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{pk} (rys. 175).



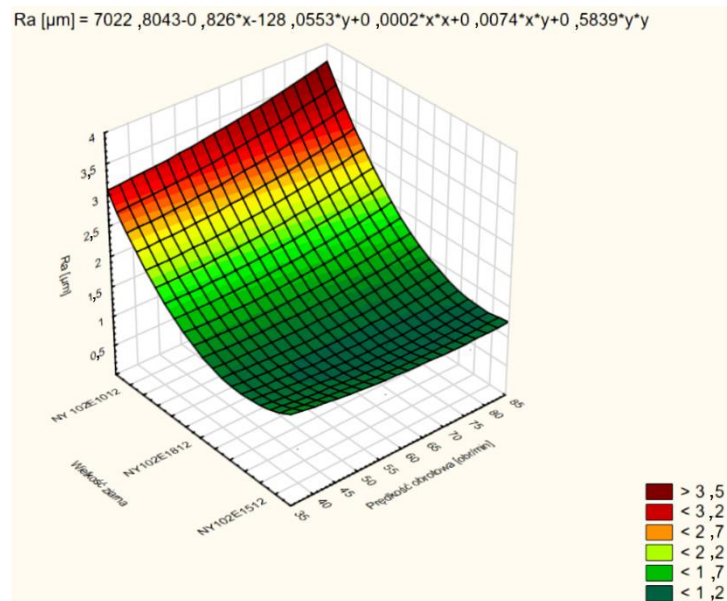
Rys. 175. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji wielkości ziarna ściernego w oselce

Mniejsza wartość posuwu i prędkości obrotowej wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_a (rys. 176).



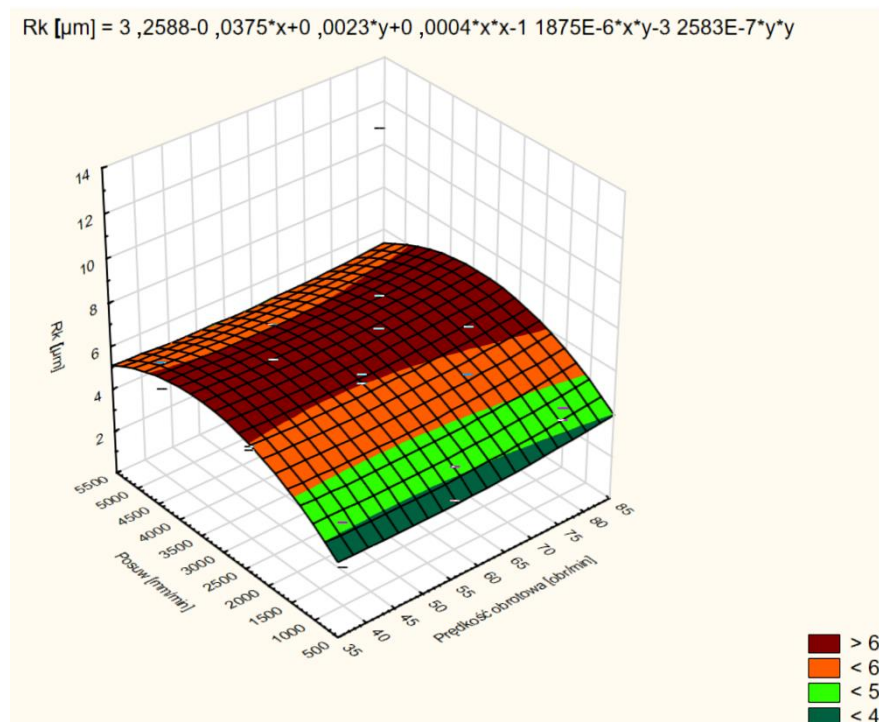
Rys. 176. Wykres zależności parametru R_a w funkcji (stałych parametrów) posuwu i prędkości obrotowej

Mniejsza wartość prędkości obrotowej i średnia wielkość ziarna wpływają na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_a (rys. 177).



Rys. 177. Wykres zależności parametru R_a w funkcji (stałych parametrów) wielkości ziarna i prędkości obrotowej

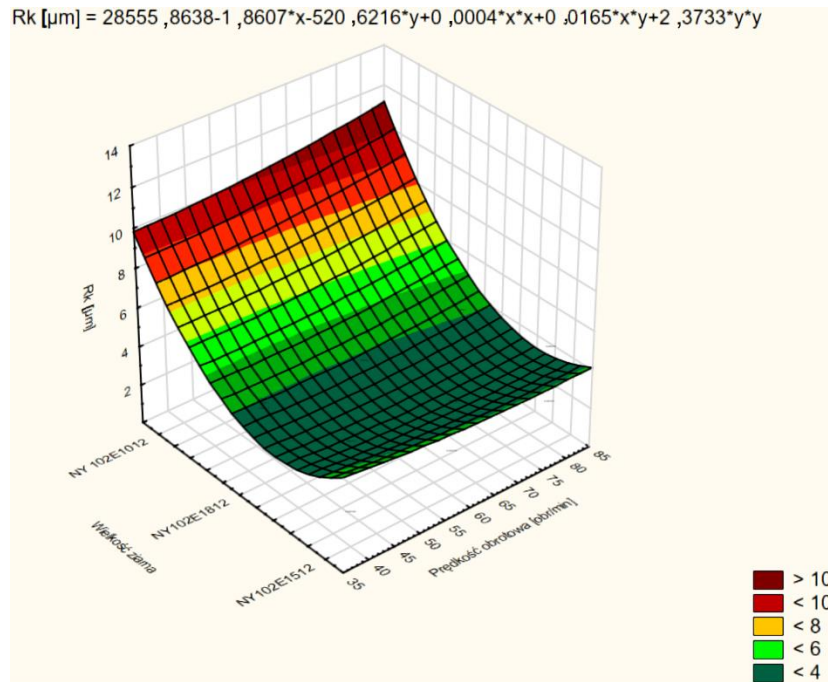
Mniejsza wartość posuwu i prędkości obrotowej wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_k (rys. 178).



Rys. 178. Wykres zależności parametru R_k w funkcji (stałych parametrów) posuwu i prędkości obrotowej

Mniejsza wartość prędkości obrotowej i średnia wielkość ziarna wpływają na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_k (rys. 179)

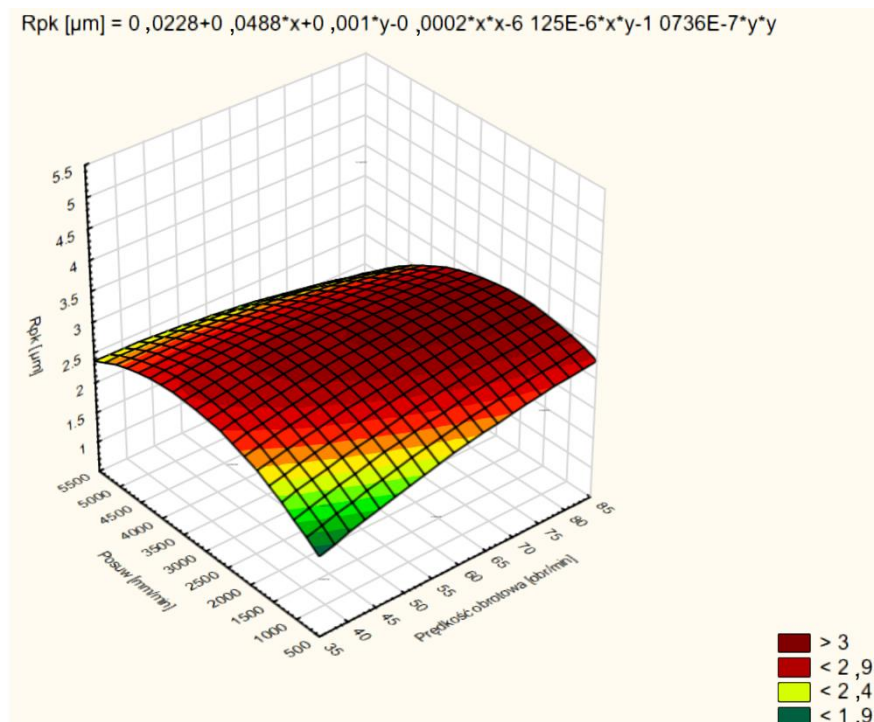
$$R_k [\mu\text{m}] = 28555,8638 - 1,8607 \cdot x - 520,6216 \cdot y + 0,0004 \cdot x \cdot x + 0,0165 \cdot x \cdot y + 2,3733 \cdot y \cdot y$$



Rys. 179. Wykres zależności parametru R_k w funkcji (stałych parametrów) wielkości ziarna i prędkości obrotowej

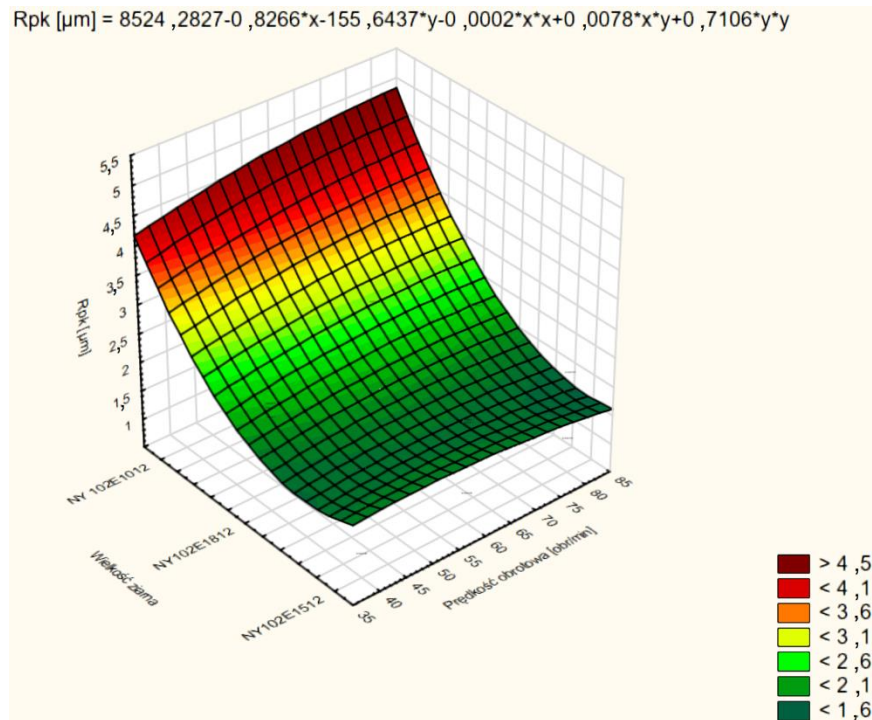
Mniejsza wartość posuwu i prędkości obrotowej wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{pk} (rys. 180)

$$R_{pk} [\mu\text{m}] = 0,0228 + 0,0488 \cdot x + 0,001 \cdot y - 0,0002 \cdot x \cdot x - 6,125 \cdot 10^{-6} \cdot x \cdot y - 1,0736 \cdot 10^{-7} \cdot y \cdot y$$



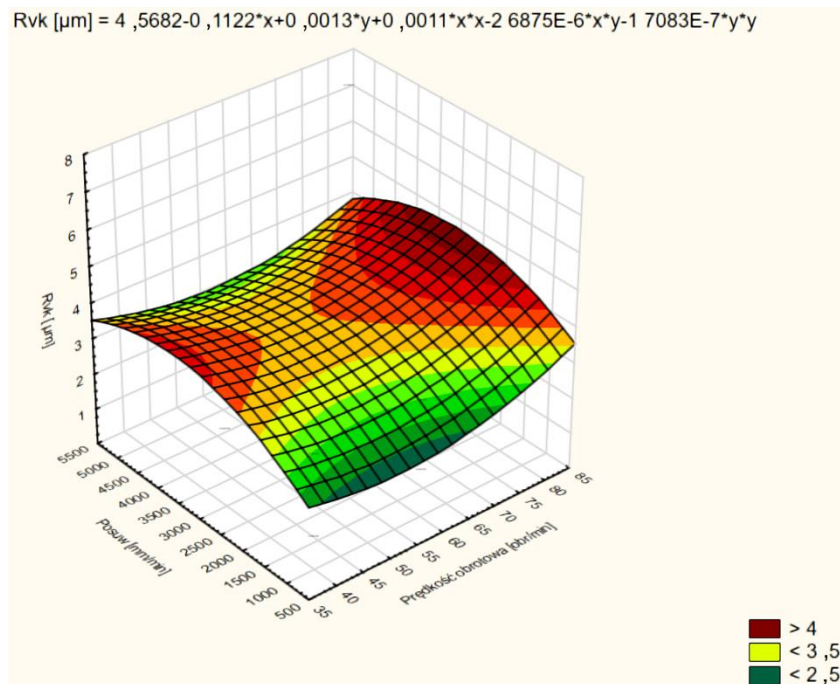
Rys. 180. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji (stałych parametrów) posuwu i prędkości obrotowej

Mniejsza wartość prędkości obrotowej i średnia wielkość ziarna wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{pk} (rys. 181)



Rys. 181. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji (stałych parametrów) wielkości ziarna i prędkości obrotowej

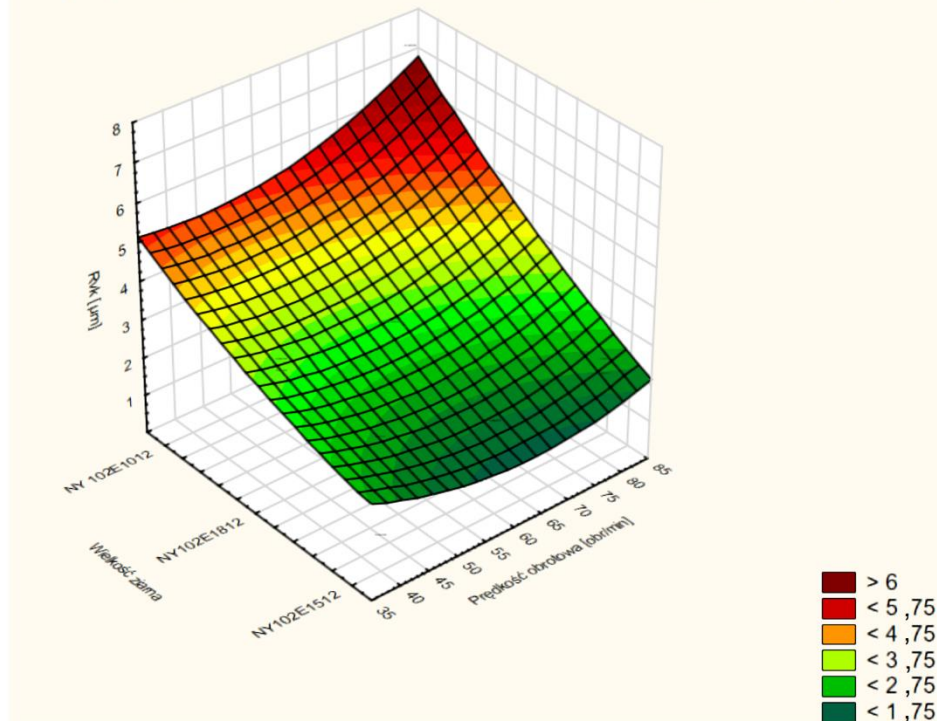
Mniejsza wartość posuwu i prędkości obrotowej wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{vk} (rys. 182)



Rys. 182. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji (stałych parametrów) posuwu i prędkości obrotowej

Mniejsza wartość prędkości obrotowej i średnia wielkość ziarna wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{vk} (rys. 183)

$$R_{vk} [\mu\text{m}] = 2571,7083 - 1,9765 \cdot x - 47,1547 \cdot y + 0,0011 \cdot x \cdot x + 0,0169 \cdot x \cdot y + 0,2167 \cdot y \cdot y$$



Rys. 183. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji (stałych parametrów) wielkości ziarna i prędkości obrotowej

4.3.1.3. Wnioski z gładzenia ze stałymi parametrami kinematycznymi

1. Wzrost wartości (stałej) prędkości obrotowej głowicy wpływa na wzrost wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_a
2. Wzrost wartości (stałego) posuwu głowicy wpływa na wzrost wartości parametrów profilu chropowatości powierzchni: R_a , R_{vk}
3. Mniejsza wartość (stałego) posuwu i prędkości obrotowej wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{pk}
4. Wzrost wartości (stałej) prędkości obrotowej głowicy wpływa na wzrost wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_{pk}
5. Mniejsza wartość posuwu i prędkości obrotowej wpływa na obniżenie wartości parametru profilu chropowatości powierzchni R_k

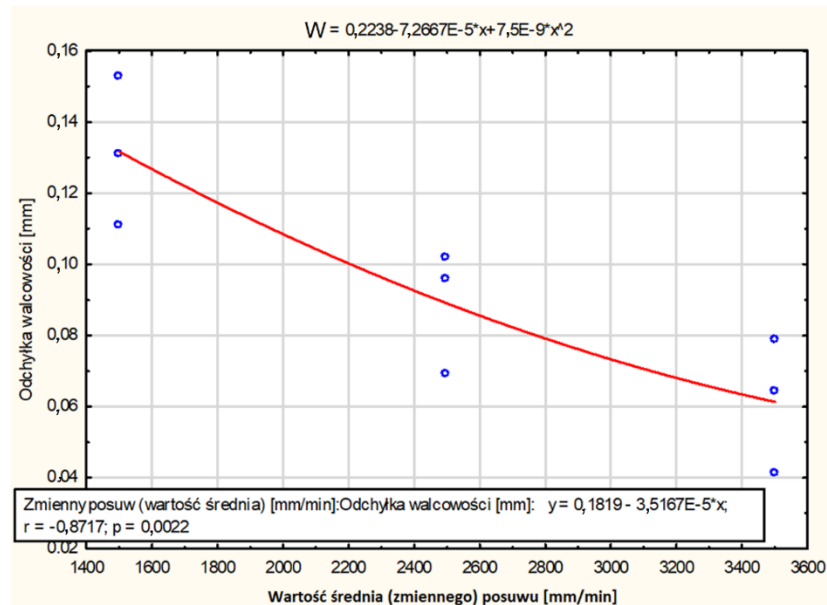
4.3.1.4. Badania gładzenia ze zmiennymi parametrami kinematycznymi

W tab. 13 zamieszczono uzyskane odchyłki walcowości otworu na centrum HAAS VF-3SS, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną wartością posuwu osiowego głowicy (czyli ze zmienną kinematyką).

Tab. 13. Zmienne wartości posuwu podczas gładzenia (najniższą wartość odchyłki zaznaczono pogrubioną czcionką)

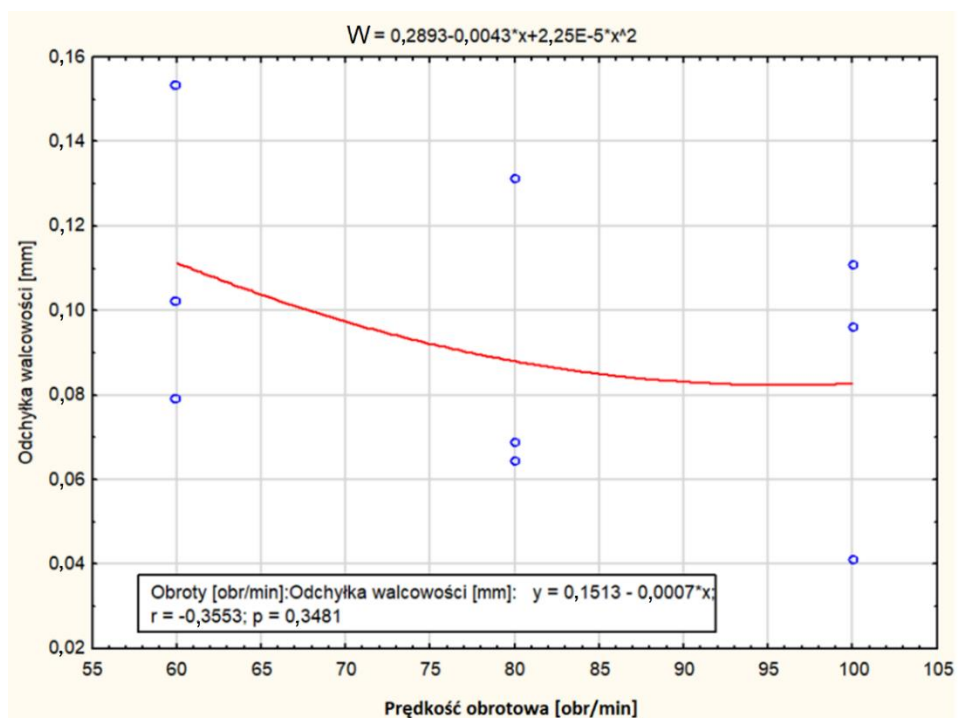
Lp.	zmienny posuw V_{ax} [mm/min]	Prędkość obrotowa n [obr/min]	posuw zmienny - wartość średnia [mm/min]	odchyłka walcowości W [mm]
1	1000 ÷ 2000	60	1500	0,153
2	1000 ÷ 4000	80	2500	0,069
3	1000 ÷ 6000	100	3500	0,041
4	1000 ÷ 2000	80	1500	0,131
5	1000 ÷ 4000	100	2500	0,096
6	1000 ÷ 6000	60	3500	0,079
7	1000 ÷ 2000	100	1500	0,111
8	1000 ÷ 4000	60	2500	0,102
9	1000 ÷ 6000	80	3500	0,064

Na rys. 184 przedstawiono odchyłki walцовości gładzonego otworu dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną wartością posuwu osiowego głowicy (czyli ze zmienną kinematyką). Im większa wartość średnia (zmiennego) posuwu głowicy, tym mniejsza odchyłka kształtu.



Rys. 184. Odchyłka walцовości W gładzonego otworu w funkcji wartości średniej posuwu

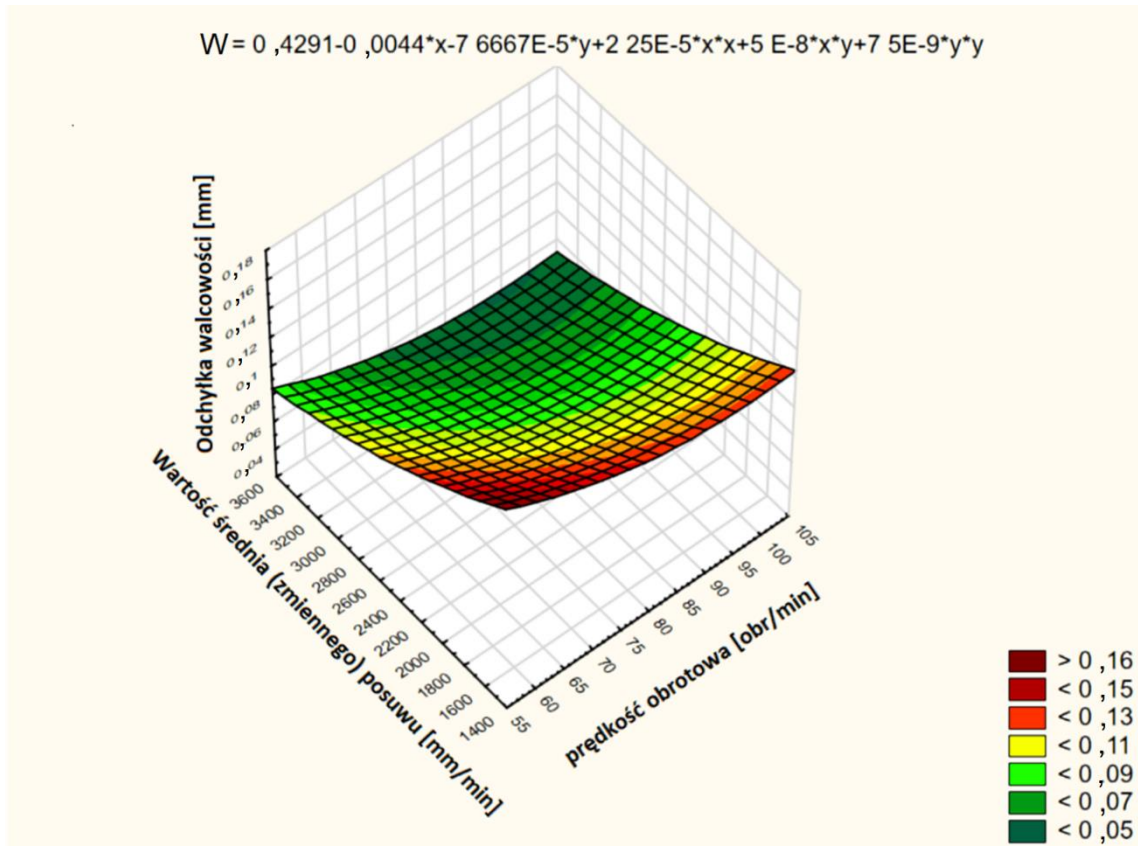
Na rys. 185 zaprezentowano uzyskane odchyłki walцовości gładzonego otworu dla gładzenia przeprowadzanego z różnymi prędkościami obrotowymi głowicy. Im większa prędkość obrotowa głowicy tym mniejsza odchyłka kształtu.



Rys. 185. Wpływ prędkości obrotowej głowicy na odchyłkę walцовości W gładzonego otworu



Na rys. 186 zauważyć można, że wraz ze wzrostem wartości średniej (zmiennego) posuwu i dla większej wartości prędkości obrotowej maleje odchyłka walcowości gładzonego otworu.



Rys. 186. Wpływ wartości średniej (zmiennego) posuwu i stałej prędkości obrotowej na odchyłkę walcowości W obrabianego otworu

W tab. 14 przedstawiono dane wejściowe dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową oraz ze zmienną prędkością skoku głowicy, czyli ze zmienną kinematyką.

Tab. 14. Dane wejściowe do badań eksperymentalnych prowadzonych na frezarce CNC ze stałymi i ze zmiennymi warunkami kinematycznymi

Lp.	posuw V_{ax} [mm/min]	prędkość obrotowa n [obr/min]	wielkość ziarna
1	1000	60	NY102E1012
2	4000	80	NY102E1012
3	7000	100	NY102E1012
4	1000	80	NY102E1012
5	4000	100	NY102E1012
6	7000	60	NY102E1012
7	1000	100	NY102E1012
8	4000	60	NY102E1012
9	7000	80	NY102E1012
10	1000 ÷ 2000	60	NY102E1012
11	1000 ÷ 4000	80	NY102E1012
12	1000 ÷ 6000	100	NY102E1012
13	1000 ÷ 2000	80	NY102E1012
14	1000 ÷ 4000	100	NY102E1012
15	1000 ÷ 6000	60	NY102E1012
16	1000 ÷ 2000	100	NY102E1012
17	1000 ÷ 4000	60	NY102E1012
18	1000 ÷ 6000	80	NY102E1012
19	1000	40 ÷ 60	NY102E1012
20	4000	40 ÷ 80	NY102E1012
21	7000	40 ÷ 120	NY102E1012
22	1000	40 ÷ 120	NY102E1012
23	4000	40 ÷ 60	NY102E1012
24	7000	40 ÷ 80	NY102E1012
25	1000	40 ÷ 80	NY102E1012
26	4000	40 ÷ 120	NY102E1012
27	7000	40 ÷ 60	NY102E1012



Tab. 15. Parametry profilu chropowatości otrzymane dla gładzenia ze zmiennym posuwem

Nr pomiaru	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	Rsk	Rc	Rsm	Rt	Rk	Rpk	Rvk	Mr1	Mr2	A1
F1000-F2000															
1	2,612	3,195	14,925	7,219	7,706	-0,285	9,415	122,3	18,787	7,937	2,9	3,951	6,525	85,263	9,46
2	3,074	4,003	19,946	10,898	9,049	0,074	11,132	133,2	36,319	9,88	5,787	4,383	9,375	90,288	27,13
3	2,475	3,254	17,55	8,832	8,718	-0,093	9,969	145,2	24,884	7,227	3,424	4,804	11,95	87,188	20,46
4	3,804	4,771	22,112	12,106	10,006	0,22	14,177	139,8	26,198	11,54	5,938	4,513	13,05	90,863	38,74
ŚREDNIA	2,99125	3,80575	18,63325	9,76375	8,86975	-0,021	11,17325	135,125	26,547	9,146	4,51225	4,41275	10,225	88,4005	23,9475
F1000-F3000															
Nr pomiaru	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	Rsk	Rc	Rsm	Rt	Rk	Rpk	Rvk	Mr1	Mr2	A1
1	2,997	3,779	19,862	10,139	9,723	-0,074	11,746	117,5	24,715	8,815	4,251	4,516	10,388	84,9	22,08
2	3,314	4,335	22,131	11,917	10,214	0,142	12,761	141,4	33,31	8,999	6,422	5,653	14	87,813	44,96
3	3,484	4,452	21,619	10,769	10,85	-0,045	12,317	145,6	24,982	10,219	4,493	5,612	11,35	85,888	25,5
4	3,183	3,98	18,996	9,551	9,444	-0,032	12,013	124,5	24,017	9,734	4,224	3,988	8,975	84,975	18,96
ŚREDNIA	3,2445	4,1365	20,652	10,594	10,05775	-0,00225	12,20925	132,25	26,756	9,44175	4,8475	4,94225	11,17825	85,894	27,875
F1000-F4000															
Nr pomiaru	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	Rsk	Rc	Rsm	Rt	Rk	Rpk	Rvk	Mr1	Mr2	A1
1	3,062	3,859	18,904	9,322	9,581	-0,168	13,253	201,9	22,071	9,804	3,593	4,55	8,925	87,913	16,03
2	2,993	3,886	20,629	10,373	10,256	-0,097	11,002	127,3	24,796	8,987	5,066	4,989	10,225	87,35	25,9
3	3,612	4,566	22,271	12,824	9,447	0,262	14,439	152,7	31,59	11,798	5,757	4,526	9,175	88,213	26,41
4	3,614	4,737	22,677	11,659	11,018	-0,054	13,695	147,2	30,173	10,394	7,159	6,278	10,625	88,238	38,03
ŚREDNIA	3,32025	4,262	21,12025	11,0445	10,0755	-0,01425	13,09725	157,275	27,1575	10,24575	5,39375	5,08575	9,7375	87,9285	26,5925
F1000-F5000															
Nr pomiaru	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	Rsk	Rc	Rsm	Rt	Rk	Rpk	Rvk	Mr1	Mr2	A1
1	3,926	4,899	21,967	11,589	10,377	-0,083	14,602	148,2	29,949	11,692	6,737	4,667	8,713	84,075	29,35
2	2,862	3,621	18,23	8,371	9,859	-0,121	11,491	164,6	30,141	8,702	3,714	4,835	10,675	88,738	19,82
3	3,559	4,572	21,744	12,461	9,283	0,369	13,242	135,1	26,322	10,455	6,202	5,519	11,775	88,75	36,52
4	3,223	4,087	20,171	9,631	10,54	-0,198	12,744	149,4	26,324	9,233	5,546	5,686	9,438	84,35	26,17
ŚREDNIA	3,3925	4,29475	20,528	10,513	10,01475	-0,00825	13,01975	149,325	28,184	10,0205	5,54975	5,17675	10,15025	86,47825	27,965

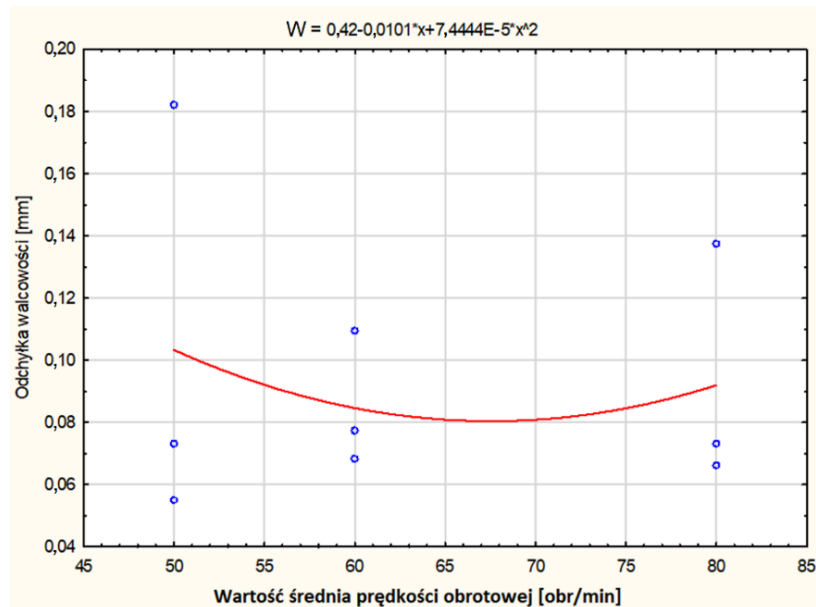


W tab. 16 oraz na rys. 187 przedstawiono uzyskane odchyłki walcowości otworu gładzonego na centrum HAAS VF-3SS, dla gładzenia ze zmiennymi warunkami kinematycznymi

Tab. 16. Zmienne wartości obrotów podczas gładzenia (najniższą wartość odchyłki zaznaczono pogrubioną czcionką)

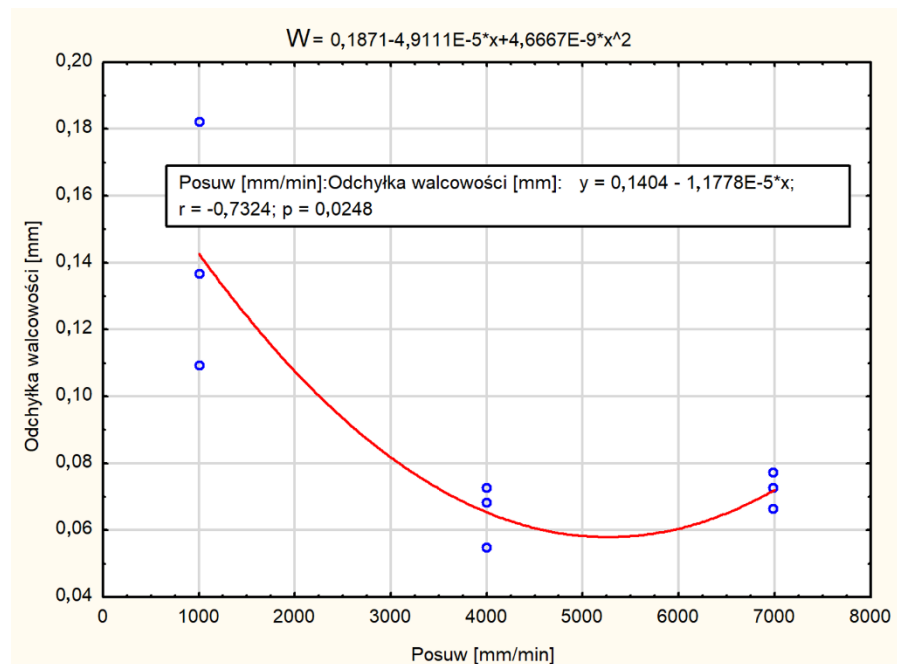
Lp.	Posuw głowicy V_{ax} [mm/min]	prędkość obrotowa głowicy n [obr/min]	wartość średnia (zmiennej) prędkości obrotowej [obr/min]	odchyłka walcowości W [mm]
1	1000	40 ÷ 60	50	0,182
2	4000	40 ÷ 80	60	0,068
3	7000	40 ÷ 120	80	0,066
4	1000	40 ÷ 120	80	0,137
5	4000	40 ÷ 60	50	0,055
6	7000	40 ÷ 80	60	0,077
7	1000	40 ÷ 80	60	0,109
8	4000	40 ÷ 120	80	0,073
9	7000	40 ÷ 60	50	0,073

Wpływ (zmiennej) prędkości obrotowej głowicy na odchyłkę kształtu gładzonego otworu przedstawiono na rys. 187. Najmniejszą odchyłkę walcowości W uzyskano dla prędkości obrotowej z zakresu $n = 60 \div 70$ obr/min.



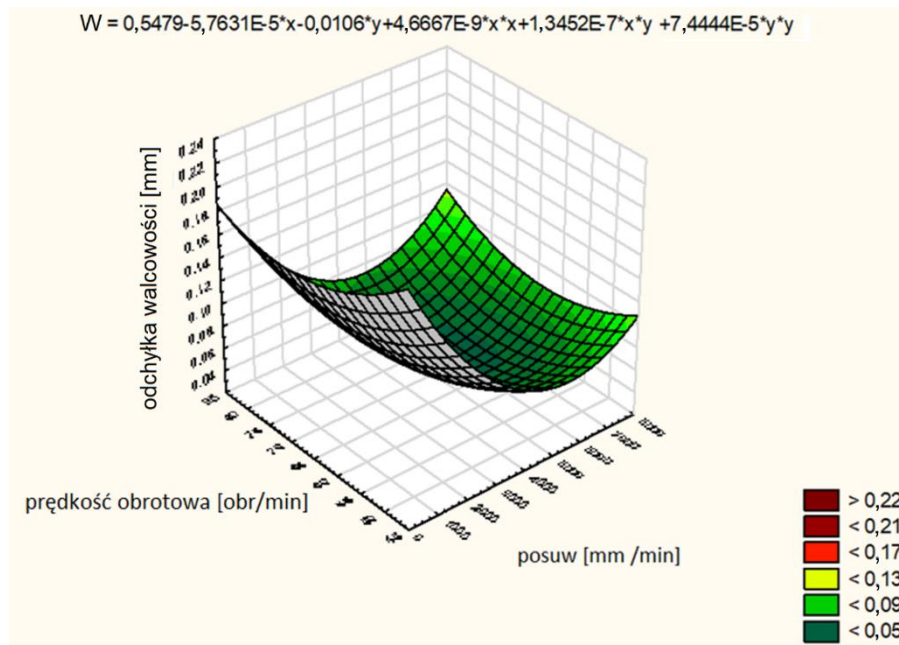
Rys. 187. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu względem zmiennej prędkości obrotowej głowicy

Wpływ stałego posuwu głowicy na odchyłkę kształtu przedstawiono na rys. 188. Najmniejszą odchyłkę walcowości W gładzonego otworu uzyskano dla posuwu $5000 \div 6000$ mm/min.



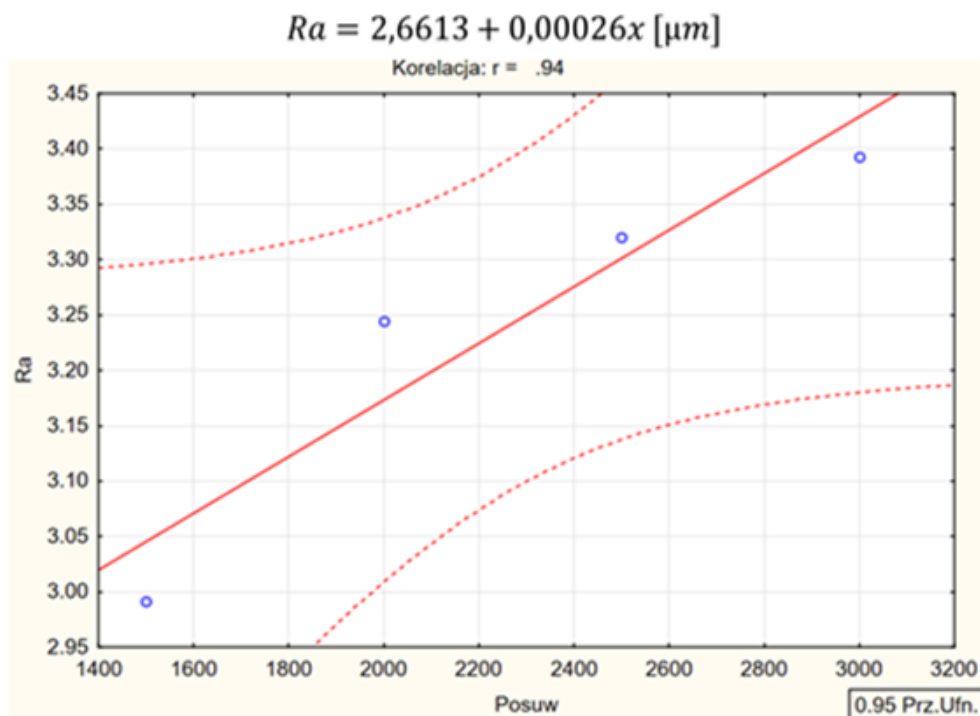
Rys. 188. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji stałego posuwu głowicy

Zmienna prędkość obrotowa, w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min, powoduje zmniejszenie odchyłki walcowości W gładzonego otworu (rys. 189).



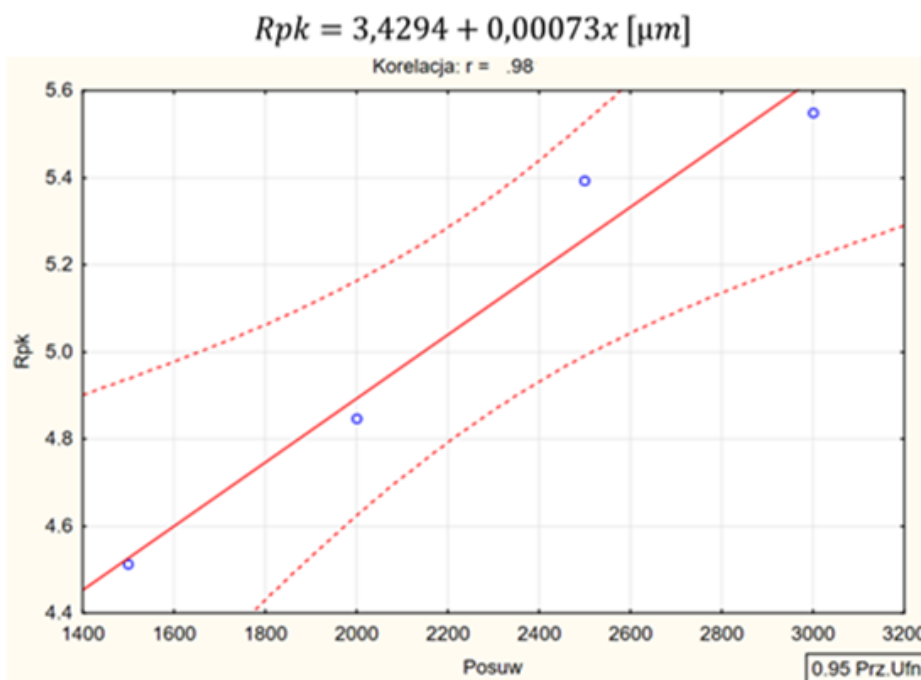
Rys. 189. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu względem stałego posuwu i zmiennej prędkości obrotowej głowicy

Mniejsza wartość zmiennego posuwu głowicy wpływa na obniżenie wartości parametru R_a (rys. 190).



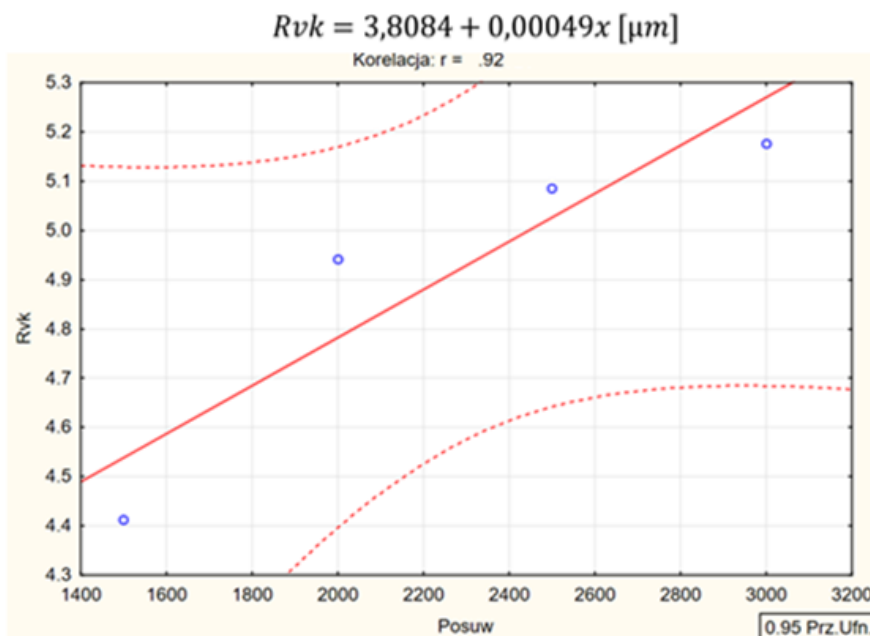
Rys. 190. Wpływ zmiennego posuwu na parametr profilu chropowatości R_a

Mniejsza wartość zmiennego posuwu głowicy wpływa na obniżenie wartości parametru R_p (rys. 191).



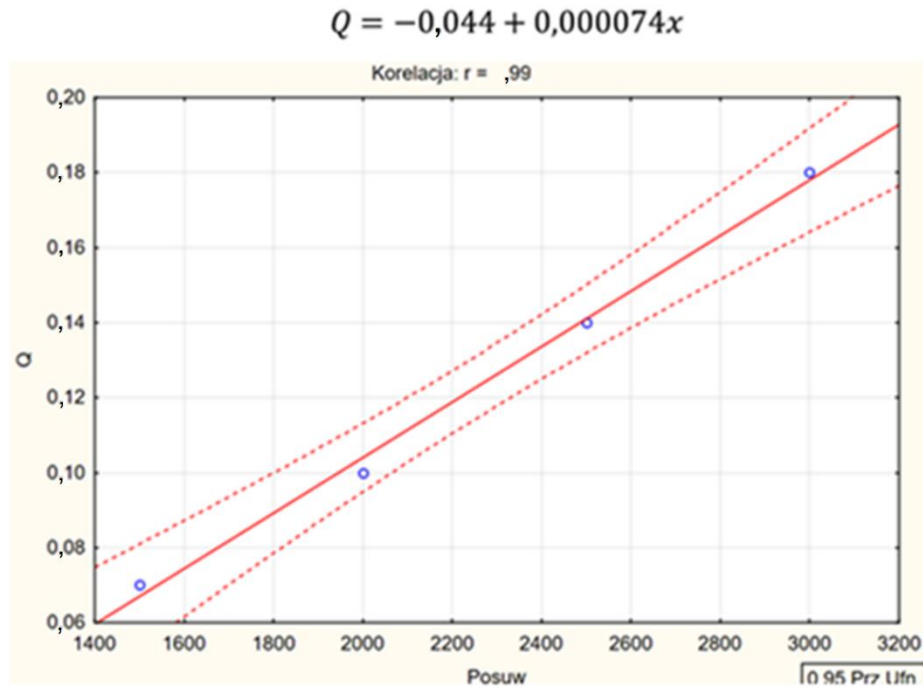
Rys. 191. Wpływ zmiennego posuwu na parametr profilu chropowatości R_{pk}

Mniejsza wartość zmiennego posuwu głowicy wpływa na obniżenie wartości parametru R_{vk} (rys. 192).



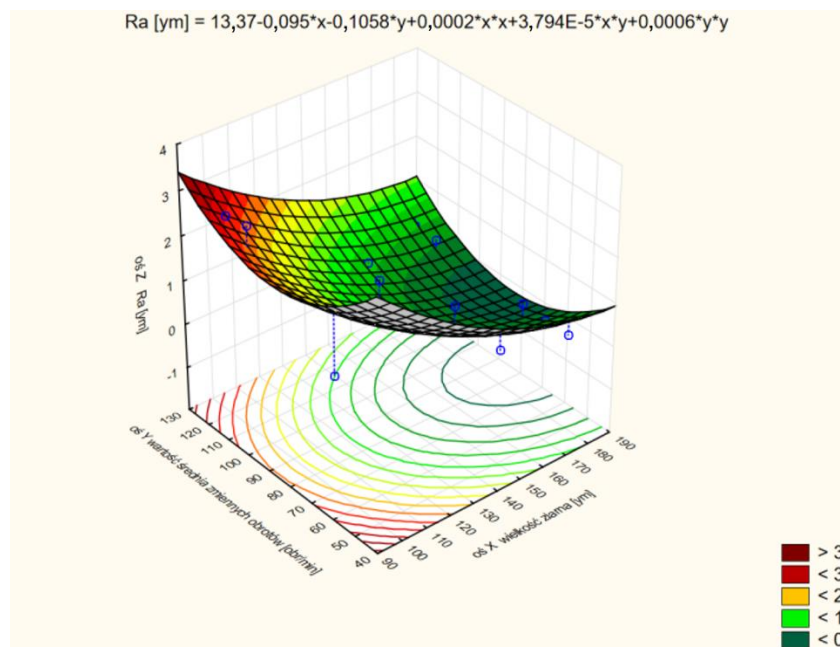
Rys. 192. Wpływ zmiennego posuwu na parametr profilu chropowatości R_{vk}

Mniejsza wartość zmiennego posuwu głowicy wpływa na obniżenie wartości parametru Q (rys. 193).



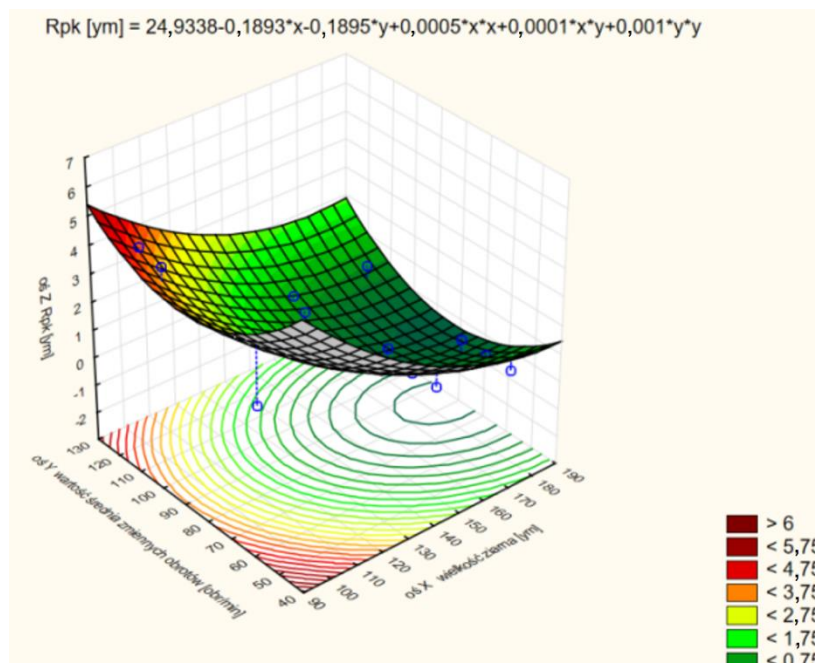
Rys. 193. Wpływ zmiennego posuwu na wydajność obróbki Q

Mniejsza wartość zmiennej prędkości obrotowej głowicy oraz drobniejsze ziarno wpływają na obniżenie wartości parametru R_a (rys. 194).



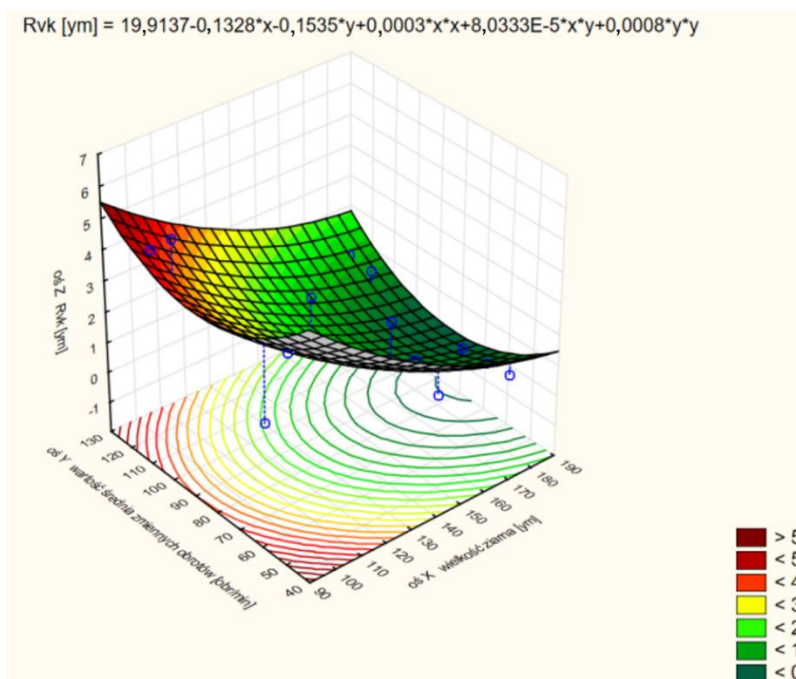
Rys. 194. Wykres zależności parametru R_a w funkcji zmiennej prędkości obrotowej i wielkości ziarna

Mniejsza wartość zmiennej prędkości obrotowej głowicy oraz drobniejsze ziarno wpływają na obniżenie wartości parametru R_{pk} (rys.195).



Rys. 195. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji zmiennej prędkości obrotowej i wielkości ziarna

Mniejsza wartość zmiennej prędkości obrotowej głowicy oraz grubsze ziarno wpływają na zwiększenie wartości parametru R_{vk} (rys. 196).



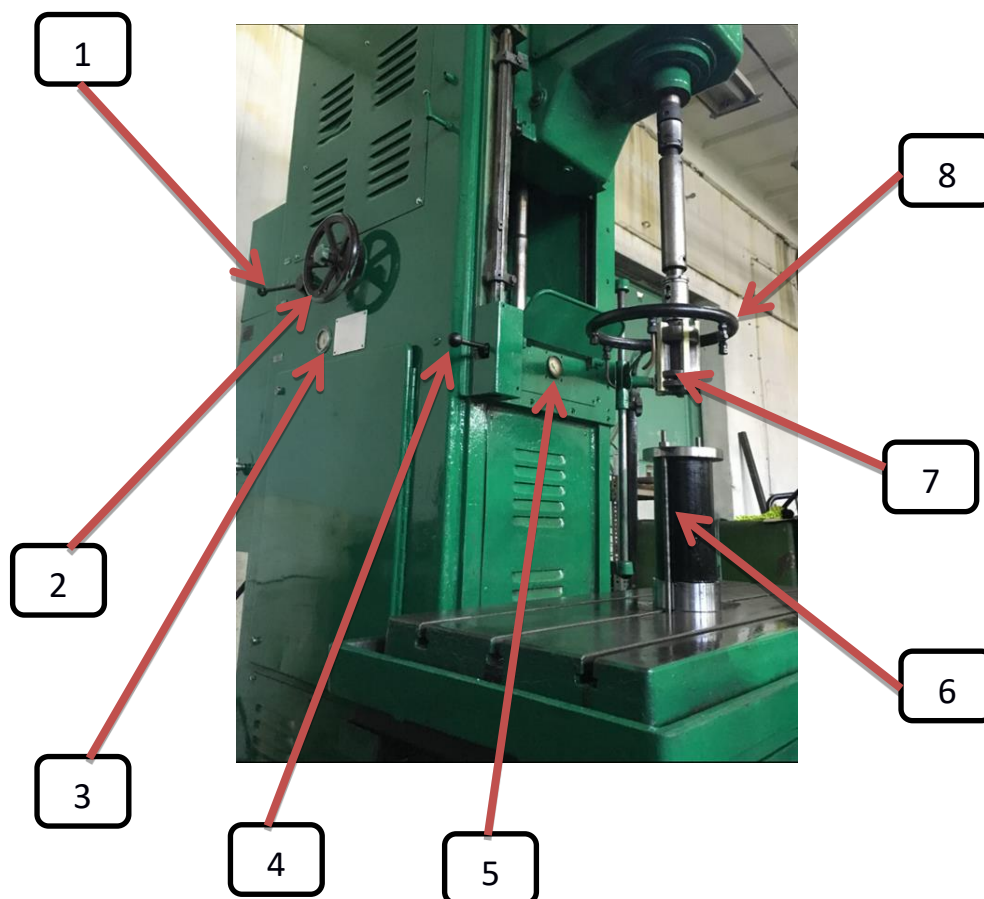
Rys. 196. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji zmiennej prędkości obrotowej i wielkości ziarna

4.3.1.5. Wnioski z gładzenia ze zmiennymi parametrami kinematycznymi

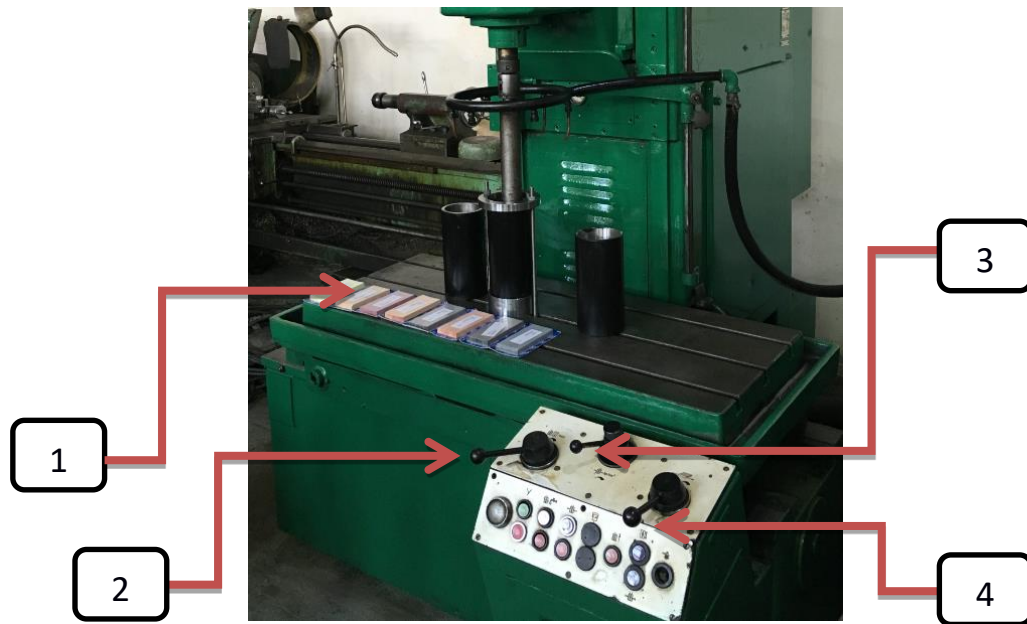
1. Zmienny posuw użyty wraz ze stałą prędkością obrotową głowicy wpływa na minimalizację odchyłki walcowości o **12,77%** (porównanie minimalnych wartości z tbl. 10, tbl. 13 i tbl. 16)
2. Zmienna prędkość obrotowa wpływa na zmniejszenie chropowatości powierzchni
3. Zmienny posuw nie poprawia parametrów profilu chropowatości
4. Mniejsza wartość stałej oraz zmiennej prędkości obrotowej głowicy wpływa na zmniejszenie parametrów profilu chropowatości gładzonej powierzchni

4.3.2. Gładzenie na honownicy hydraulicznej konwencjonalnej WMW SZS 200

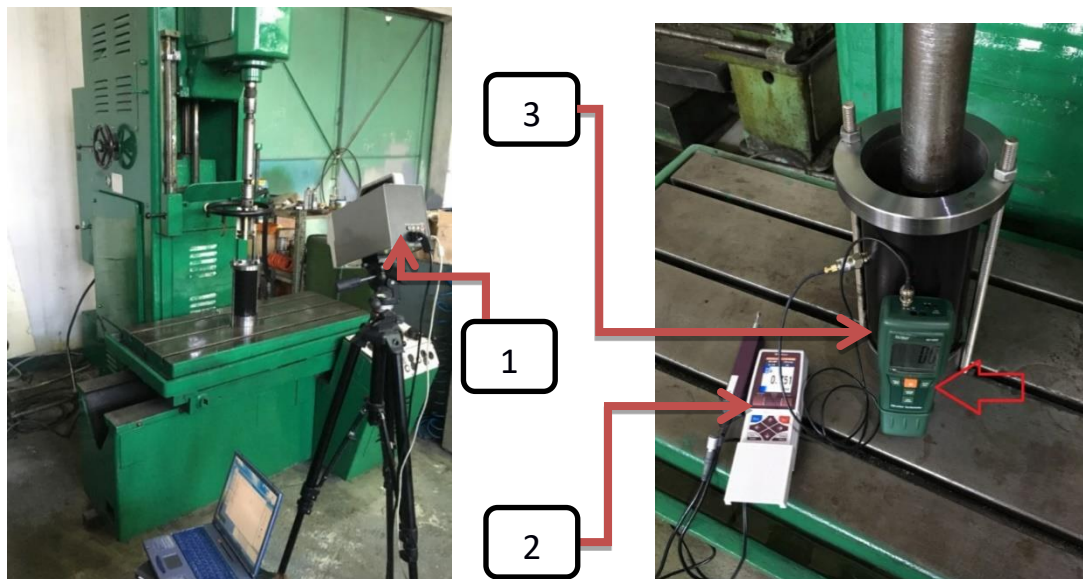
Honownica hydrauliczna konwencjonalna umożliwia bezstopniową zmianę parametrów obróbkowych. W trakcie skoku można zmieniać zarówno prędkość obrotową głowicy, jak również prędkość liniową osiową czy nacisk osetki do przedmiotu gładzonego. Honownica pokazana na rys. 197 ÷ 199 została oprzyrządowana w celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych.



Rys. 197. Stanowisko badawcze: 1 – dźwignia do zmiany przełożenia przekładni hydraulicznej; 2 – pokrętko służące do zmiany prędkości obrotowej głowicy gładzącej; 3 – miernik prędkości obrotowej głowicy gładzącej [obr/min]; 4 – dźwignia do zmiany osiowego kierunku ruchu głowicy; 5 – miernik nacisku osetki (ciśnienia) do przedmiotu gładzonego; 6 – tuleja gładzona zamocowana w przyrządzie; 7 – głowica gładząca; 8 – dysza chłodziwa.



Rys. 198. Stanowisko badawcze: 1 – osetki do obróbki zgrubnej i wykończeniowej, 2 – dźwignia do zmiany prędkości osiowej głowicy, 3 – dźwignia do zmiany nacisku osetki do przedmiotu obrabianego, 4 – dźwignia do zmiany położenia stołu (nie używana w badaniach)



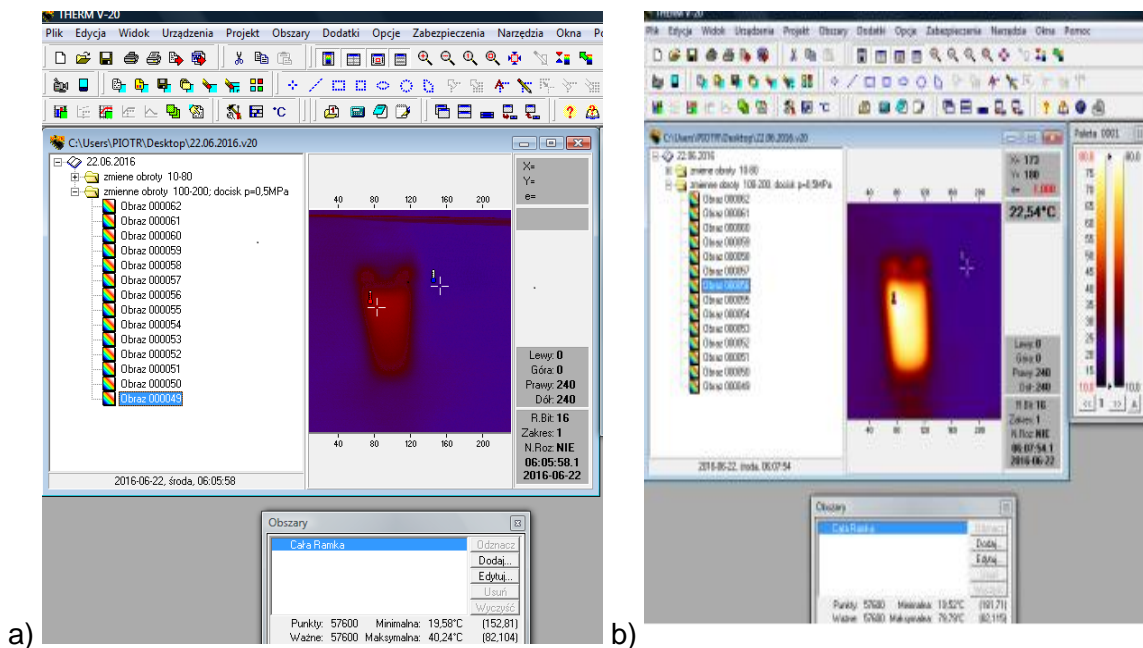
Rys. 199. Stanowisko badawcze; 1 – kamera termowizyjna, 2 – miernik chropowości powierzchni Mitutoyo SJ-210, 3 – miernik drgań (użyty do badań dodatkowych, nie opisanych w pracy)

4.3.2.1. Przyrost temperatury przy gładzeniu ze stałymi warunkami kinematycznymi

Podstawową trudnością wykonawczą zaobserwowaną podczas gładzenia przedmiotów cienkościennych o różnej grubości ścianki jest odchyłka walcowości, która jest bezpośrednio związana z nagrzewaniem się przedmiotu podczas gładzenia.

W trakcie badań eksperymentalnych zadawano trzy wartości nacisku osełki do powierzchni gładzonego otworu: 0,5 MPa, 1,0 MPa oraz 1,5 MPa.

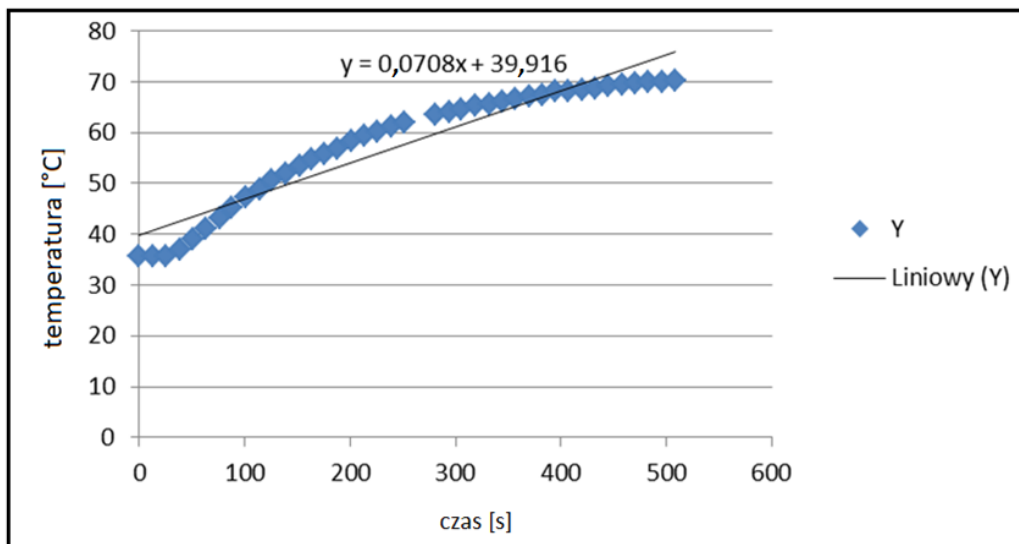
Na rys. 200 pokazano termogramy przedmiotu obrabianego na początku i na końcu gładzenia przeprowadzanego ze zmienną kinematyką, podczas którego zaobserwowano bardzo znaczny przyrost temperatury przedmiotu obrabianego.



Rys. 200. Widok okna programu THERM v.20: a) Czas obróbki $t = 0$ s; temperatura maksymalna $T_{\max} = 40^{\circ}\text{C}$, b) czas obróbki $t = 116$ s, temperatura maksymalna $T_{\max} = 79,79^{\circ}\text{C}$

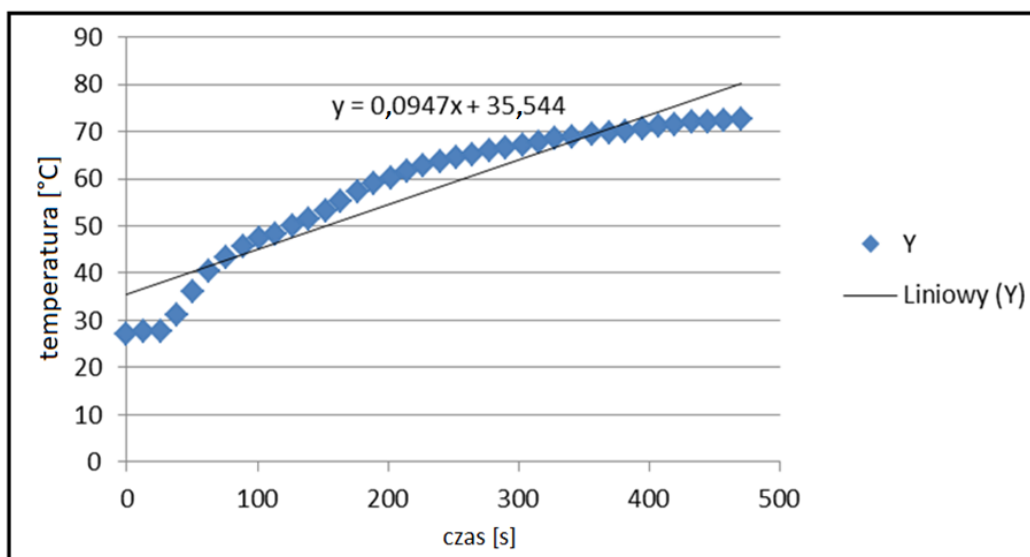
W badaniach wstępnych stwierdzono korzystne zmniejszenie temperatury przedmiotu gładzonego dla zmiennej kinematyki gładzenia, dlatego też przeprowadzono badania eksperymentalne zmiennej kinematyki procesu, dla możliwych do uzyskania zmian parametrów procesu gładzenia na honownicy hydraulicznej konwencjonalnej WMW SZS 200. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rys. 201 ÷ 209.

Na rys. 201 przedstawiono wykres przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego, dla stałej (tradycyjnej) kinematyki gładzenia, ze stałą prędkością prędkości obrotowej głowicy $n = 60$ obr/min.



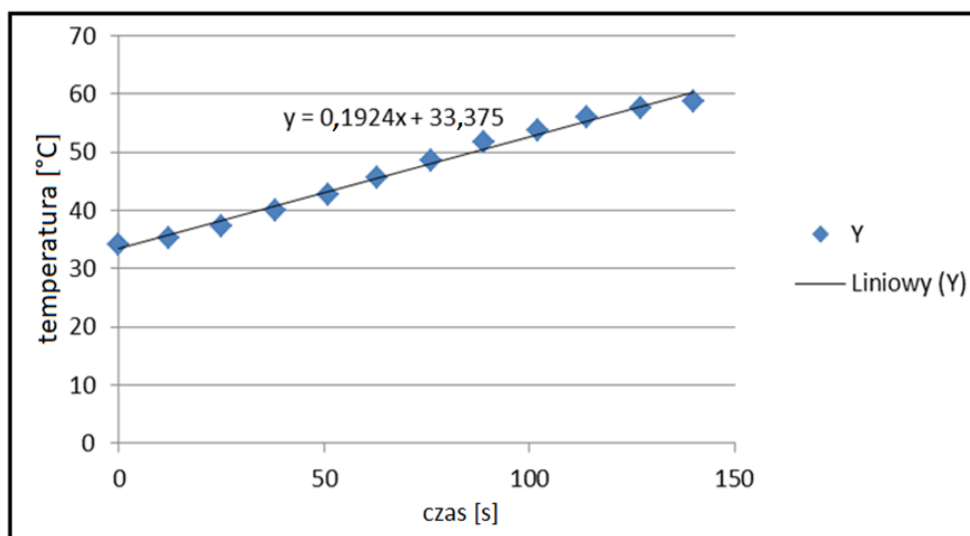
Rys. 201. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Stała prędkość obrotowa $n = 60$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $\alpha = 4,05^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 4,09^\circ\text{C}$

Rys. 202 opisuje przyrost temperatury przedmiotu gładzonego, dla stałej (tradycyjnej) kinematyki gładzenia, ze stałą prędkością prędkości obrotowej głowicy $n = 80$ obr/min.



Rys. 202. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Stała prędkość obrotowa $n = 80$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $\alpha = 5,41^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 5,705^\circ\text{C}$

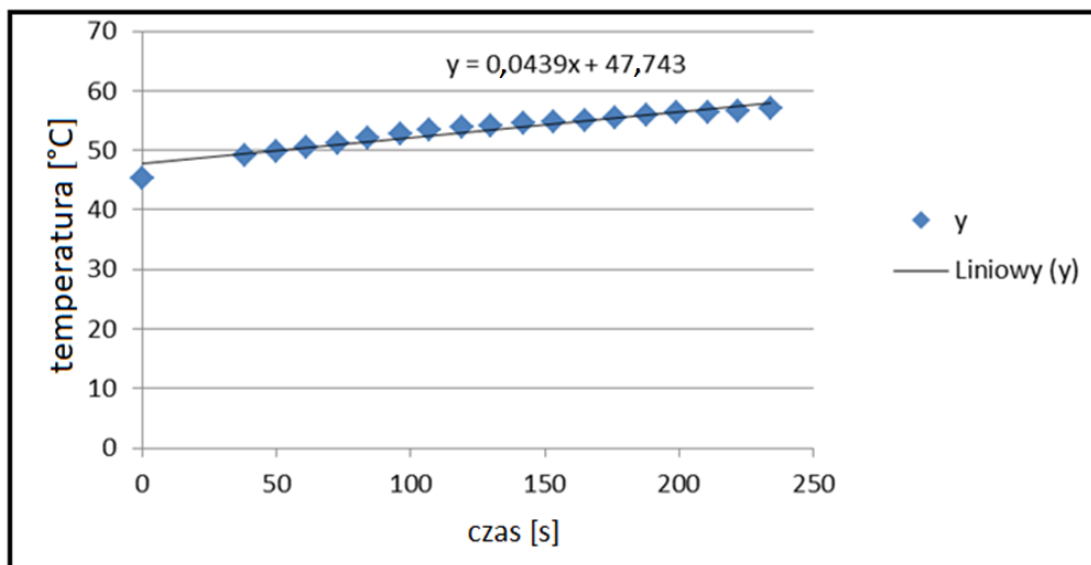
Na rys. 203 przedstawiono wykres przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego, dla stałej (tradycyjnej) kinematyki gładzenia, ze stałą prędkością obrotową głowicy $n = 100$ obr/min.



Rys. 203. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Stała prędkość obrotowa $n = 100$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 10,891^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 10,497^\circ\text{C}$

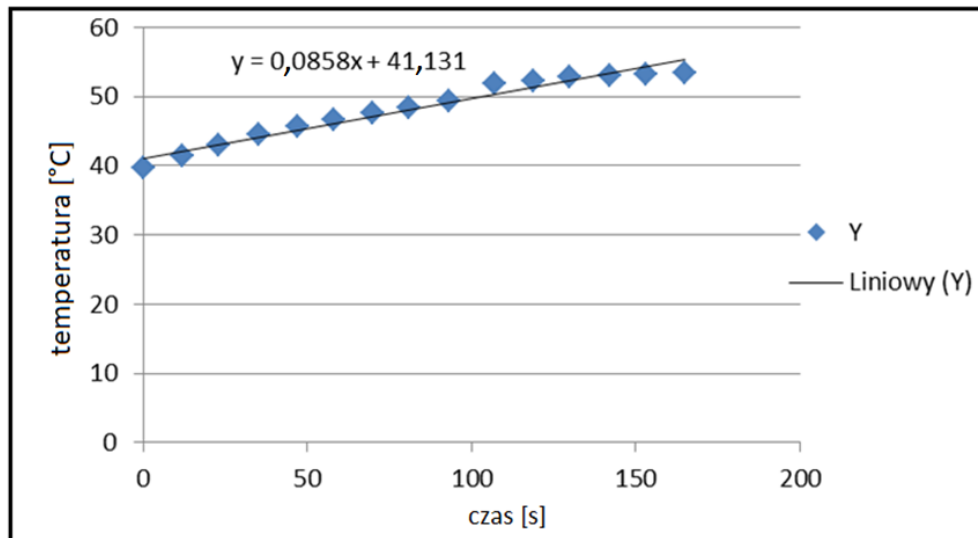
4.3.2.2. Przyrost temperatury oraz uzyskane parametry profilu chropowatości przy gładzeniu ze zmiennymi warunkami kinematycznymi

Rys. 204 prezentuje przyrost temperatury przedmiotu gładzonego, dla zmiennej kinematyki gładzenia, ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min w trakcie trwania obróbki otworu.



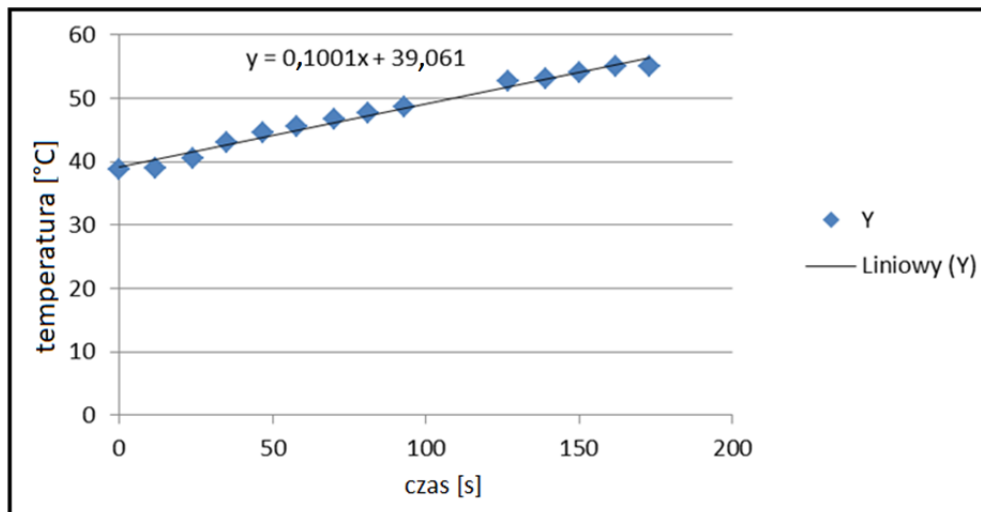
Rys. 204. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana prędkości obrotowej w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 2,5^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 3,025^\circ\text{C}$ (najniższy przyrost temperatury)

Na rys. 205 przedstawiono wykres przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego, dla zmiennej kinematyki gładzenia, ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 40 \div 80$ obr/min w trakcie trwania gładzenia.



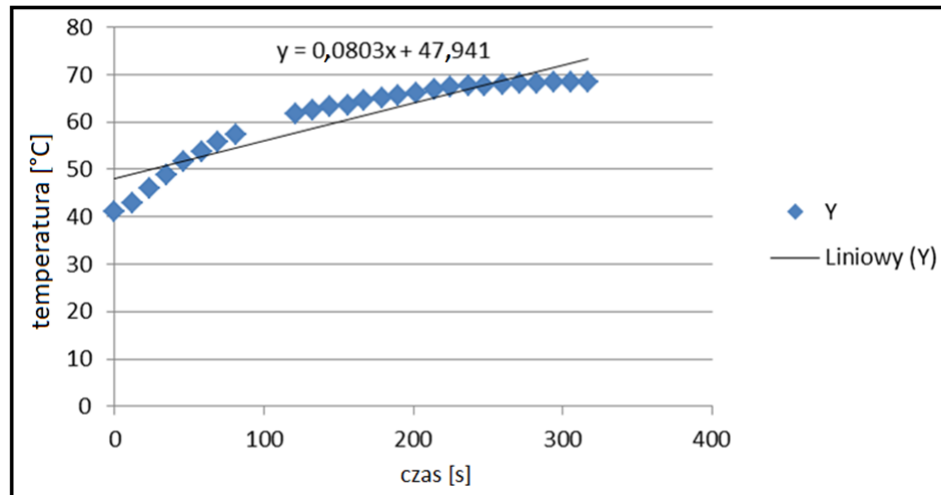
Rys. 205. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 40 \div 80$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $\alpha = 4,904^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 5,03^\circ\text{C}$

Rys. 206 przedstawia wykres przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego, dla zmiennej kinematyki gładzenia, ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min w trakcie trwania cyklu obróbki.



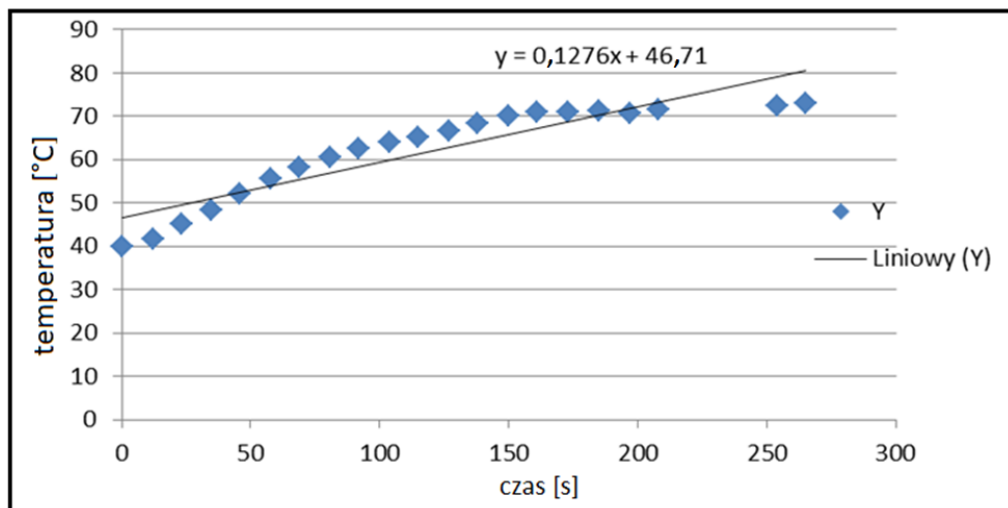
Rys. 206 Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $\alpha = 5,71^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 5,75^\circ\text{C}$

Na rys. 207 przedstawiono wykres przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego, dla zmiennej kinematyki gładzenia, ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min w trakcie trwania gładzenia.



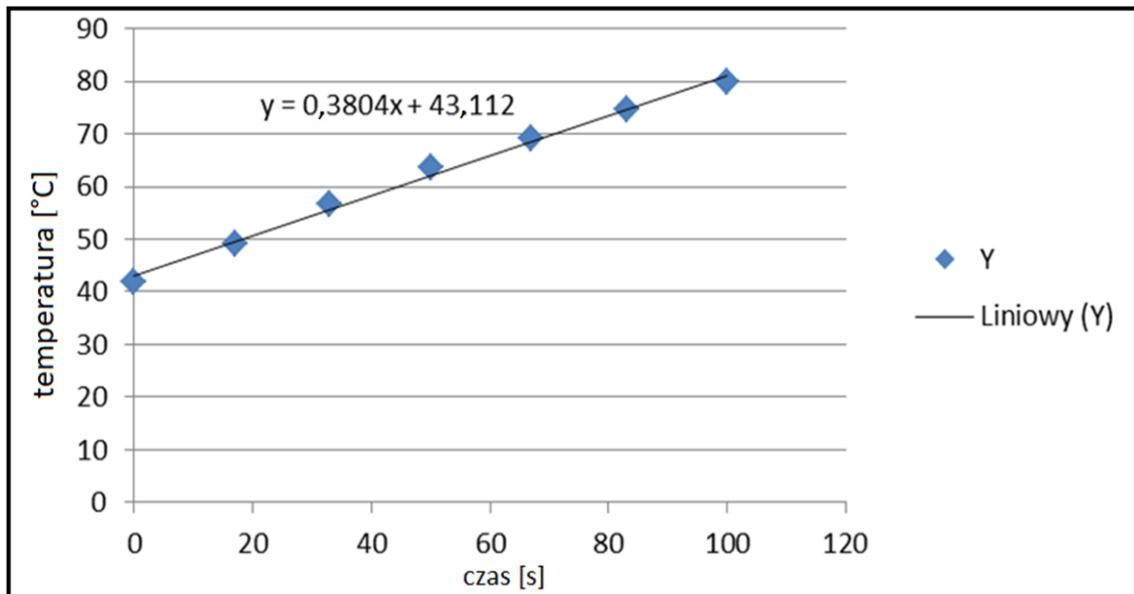
Rys. 207. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 4,591^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 5,216^\circ\text{C}$

Na rys. 208 przedstawiono wykres przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego, dla zmiennej kinematyki gładzenia, ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 140$ obr/min w trakcie trwania cyklu obróbki.



Rys. 208. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 100 \div 140$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 7,27^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 7,52^\circ\text{C}$

Na rys. 209 przedstawiono najwyższy zanotowany przyrost temperatury przedmiotu gładzonego, dla zmiennej kinematyki gładzenia, ze zmianą prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min w trakcie trwania gładzenia.

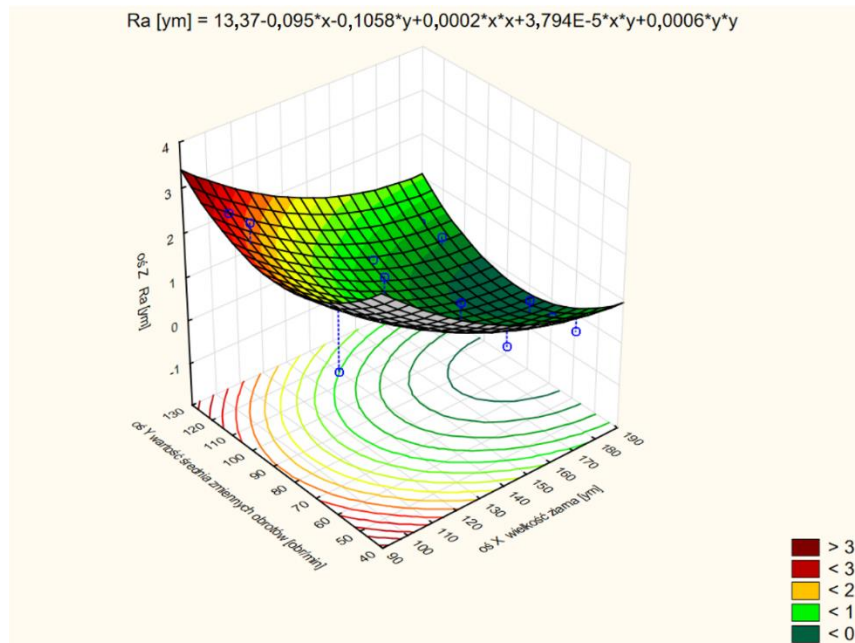


Rys. 209. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $\alpha = 20,827^\circ$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 22,70^\circ\text{C}$ (otrzymano największy przyrost temperatury)

Na rys. 201 ÷ 209 pokazano wpływ stałej i zmiennej prędkości obrotowej na otrzymany po obróbce przyrost temperatury przedmiotu gładzonego. Zakres wartości prędkości obrotowej głowicy gładzącej ma kluczowe znaczenie na wielkość generowanej temperatury w przedmiocie obrabianym. Znaczenie ma również czy prędkość obrotowa ma wartość stałą, czy zmienia się w trakcie trwania cyklu obróbki. **Najmniejszy (pożądany) przyrost temperatury zaobserwowano dla zmiennej prędkości obrotowej w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min.** Przyrost temperatury jest niższy o 35,2% w porównaniu do najniższej temperatury uzyskanej dla gładzenia tradycyjnego (ze stałymi parametrami obróbkowymi).

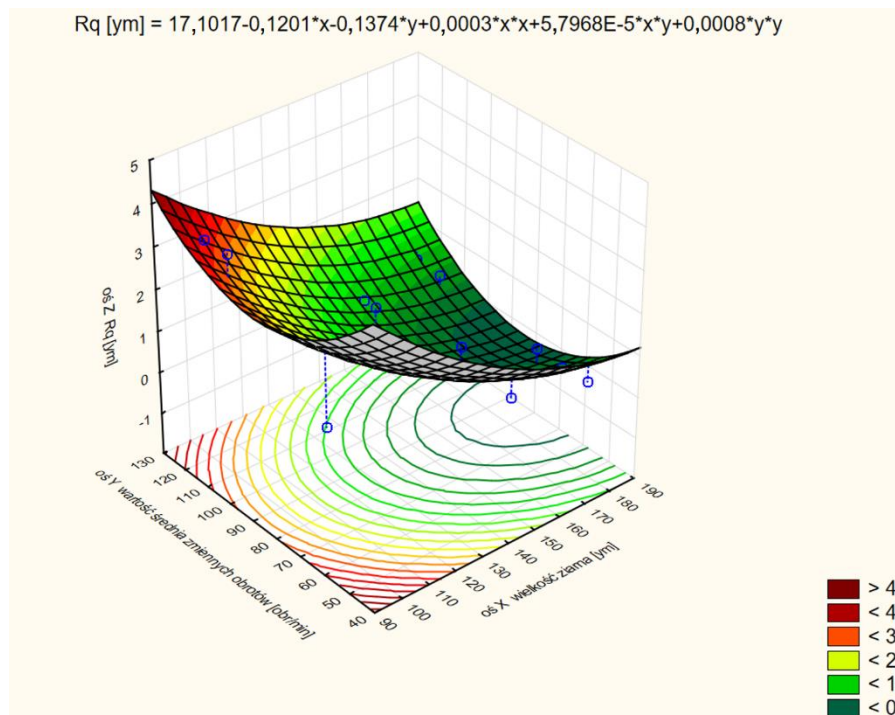
Na rys. 210 ÷ 224 pokazano wybrane wykresy obrazujące wpływ zmiennych warunków kinematycznych gładzenia na wartości otrzymywanych parametrów profilu chropowatości.

Na rys. 210 pokazano wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_a . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru profilu chropowatości R_a .



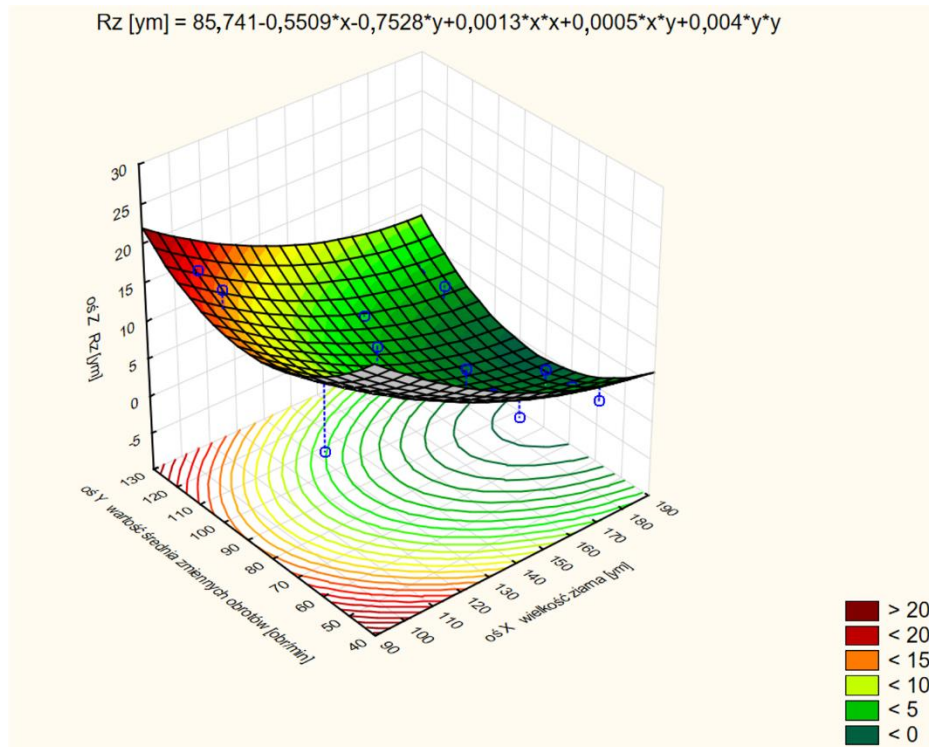
Rys. 210. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_a

Rys. 211 opisuje wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_q . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru profilu chropowatości R_q .



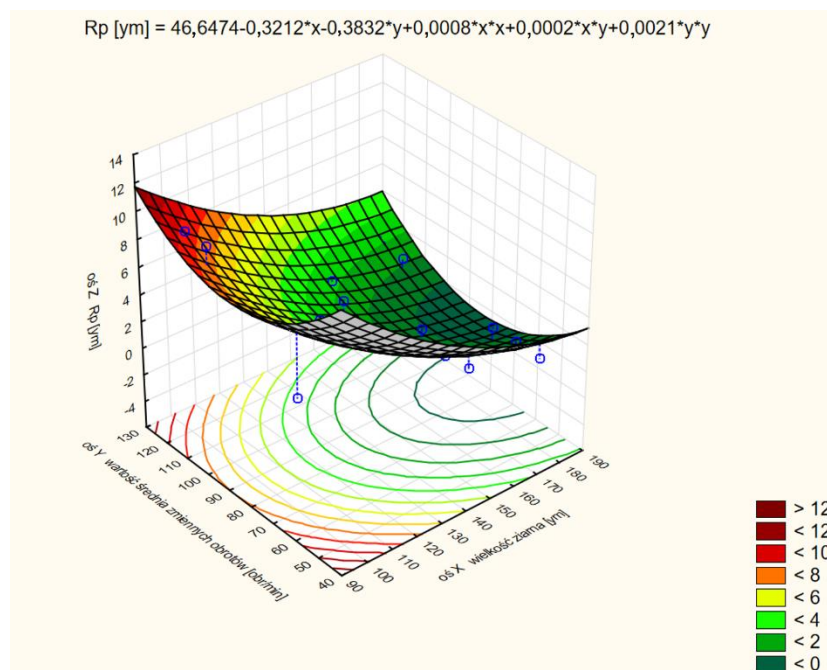
Rys. 211. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_q

Rys. 212 omawia wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_z . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru profilu chropowatości R_z .



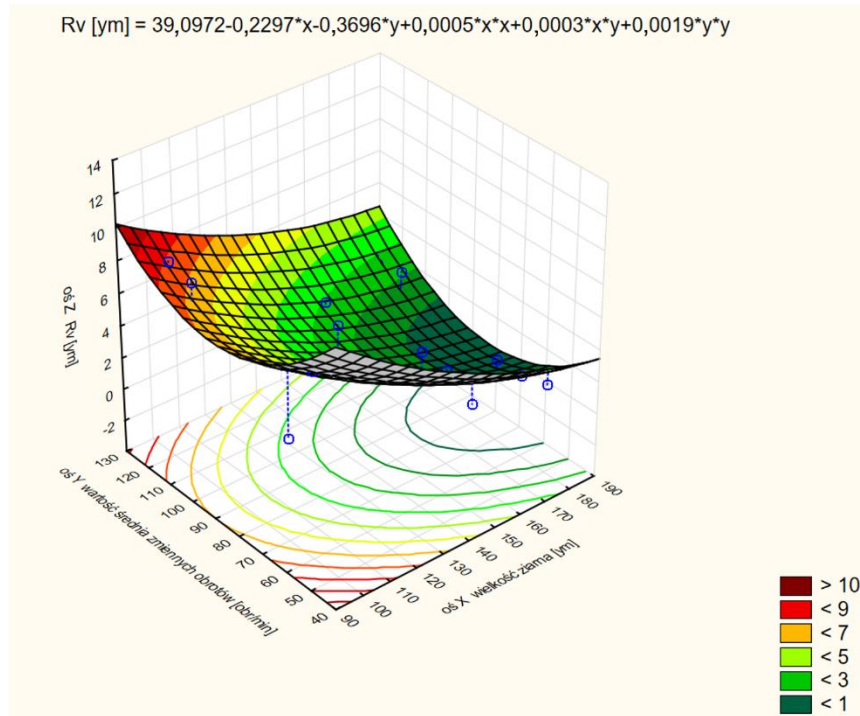
Rys. 212. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_z

Rys. 213 prezentuje wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_p . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru R_p .



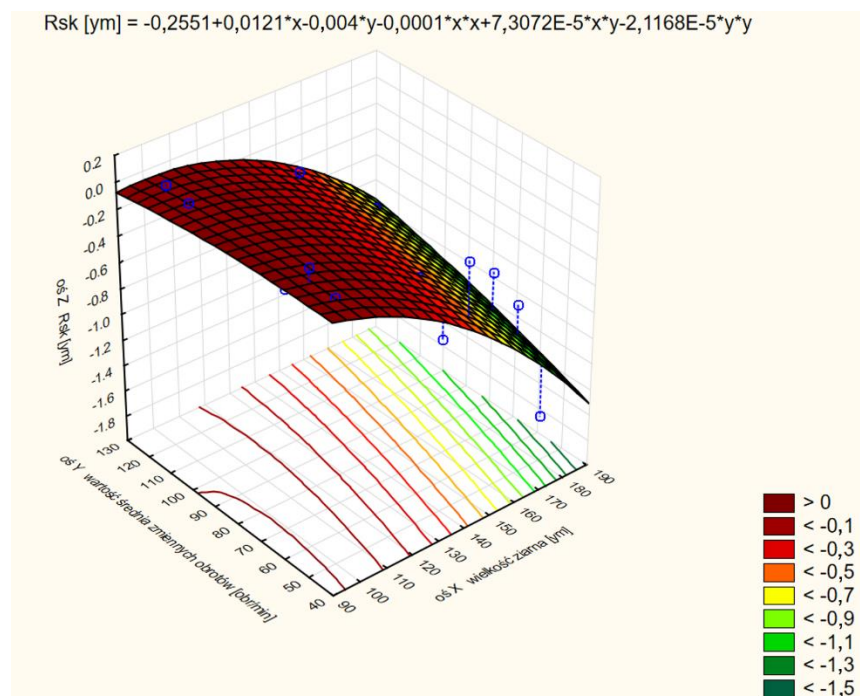
Rys. 213. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_p

Na rys. 214 pokazano wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_v . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru profilu chropowatości R_v .



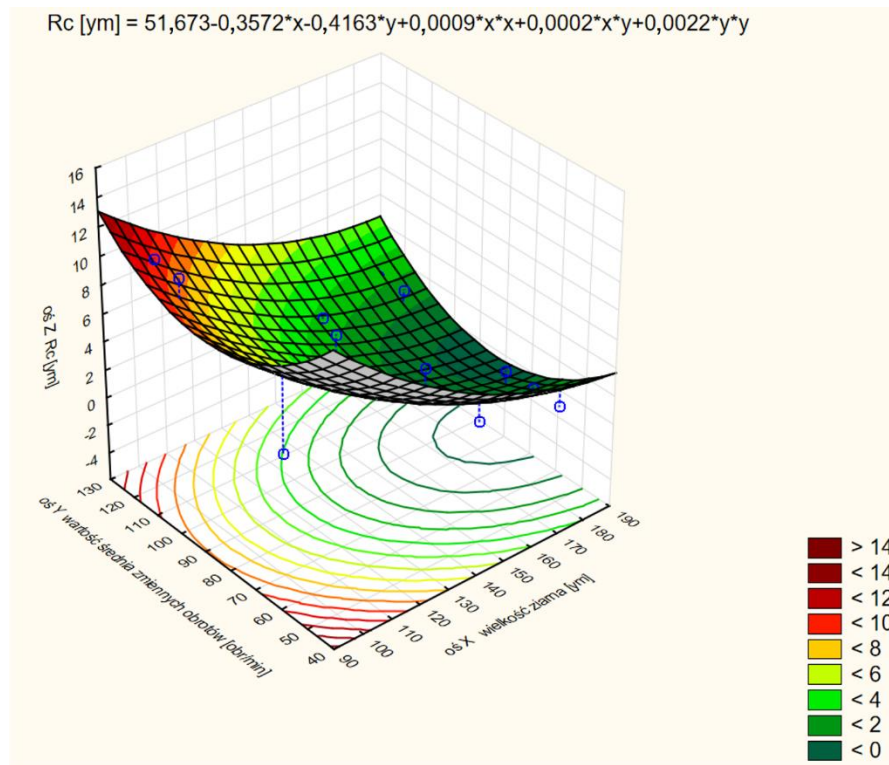
Rys. 214. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_v

Rys. 215 prezentuje wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{Sk} . Drobniejsze ziarno i większa wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru R_{Sk} .



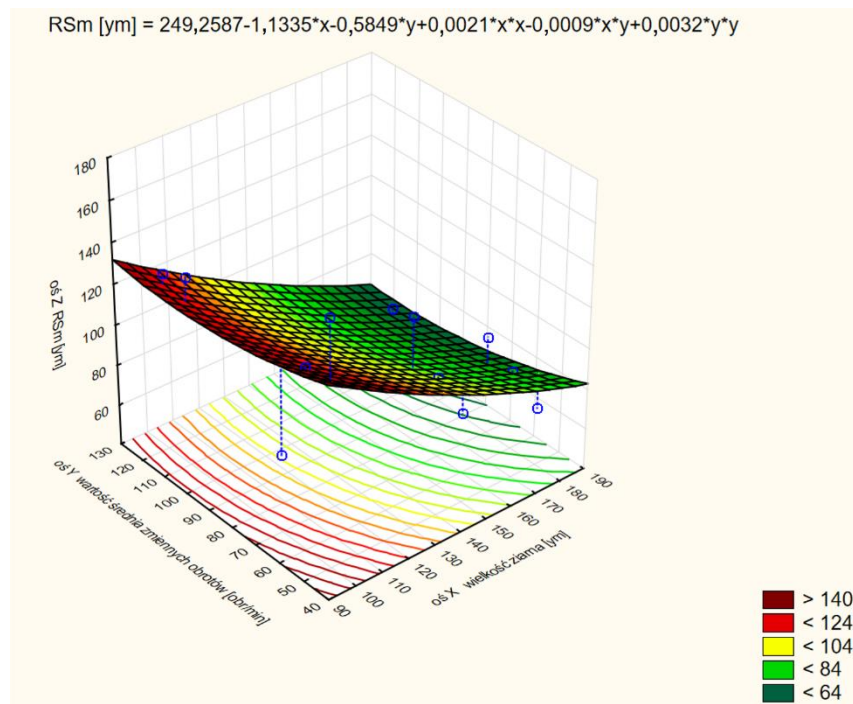
Rys. 215. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{Sk}

Rys. 216 opisuje wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_c . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru R_c .



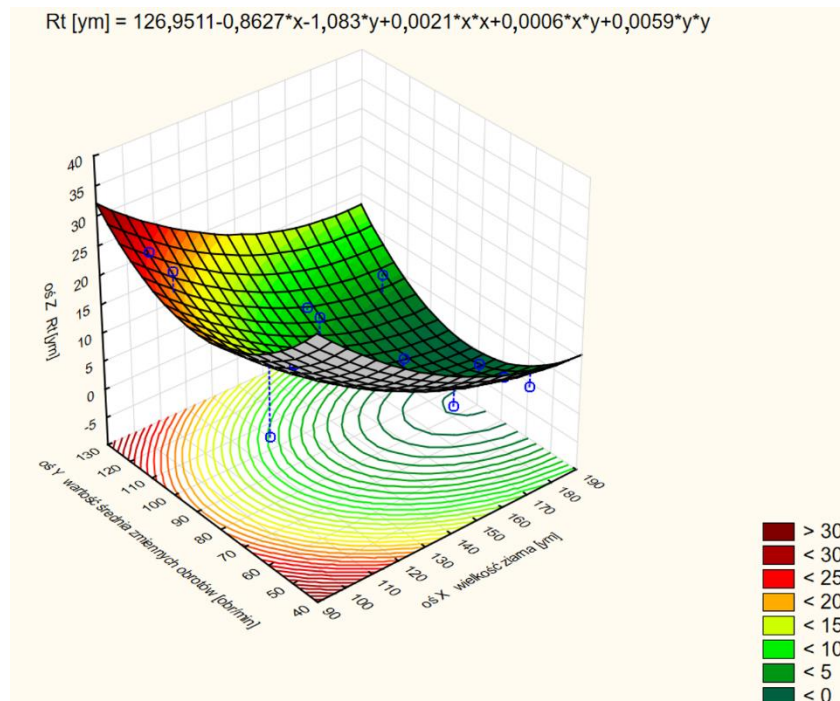
Rys. 216. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_c

Rys. 217 omawia wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{sm} . Drobniejsze ziarno i większa wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru R_{sm} .



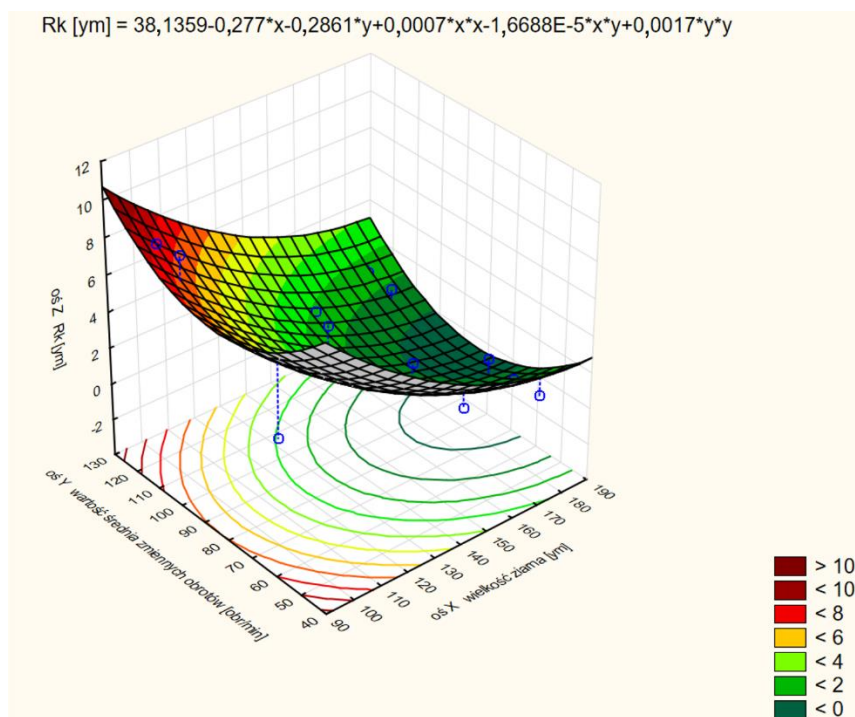
Rys. 217. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{sm}

Rys. 218 omawia wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_t . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru profilu chropowatości R_t .



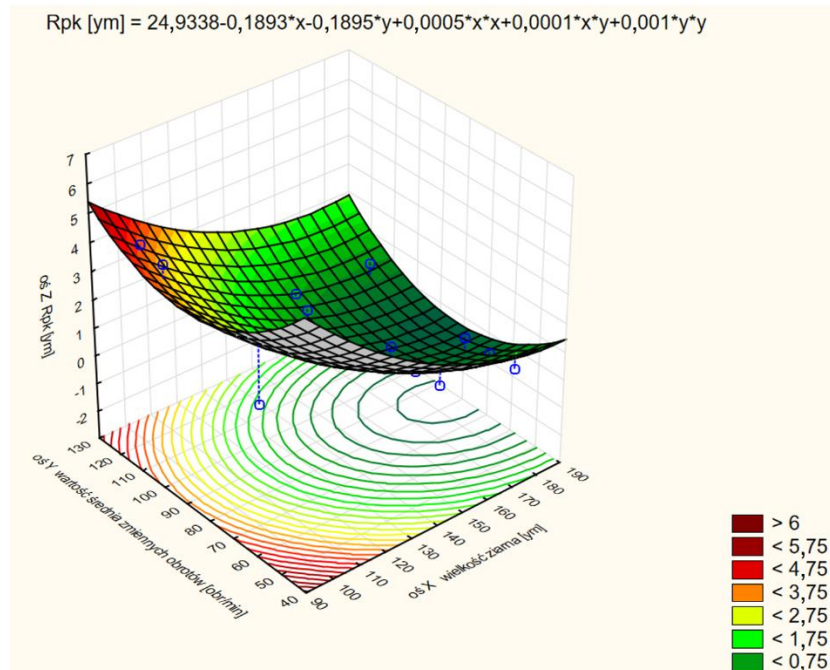
Rys. 218. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_t

Rys. 219 prezentuje wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_k . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru R_k .



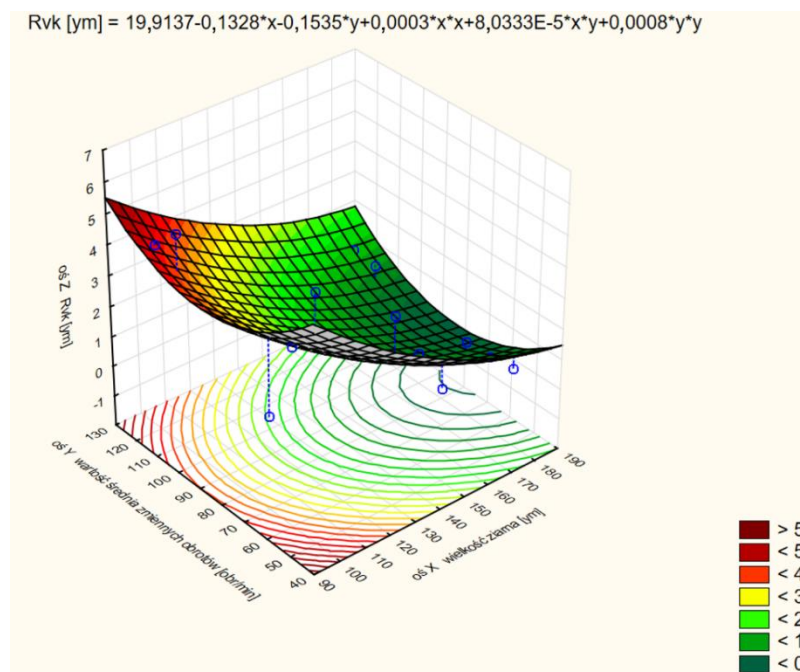
Rys. 219. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_k

Na rys. 220 pokazano wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{pk} . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru profilu chropowatości R_{pk} .



Rys. 220. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{pk}

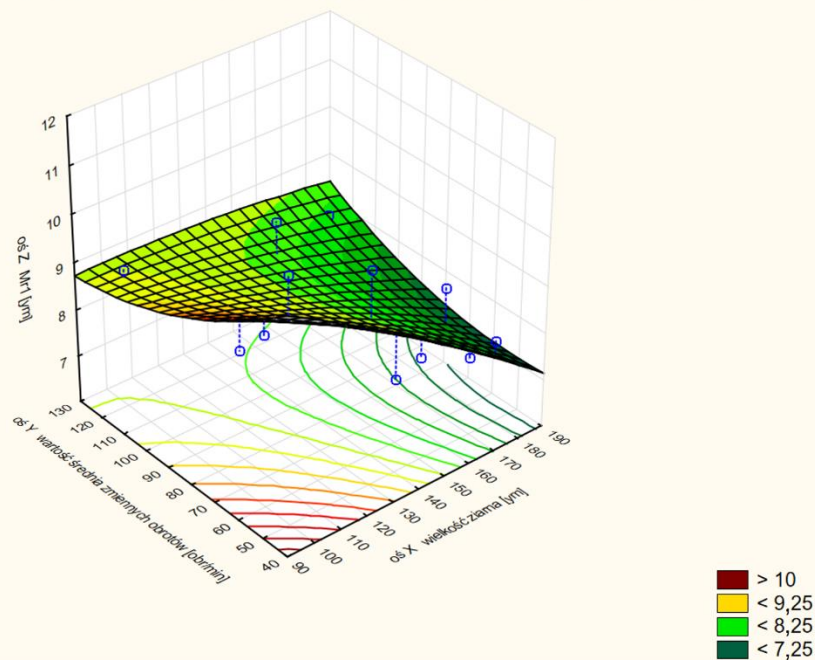
Rys. 221 prezentuje wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{vk} . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru R_{vk} .



Rys. 221. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{vk}

Rys. 222 omawia wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr M_{r1} . Drobniejsze ziarno i niższa wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru M_{r1} .

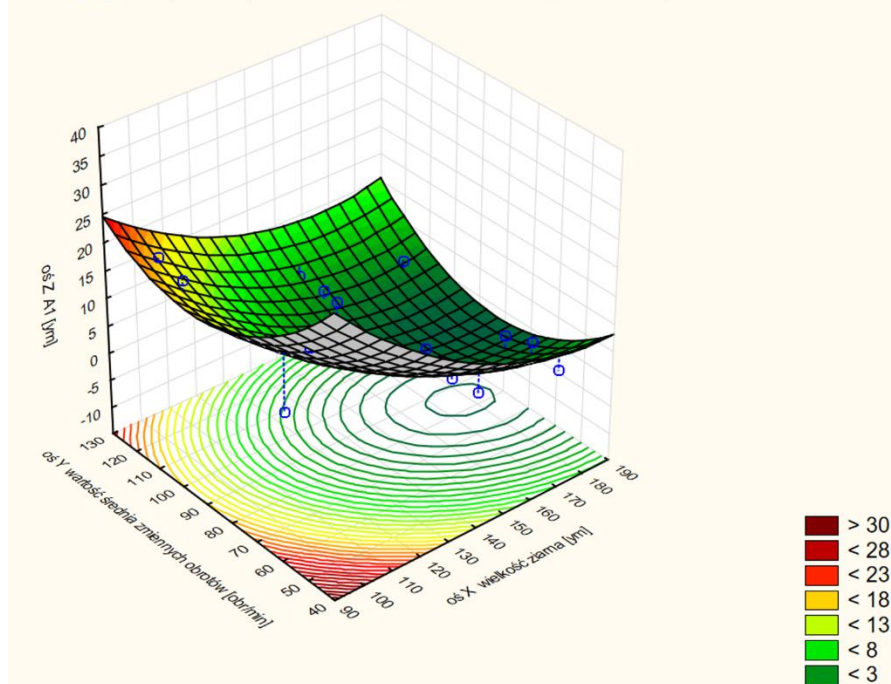
$$M_{r1} [\mu\text{m}] = 16,8941 - 0,0387 \cdot x - 0,095 \cdot y - 5,0054E-5 \cdot x \cdot x + 0,0004 \cdot x \cdot y + 0,0002 \cdot y \cdot y$$



Rys. 222. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr M_{r1}

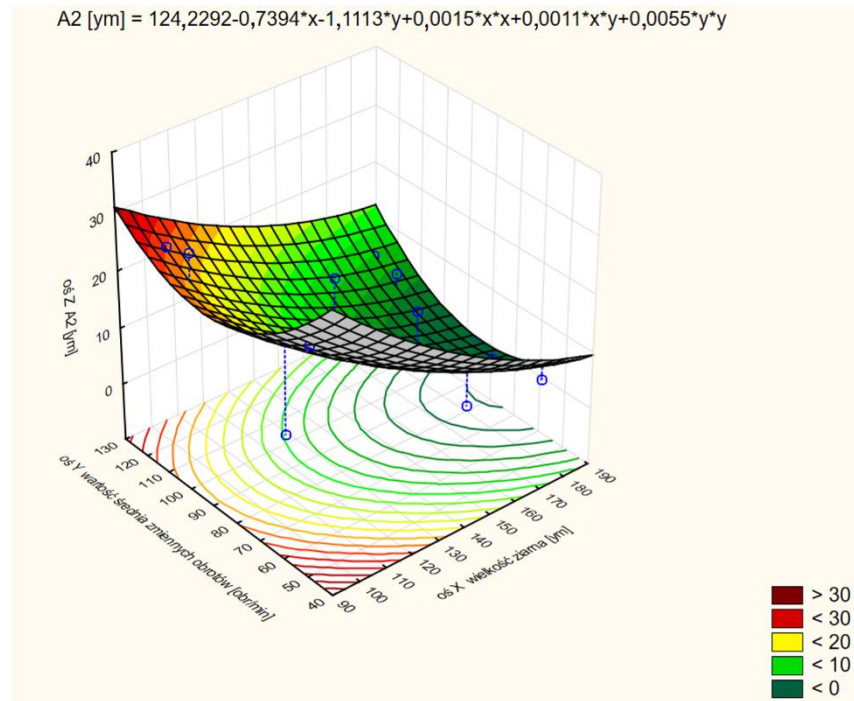
Rys. 223 prezentuje wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr A_1 . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru A_1 .

$$A_1 [\mu\text{m}] = 143,3656 - 1,0882 \cdot x - 1,1669 \cdot y + 0,0027 \cdot x \cdot x + 0,0014 \cdot x \cdot y + 0,0055 \cdot y \cdot y$$



Rys. 223. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr A_1

Na rys. 224 pokazano wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr A_2 . Drobniejsze ziarno i średnia wartość zmiennej prędkości obrotowej obniżają wartość parametru A_2 .



Rys. 224. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr A_2

4.3.2.3. Wnioski z gładzenia ze zmiennymi warunkami kinematycznymi

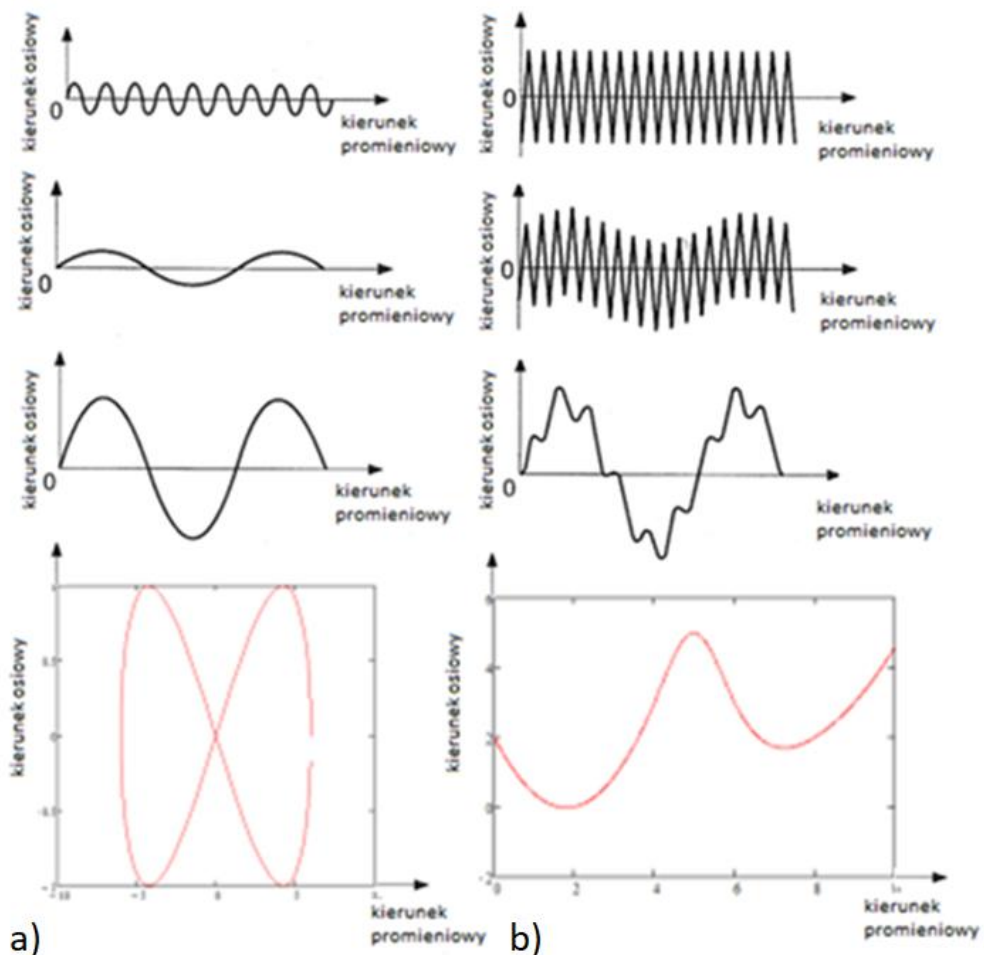
Gładzenie ze zmiennymi warunkami kinematycznymi (czyli ze zmianą prędkości obrotowej w trakcie gładzenia) wpływa na zmniejszenie przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego o 35,2%, co jest szczególnie pożądane podczas seryjnego gładzenia przedmiotów cienkościennych i ze ściankami o różnych grubościach.

Średnia wielkość wartości zmiennej prędkości obrotowej wpływa na zmniejszenie parametrów profilu chropowatości, m.in. R_a , R_z , R_p , R_q , R_k , R_{pk} , R_{vk} .

5. KRZYWIZNA TRAJEKTORII ZIARNA ŚCIERNEGO PRZY GŁADZENIU OTWORÓW WALCOWYCH

W odróżnieniu od ścieżki ziarna uzyskiwanej podczas tradycyjnego gładzenia otworów, podczas którego na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu otrzymywana jest siatka prostoliniowych rys, trajektoria ziarna otrzymywana podczas gładzenia ze zmienną kinematyką charakteryzuje się bogactwem kształtów ścieżek olejowych (rys. 225).

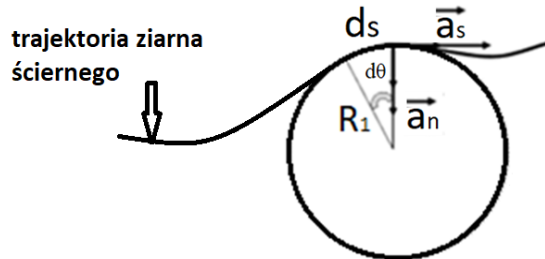
Trajektoria ziarna przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, wskutek zmiennej wartości prędkości i przyspieszenia ruchu ziarna, charakteryzuje się możliwością uzyskania dowolnego kształtu (dowolnej krzywizny) kanału olejowego [157].



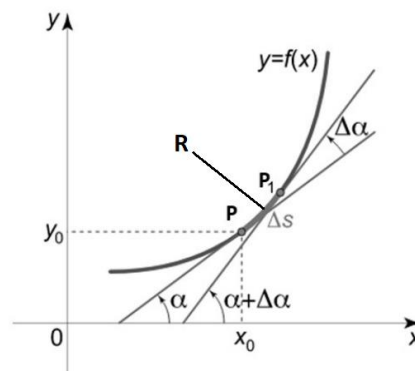
Rys. 225. Przykładowe trajektorie ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni otworu: a) ruch złożony jednostajnie zmienny, b) ruch złożony niejednostajnie zmienny [157]

5.1. Promień krzywizny trajektorii ziarna ściernego

Aby uzyskać mniejszy promień R_n ($n = 1, 2, 3 \dots$) krzywizny trajektorii (ziarna ściernego) potrzebna jest większa wartość przyspieszenia normalnego a_n ziarna ściernego poruszającego się po powierzchni gładzonego otworu. Aby uzyskać większy promień krzywizny R_n ($n = 1, 2, 3 \dots$) trajektorii (rys. 226) należy użyć mniejszych wartości przyspieszenia normalnego a_n .



Rys. 226. Promień krzywizny ścieżki olejowej $R = ds / d\theta$, a_n - przyspieszenie normalne, a_s - przyspieszenie styczne, $ds / d\theta$ - przyrost długości drogi poruszającego się ziarna względem przyrostu kąta [157]



Rys. 227. Przykładowy fragment krzywoliniowego kształtu kanału olejowego, uzyskiwanego w trakcie gładzenia ze zmienną kinematyką (opisany za pomocą funkcji $y = f(x)$) na rozwiniętej płaszczyźnie powierzchni gładzonego otworu), x - kierunek promieniowy, y - kierunek osiowy

Promień krzywizny $R = \frac{ds}{d\theta}$ krzywej $y = f(x)$ w punkcie P (rys. 227) opisano za pomocą równania:

$$R = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\left| \frac{d^2y}{dx^2} \right|} \quad (5.1)$$

Stosunek $\frac{\Delta\alpha}{\Delta s}$ jest średnią krzywizną K łuku PP_1 (rys. 227).

Wartość przyspieszenia a całkowitego:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_s^2} \quad (5.2)$$

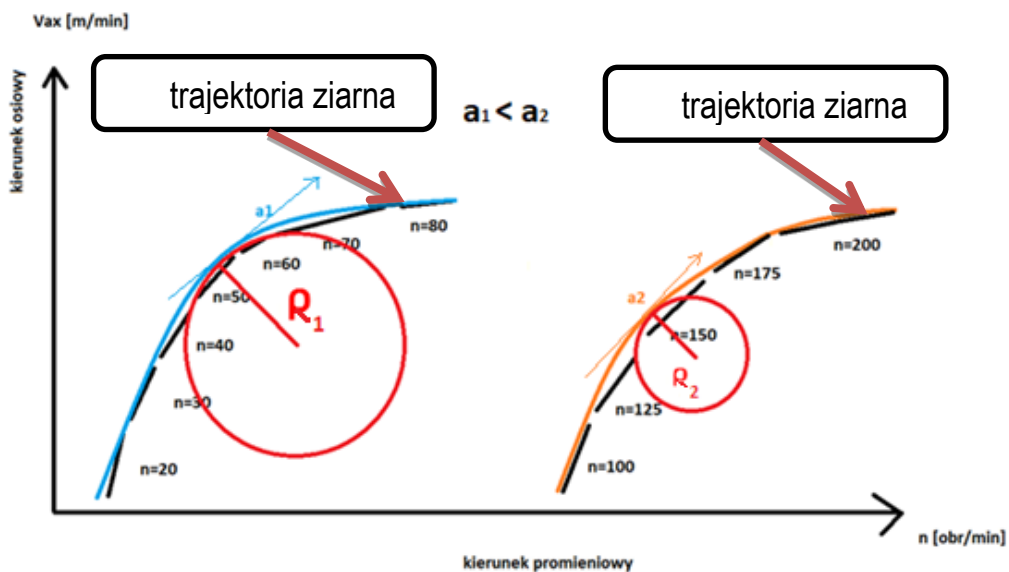
Przyspieszenie normalne $|\vec{a}_n|$ charakteryzuje szybkość zmiany kierunku prędkości ruchu ziarna oraz wpływa na zmianę kierunku ruchu ziarna ściernego.

$$|\vec{a}_n| = \frac{v^2}{R} \quad (5.3)$$

Przyspieszenie styczne $|\vec{a}_s|$ charakteryzuje szybkość zmiany liczbowej wartości prędkości ruchu, gdy $|\vec{a}_s| = 0$ to ruch ziarna nazywamy jednostajnym, gdy $|\vec{a}_s| = const \neq 0$ to ruch nazywamy jednostajnie zmiennym (po okręgu).

$$|\vec{a}_s| = \frac{dv}{dt} \quad (5.4)$$

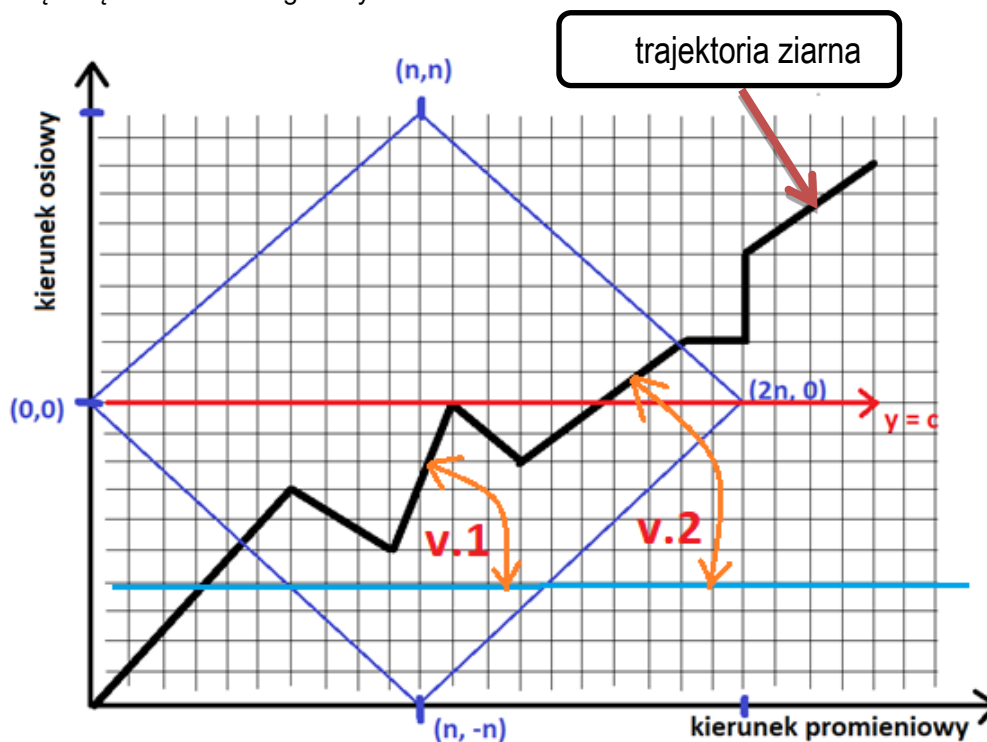
Na rys. 228 zobrazowano dwie przykładowe trajektorie ziarna ściernego, różniące się wielkością promienia krzywizny łuku. Promień R_2 jest mniejszy od promienia R_1 i wymaga większej wartości przyspieszenia normalnego $|\vec{a}_n|$.



Rys. 228. Trajektoria ziarna z większym promieniem R_1 krzywej K dla zmiany prędkości obrotowej w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min, trajektoria ziarna z mniejszym promieniem R_2 krzywej K dla zmiany prędkości obrotowej w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min

5.2. Analiza promienia krzywizny trajektorii ruchu ziarna

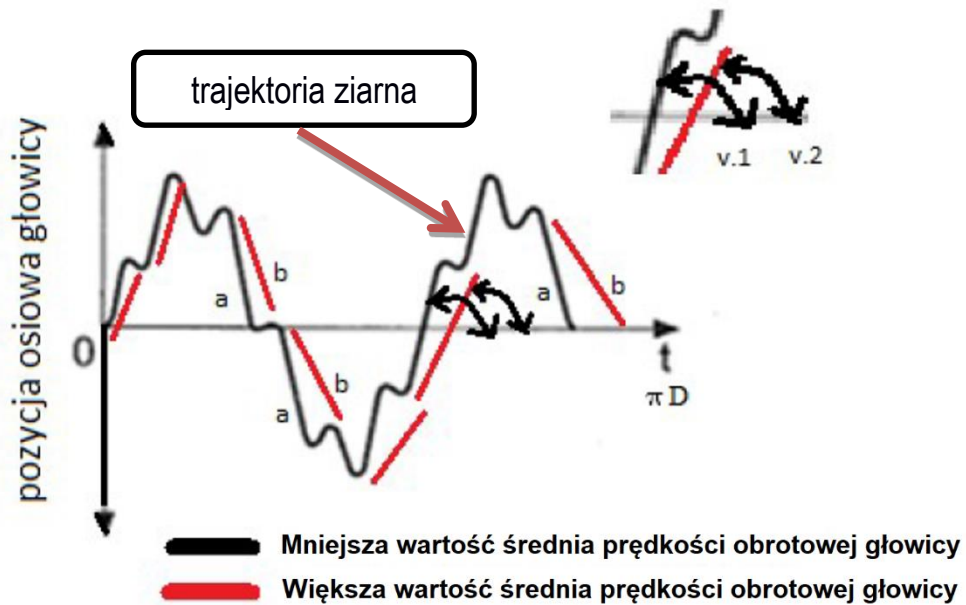
Większy kąt nachylenia ścieżki $v.1$ (rys. 229) względem osi kierunku promieniowego oznacza większą wartość prędkości liniowej osiowej V_{ax} lub mniejszą prędkość obrotową głowicy n . Mniejszy kąt nachylenia ścieżki $v.2$ oznacza natomiast mniejszą wartość prędkości liniowej osiowej V_{ax} lub większą ilość obrotów głowicy n .



Rys. 229. Przykładowa trajektoria ziarna na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu

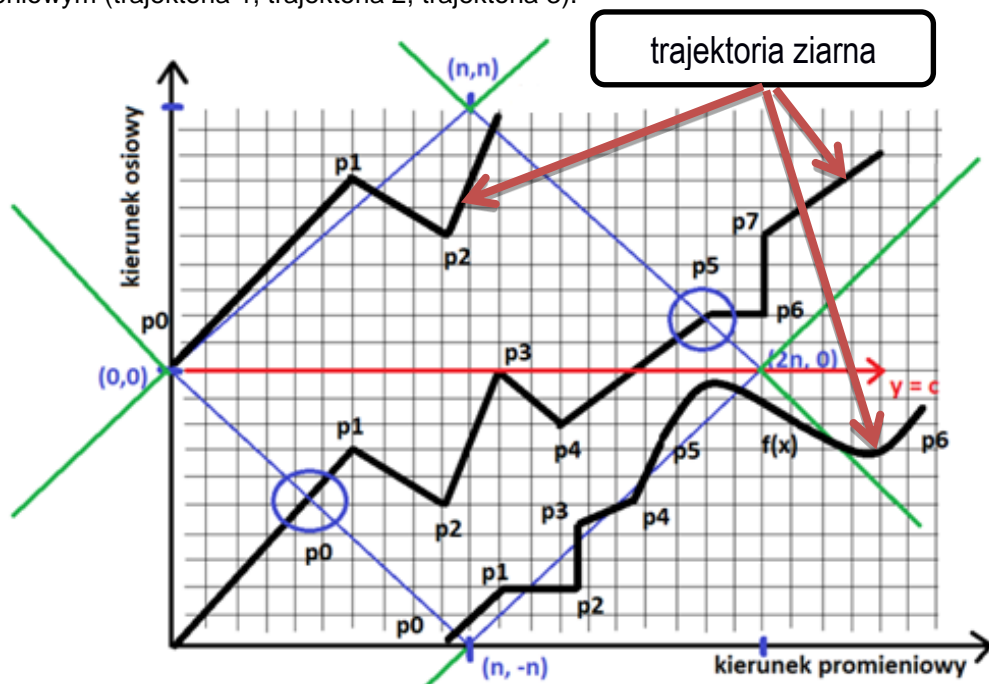
W zależności od wartości parametrów amplitudowych, częstotliwościowych, prędkości obrotowej i skoku głowicy, trajektoria ziarna może uzyskać postać dowolnej krzywej. Poszczególne ścieżki mogą posiadać różne kąty nachylenia stycznych do wykresu funkcji (rys. 230) w zależności od użytych parametrów gładzenia.

Mniejsza prędkość obrotowa, podobnie jak i większa prędkość liniowa osiowa głowicy, powodują zwiększanie się kąta gładzenia (kierunek rysy dąży do kierunku pionowego), zaś większa prędkość obrotowa, podobnie jak i mniejsza prędkość liniowa osiowa powodują zmniejszanie się kąta gładzenia oraz zbliżanie się kierunku rysy olejowej do kierunku poziomego [155,157].



Rys. 230. Krzywa schodkowa uzyskiwana w trakcie gładzenia ze zmienną kinematyką (czyli ze zmienną prędkością i ze zmiennym posuwem głowicy), trajektoria w kolorze czerwonym to ruch ziarna z większą wartością średnią prędkości obrotowej głowicy [157]

Na rozwinięciu gładzonej powierzchni, przedstawionej na rys. 231, wyodrębniono pewien obszar w kształcie czworokąta posiadającego swoje wierzchołki w punktach: $(0, 0)$, (n, n) , $(n, -n)$, $(2n, 0)$. Na rysunku pokazana prosta $y = c$ dzieli przywołany obszar na dwie części. Tor ziarna ściernego pokazano linią grubą, przebiegającą w dowolny sposób w kierunku osiowym i promieniowym (trajektoria 1, trajektoria 2, trajektoria 3).



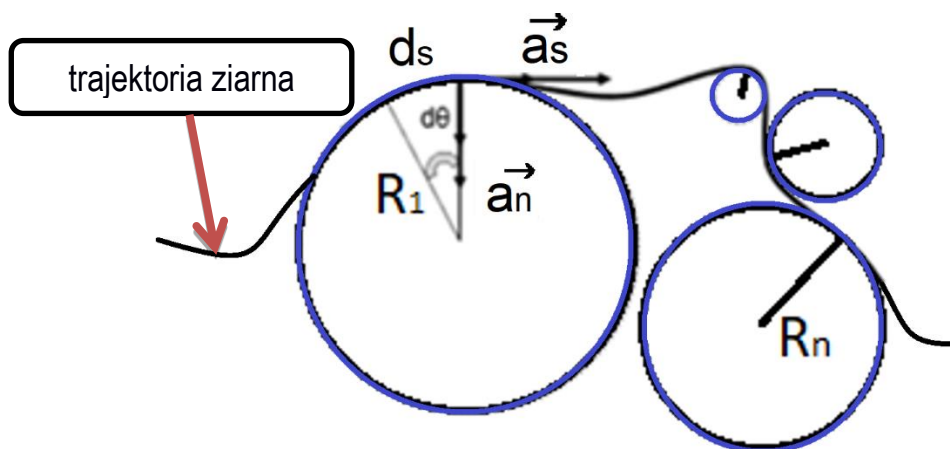
Rys. 231. Przykładowe trajektorie ziarna na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu

Ziarno w chwili $t = 0$ (rys. 231) znajduje się w punkcie $(0, 0)$, w chwilach $t = 1, 2 \dots 2n$ wykonuje „skoki”. Każdy „skok” polega na przesunięciu punktu trajektorii ziarna o jedną jednostkę na prawo i jednocześnie o jednostkę w dół albo w górę. W chwili $t = 2n$, gdyby ziarno znalazło się w punkcie $(2n, 0)$, oznaczałoby to, że zostało wykonanych tyle samo przesunięć w górę jak i w dół. Każdą linię łamaną łączącą możliwe położenie punktów, po którym poruszało się ziarno ściernie w chwilach $t = 0, 1, 2, \dots, 2n$ nazywamy śladem ziarna. Znajdujemy liczbę możliwych śladów poruszającego się ziarna oraz liczbę śladów nie posiadających punktów wspólnych z prostą o równaniu $y = c$ (c – liczba naturalna, $c < n$). Wszystkie ślady punktu znajdują się wewnątrz lub na obwodzie kwadratu o wierzchołkach: $(0, 0), (n, n), (2n, 0), (n, -n)$.

W trakcie prostoliniowego ruchu ziarna występuje n skoków w górę oraz n skoków w dół. Liczba możliwych śladów \mathcal{G} jest równa liczbie n -elementowych kombinacji ze zbioru o $2n$ elementach, wzór (5.5)

$$v = \binom{2n}{n} \quad (5.5)$$

Przykładową krzywoliniową trajektorię ziarna ściernego z zaznaczonymi promieniami R krzywizny zobrazowano na rys. 232.



Rys. 232. Promień krzywizny kanału olejowego $R = ds/d\theta$, (a_n – składowa normalna przyspieszenia, a_s - składowa styczna przyspieszenia)

Wzór na prędkość ruchu ziarna ściernego z przyspieszeniem $a = 0$ otrzymuje postać:

$$v = \frac{L}{t} \quad (5.6)$$

gdzie: L – długość ścieżki ziarna [m]

t – czas [min]



Średnia prędkość ruchu ziarna ściernego w ruchu z przyspieszeniem $a \neq 0$ jest dana za pomocą wzoru:

$$V_{av} = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} = \frac{dL}{dt}$$

(5.7)

gdzie: L_2 - końcowa długość trajektorii ziarna,

L_1 - początkowa długość trajektorii ziarna,

t_2 - czas końcowy,

t_1 - czas początkowy

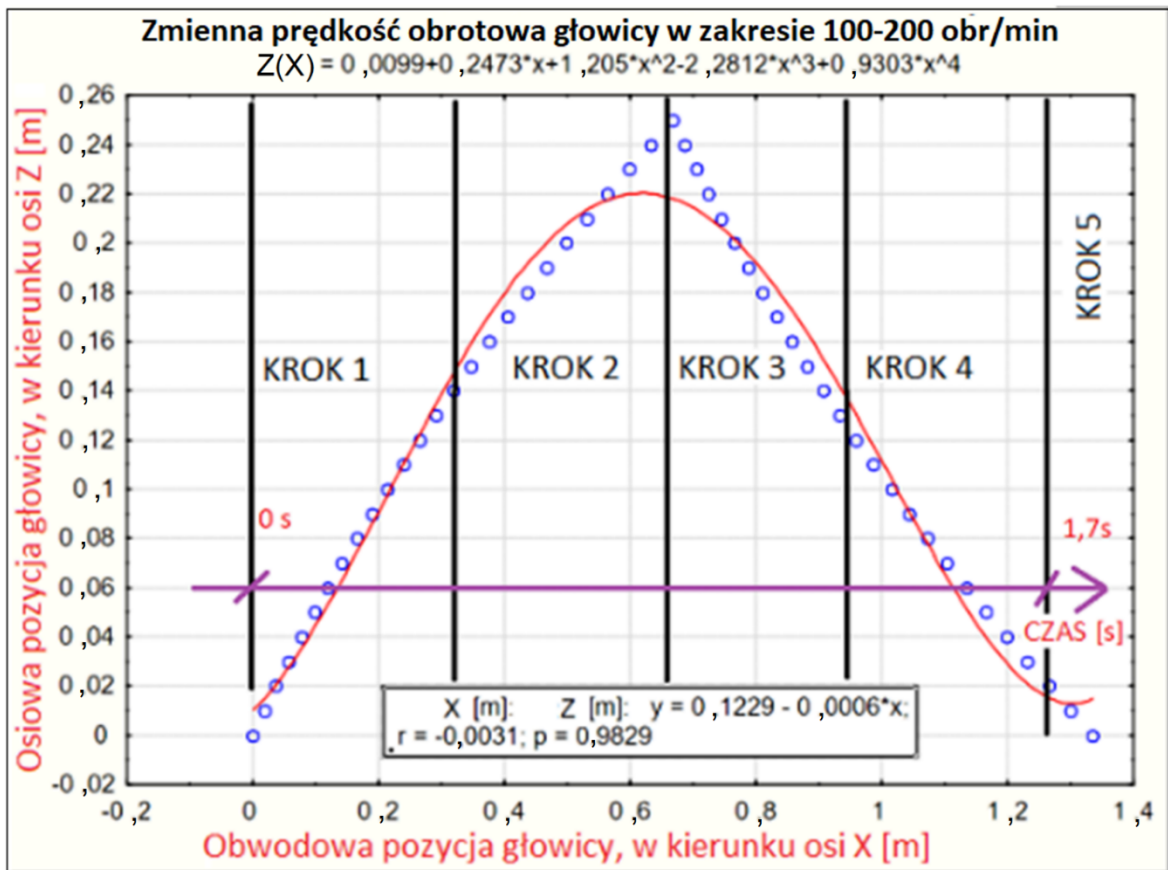
Wzór na długość krzywej L trajektorii ziarna ściernego z punktu a do punktu b na rozwiniętej płaszczyźnie gładzonego otworu jest opisana za pomocą wzoru:

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + \left[\frac{dZ}{dX} \right]^2} dX \quad (5.8)$$

Zmienna kinematyka procesu gładzenia jest najlepszym sposobem obróbki otworów cylindrycznych, zwłaszcza dla przedmiotów cienkościennych. Na rys. 233 przedstawiono trajektorię ziarna ściernego otrzymaną podczas gładzenia ze zmienną prędkością obrotową głowicy gładzącej (w przedziale $n = 100 \div 200$ obr/min) w obu kierunkach ruchu osiowego.

Wykres pokazany na rys. 233 przedstawia trajektorię ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu, na jeden pełny cykl gładzenia trwający $t = 1,7$ s i zawierający 5 pełnych obrotów głowicy gładzącej. Ten sposób prezentacji trajektorii ścieżek ziarna umożliwia uzyskanie funkcji opisującej kształt pojedynczej trajektorii ziarna ściernego opisanej za pomocą funkcji $Z(X)$, gdzie $Z(X) = L$, otrzymanej podczas gładzenia ze zmiennymi warunkami kinematycznymi.

Na rys. 233 przedstawiono funkcję wielomianu czwartego stopnia, który nie jest w stanie właściwie dopasować się do trajektorii ruchu ziarna ściernego poruszającego się w górę i w dół podczas zmiennych warunków gładzenia, dlatego kolejne wykresy będą przedstawiać fragmenty trajektorii ziarna ściernego, opisane za pomocą wielomianu trzeciego stopnia, otrzymane podczas gładzenia przeprowadzanego tylko w kierunku ruchu głowicy do góry. Liczba analizowanych kroków zależy od prędkości obrotowej głowicy gładzącej.



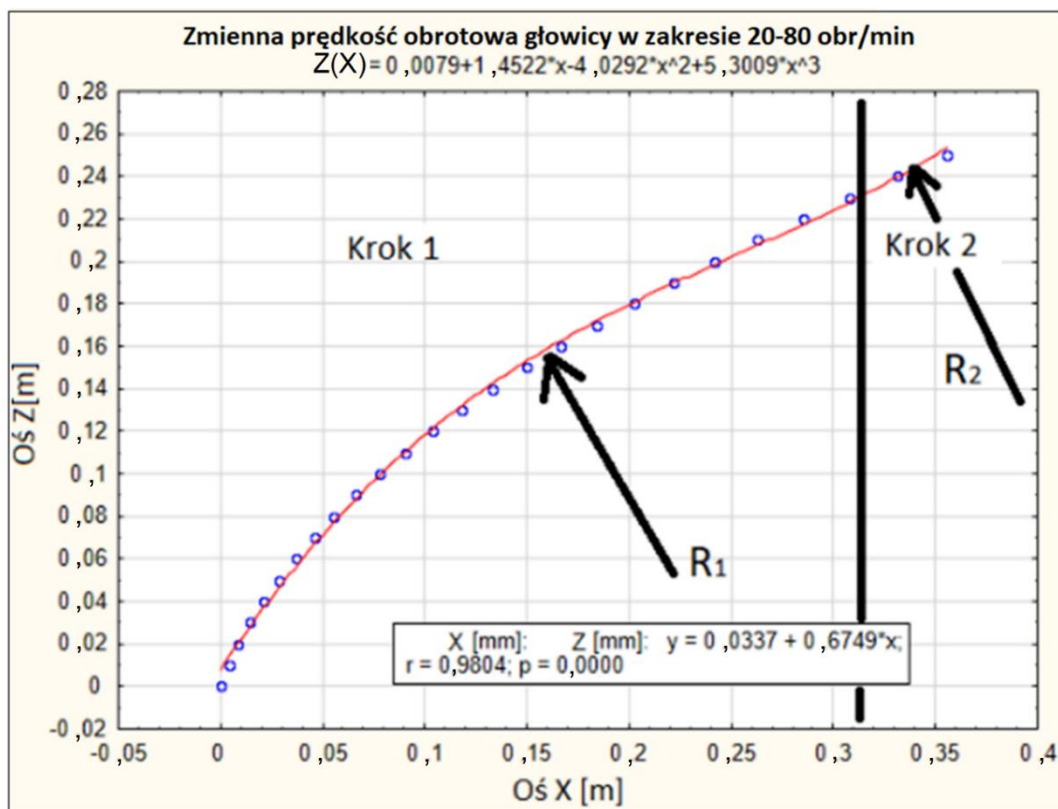
Rys. 233. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy, zmiana prędkości obrotowej w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min; 5 pełnych obrotów głowicy dla jednego cyklu procesu gładzenia (ruch głowicy w dół i w górę) trwającego 1,7 s

Rysunki rys. 234 ÷ rys. 239 przedstawiają trajektorie ruchu ziarn wraz z promieniami krzywizny R krzywych k trajektorii ziarna ściernego, otrzymane w zmiennych warunkach kinematycznych dla różnych parametrów gładzenia (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry - połowa cyklu jednego cyklu roboczego).

Zsumowane wartości promienia R krzywej trajektorii ziarna, dla każdego x w odległości 0,01mm, od wartości $x = 0$ do wartości $x = 0,35$ oraz do wartości $x = 0,5$ umieszczono w opisach rysunków rys. 234 ÷ rys. 239.

Na rys. 234 pokazano trajektorię ziarna ściernego otrzymaną przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, dla gładzenia przeprowadzanego w kierunku ruchu głowicy w górę, ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min. Zmienna prędkość obrotowa głowicy w tym przedziale powoduje przyrost temperatury w trakcie gładzenia trwającego 60 sekund o wartość $\Delta T = 3,025^\circ\text{C}$. Długość trajektorii ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni gładzonego cylindra, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min, w kierunku horyzontalnym wynosi $X = 0,356$ m. Wartość przyspieszenia wypadkowego, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min, wynosi $a = 0,37$ m/s². Wartość promieni krzywizny krzywej w środku każdego pojedynczego cyklu gładzenia (obrotu głowicy) wynosi: $R_1 = 0,504$ m, $R_2 = 0,589$ m. Długość ścieżki w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla poszczególnego obrotu głowicy wynosi: $L_1 = 0,392$ m, $L_2 = 0,048$ m, zaś $L_1 + L_2 = 0,44$ m. Wartość składowej normalnej przyspieszenia ruchu ziarna w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla każdego obrotu głowicy wynosi: $a_{n1} = 0,29$ m/s², $a_{n2} = 2,109$ m/s².

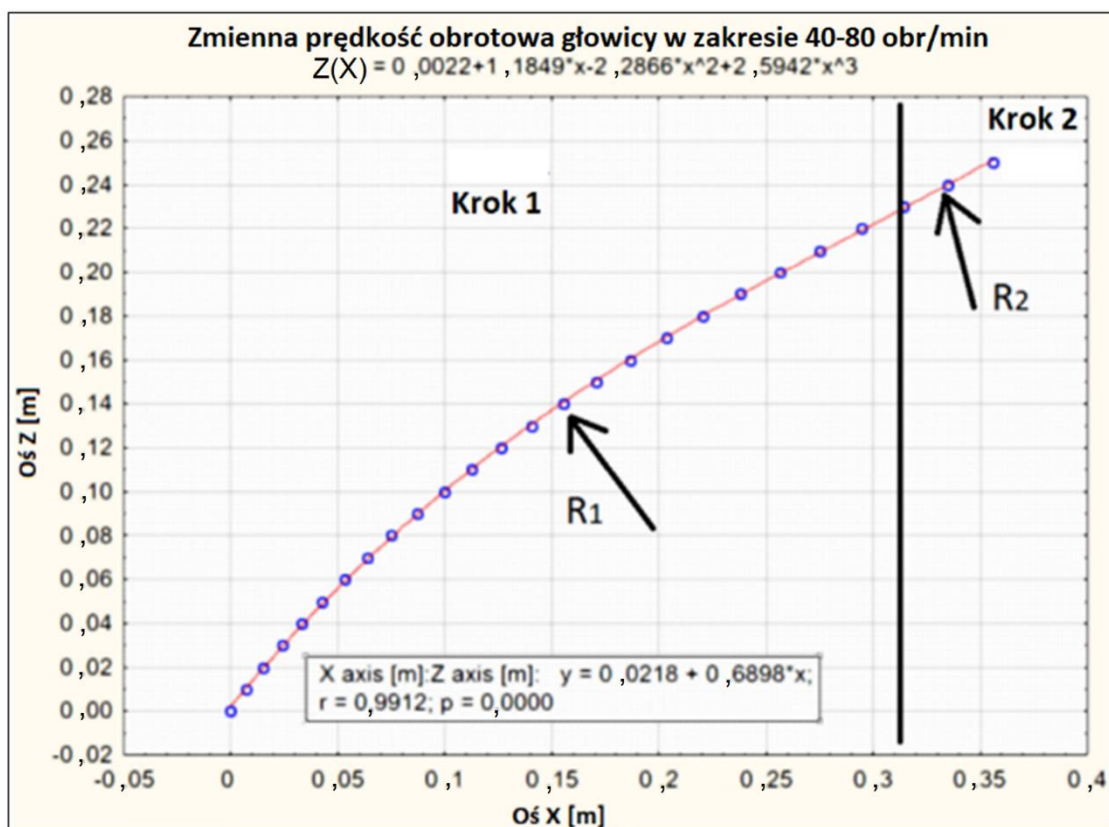
Trajektorię ziarna opisuje wzór: $Z(X) = 0,0079 + 1,4522x - 4,0292x^2 + 5,3009x^3$.



Rys. 234. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). Suma promieni dla krzywej z rys. 238 $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,35\}$ wynosi $\sum R = 45,477$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$ wynosi $\sum R = 52,863$ m

Rys. 235 przedstawia trajektorię ziarna ściernego otrzymaną przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, dla gładzenia przeprowadzanego w kierunku ruchu głowicy w górę, ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 40 \div 80$ obr/min. Zmienna prędkość obrotowa w tym przedziale powoduje przyrost temperatury w trakcie gładzenia trwającego 60 sekund o wartość $\Delta T = 5,03^\circ\text{C}$. Długość trajektorii ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni gładzonego cylindra, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 40 \div 80$ obr/min, w kierunku horyzontalnym wynosi $X = 0,356$ m. Wartość przyspieszenia wypadkowego, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 40 \div 80$ obr/min, wynosi $a = 0,246$ m/s². Wartość promieni krzywizny krzywej w środku każdego pojedynczego cyklu gładzenia (obrotu głowicy) wynosi: $R_1 = 0,807$ m, $R_2 = 0,765$ m. Długość ścieżki w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla kolejnego obrotu głowicy wynosi: $L_1 = 0,391$ m, $L_2 = 0,047$ m, zaś $L_1 + L_2 = 0,438$ m. Wartość składowej normalnej przyspieszenia ruchu ziarna w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla kolejnego obrotu głowicy wynosi: $a_{n1} = 0,193$ m/s², $a_{n2} = 1,095$ m/s².

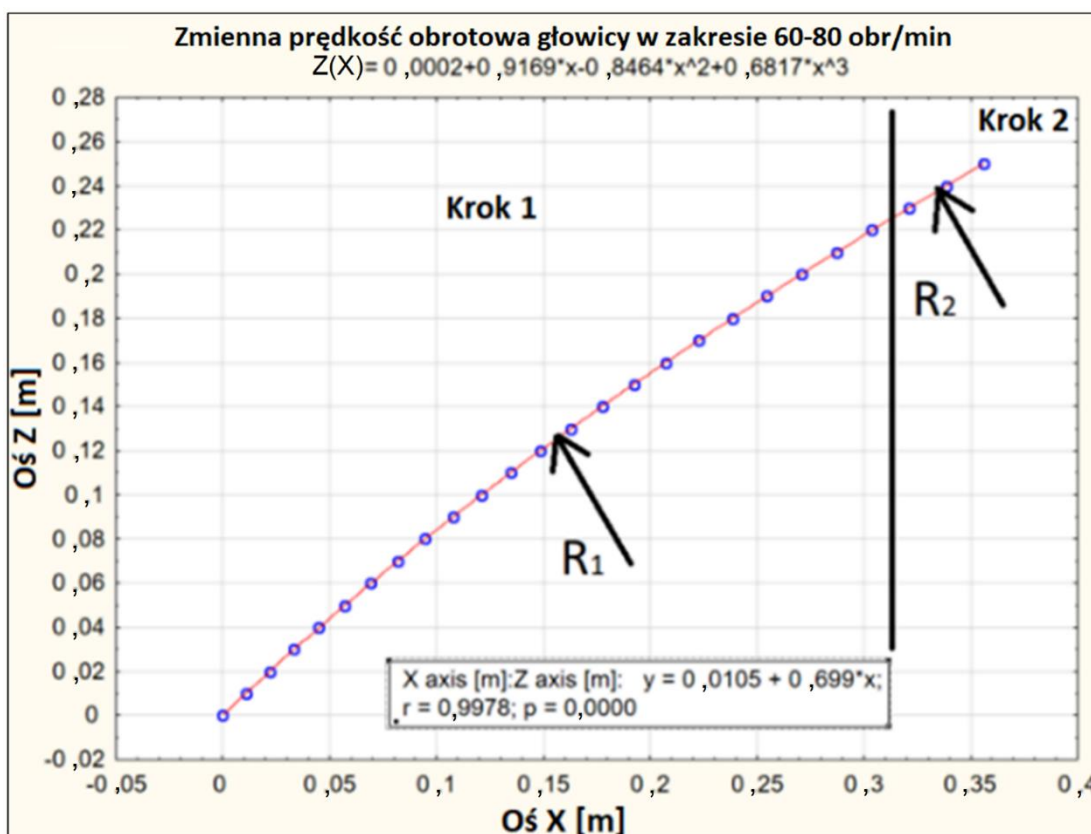
Trajektorię ziarna opisuje wzór $Z(X) = 0,0022 + 1,1849x - 2,2866x^2 + 2,5942x^3$.



Rys. 235. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 40 \div 80$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n – promień krzywizny w kroku nr n , L_n – długość krzywej w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238 $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,35\}$ wynosi $\sum R = 90,698$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$ wynosi $\sum R = 104,18$ m

Na rys. 236 pokazano trajektorię ziarna ściernego otrzymaną przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, dla gładzenia przeprowadzanego w kierunku ruchu głowicy w górę, ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min. Zmienna prędkość obrotowa w tym przedziale powoduje przyrost temperatury w trakcie gładzenia trwającego 60 sekund o wartość $\Delta T = 5,75^\circ\text{C}$. Długość trajektorii ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni gładzonego cylindra, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min, w kierunku horyzontalnym wynosi $X = 0,356$ m. Wartość przyspieszenia wypadkowego, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min, wynosi $a = 0,123$ m/s². Wartość promieni krzywizny krzywej w środku każdego pojedynczego cyklu gładzenia (obrotu głowicy) wynosi: $R_1 = 1,735$ m, $R_2 = 1,476$ m. Długość ścieżki w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla każdego obrotu głowicy wynosi: $L_1 = 0,388$ m, $L_2 = 0,048$ m, zaś $L_1 + L_2 = 0,436$ m. Wartość składowej normalnej przyspieszenia ruchu ziarna w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla każdego obrotu głowicy wynosi: $a_{n1} = 0,095$ m/s², $a_{n2} = 0,177$ m/s².

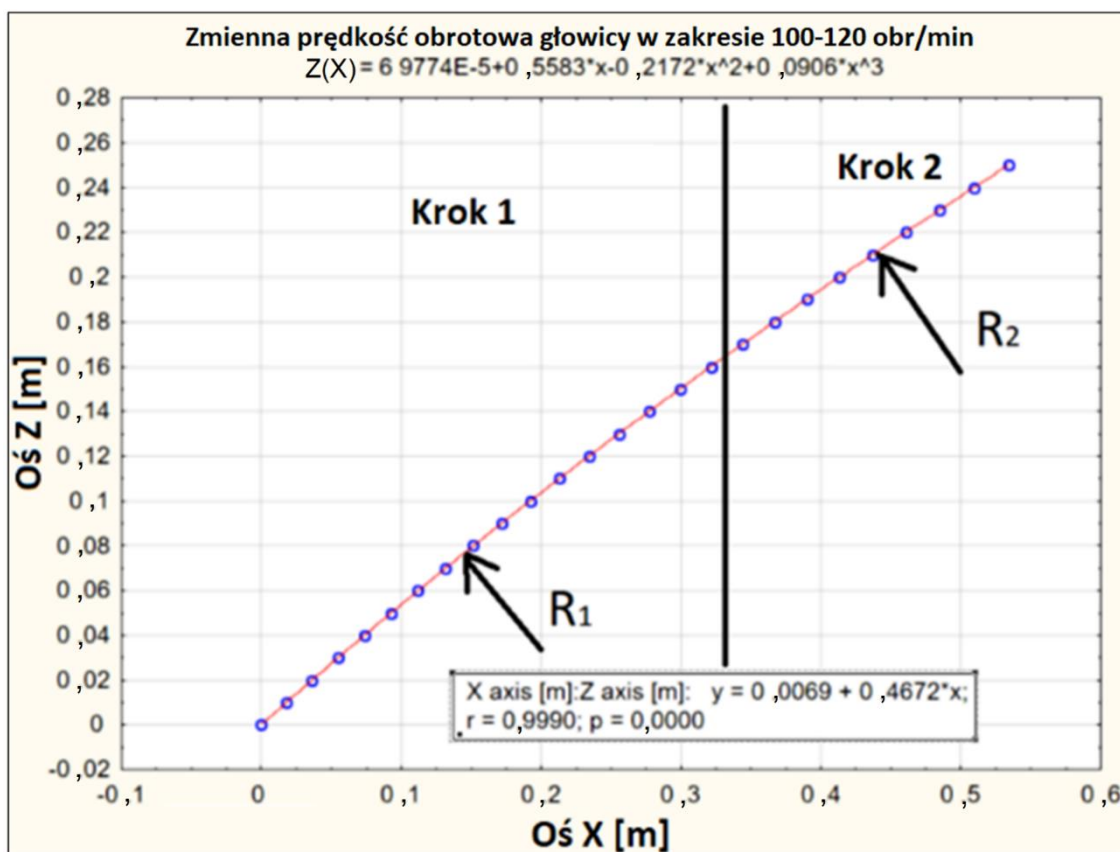
Trajektorię ziarna opisuje wzór $Z(X) = 0,0002 + 0,9169x - 0,8464x^2 + 0,6817x^3$.



Rys. 236. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n – promień krzywizny w kroku nr n , L_n – długość krzywizny w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238 $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,35\}$ wynosi $\sum R = 83,022$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$ wynosi $\sum R = 385,705$ m

Na rys. 237 przedstawiono trajektorię ziarna ściernego otrzymaną przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, dla gładzenia przeprowadzanego w kierunku ruchu głowicy w górę, ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min. Zmienna prędkość obrotowa w tym przedziale powoduje przyrost temperatury w trakcie gładzenia trwającego 60 sekund o wartość $\Delta T = 5,216^\circ\text{C}$. Długość trajektorii ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni gładzonego cylindra, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min, w kierunku horyzontalnym wynosi $X = 0,534$ m. Wartość przyspieszenia wypadkowego, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min, wynosi $a = 0,123$ m/s². Wartość promieni krzywizny krzywej w środku każdego pojedynczego cyklu gładzenia (obrotu głowicy) wynosi: $R_1 = 3,989$ m, $R_2 = 3,793$ m. Długość ścieżki w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla każdego obrotu głowicy wynosi: $L_1 = 0,351$ m, $L_2 = 0,239$ m, zaś $L_1 + L_2 = 0,59$ m. Wartość składowej normalnej przyspieszenia ruchu ziarna w kolejnym pojedynczym cyklu gładzenia dla każdego obrotu głowicy wynosi: $a_{n1} = 0,086$ m/s², $a_{n2} = 0,199$ m/s².

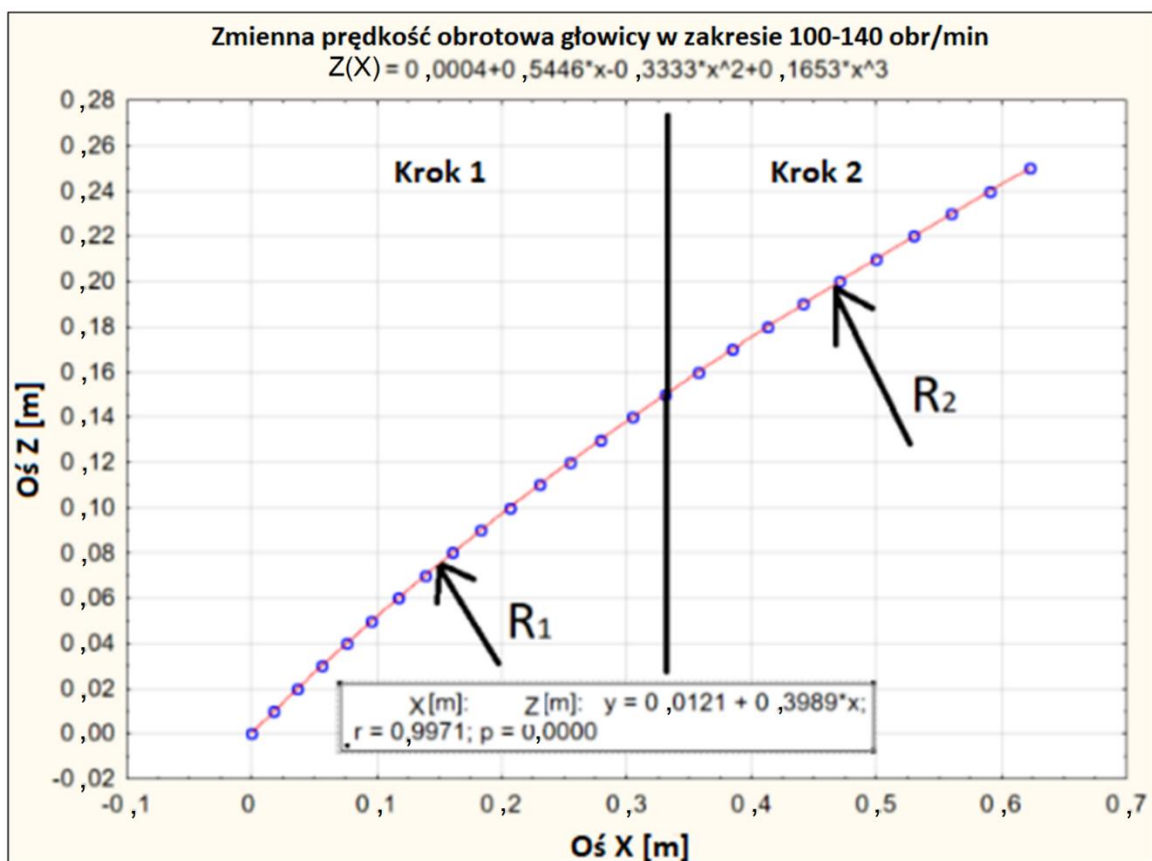
Trajektorię ziarna opisuje wzór $Z(X) = 0,69774 + 0,5583x - 0,2172x^2 + 0,0906x^3$.



Rys. 237. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n – promień krzywizny w kroku nr n , L_n – długość krzywej w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238 $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$ wynosi $\sum R = 150,649$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$ wynosi $\sum R = 247,515$ m

Rys. 238 prezentuje trajektorię ziarna ściernego otrzymaną przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, dla gładzenia przeprowadzanego w kierunku ruchu głowicy w górę, ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 140$ obr/min. Zmienna prędkość obrotowa w tym przedziale powoduje przyrost temperatury w trakcie gładzenia trwającego 60 sekund o wartość $\Delta T = 7,524^\circ\text{C}$. Długość trajektorii ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni gładzonego cylindra, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 140$ obr/min, w kierunku horyzontalnym wynosi $X = 0,623$ m. Wartość przyspieszenia wypadkowego, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 140$ obr/min, wynosi $a = 0,246$ m/s². Wartość promieni krzywizny krzywej w środku każdego pojedynczego cyklu gładzenia (obrotu głowicy) wynosi: $R_1 = 2,588$ m, $R_2 = 2,578$ m. Długość ścieżki w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla każdego obrotu głowicy wynosi: $L_1 = 0,346$ m, $L_2 = 0,332$ m, zaś $L_1 + L_2 = 0,678$ m. Wartość składowej normalnej przyspieszenia ruchu ziarna w kolejnym cyklu gładzenia dla każdego obrotu głowicy wynosi: $a_{n1} = 0,582$ m/s², $a_{n2} = 1,647$ m/s².

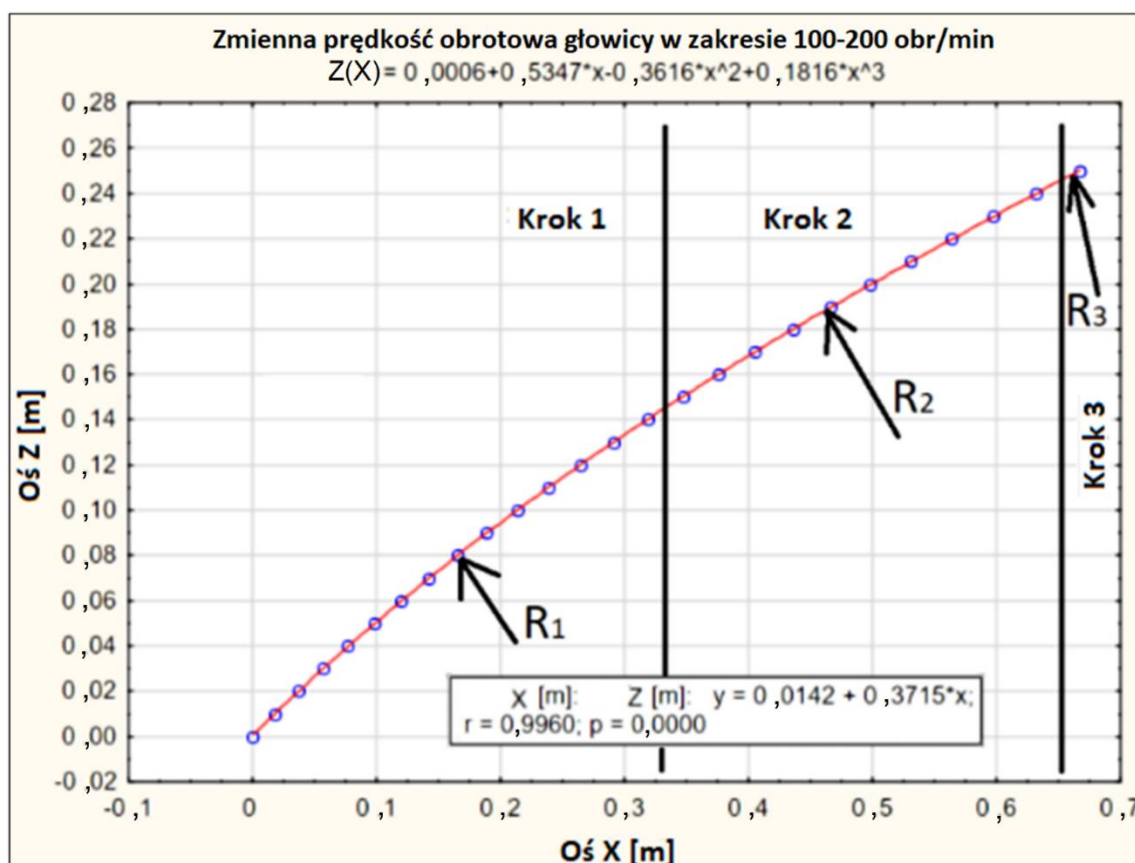
Trajektorię ziarna opisuje wzór $Z(X) = 0,0004 + 0,5446x - 0,3333x^2 + 0,1653x^3$.



Rys. 238. Trajektorja ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 140$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n – promień krzywizny w kroku nr n , L_n – długość krzywizny w kroku nr n . Suma promieni dla krzywizny z rys. 238 $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$ wynosi $\sum R = 99,464$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$ wynosi $\sum R = 173,11$ m

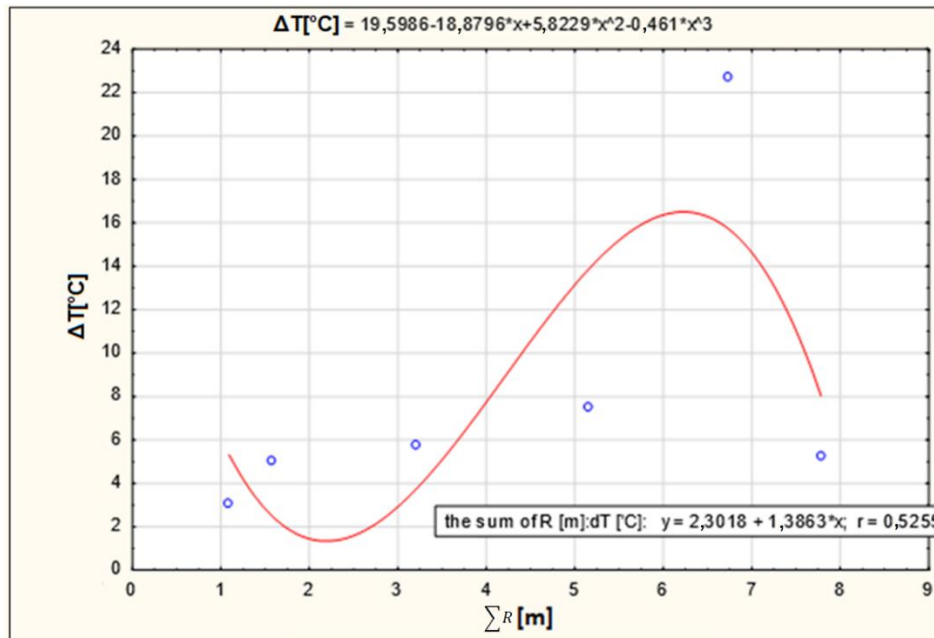
Na rys. 239 pokazano trajektorię ziarna ściernego otrzymaną przy gładzeniu ze zmienną kinematyką, dla gładzenia przeprowadzanego w kierunku ruchu głowicy w górę, ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min. Zmienna prędkość obrotowa w tym przedziale wartości powoduje przyrost temperatury w trakcie gładzenia trwającego 60 sekund o wartość $\Delta T = 22,701^\circ\text{C}$. Długość trajektorii ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni gładzonego cylindra, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min, w kierunku horyzontalnym wynosi $X = 0,668$ m. Wartość przyspieszenia wypadkowego, dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową głowicy w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min, wynosi $a = 0,616$ m/s². Wartość promieni krzywizny krzywej w środku każdego pojedynczego cyklu gładzenia (obrotu głowicy) wynosi: $R_1 = 2,348$ m, $R_2 = 2,348$ m, $R_3 = 2,042$ m. Długość ścieżki w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla poszczególnego obrotu głowicy wynosi: $L_1 = 0,343$ m, $L_2 = 0,33$ m, $L_3 = 0,041$ m, $L_1 + L_2 + L_3 = 0,714$ m. Wartość składowej normalnej przyspieszenia ruchu ziarna w każdym pojedynczym cyklu gładzenia dla poszczególnego obrotu głowicy wynosi: $a_{n1} = 0,7$ m/s², $a_{n2} = 1,928$ m/s², $a_{n3} = 3,32$ m/s².

Trajektorię ziarna opisuje wzór $Z(X) = 0,0006 + 0,5347x - 0,3616x^2 + 0,1816x^3$.



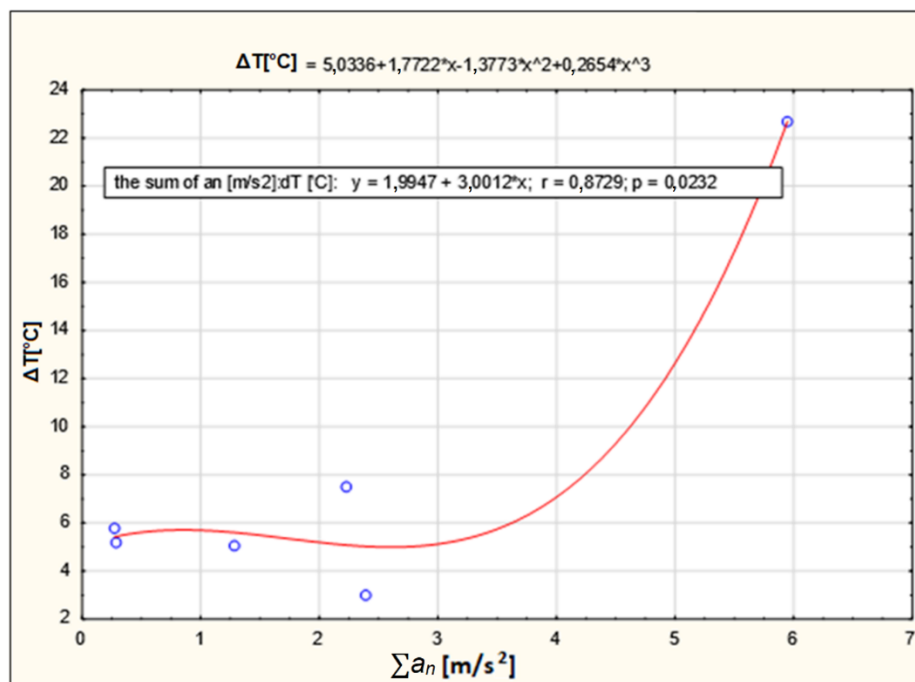
Rys. 239. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n – promień krzywizny w kroku nr n , L_n – długość krzywej w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238, $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 90,773$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$ wynosi $\sum R = 161,67$ m

Na rys. 240 zaprezentowano wpływ sumarycznej wartości promienia $\sum R$ krzywizny k trajektorii ziarna ściernego na przyrost temperatury ΔT gładzonego przedmiotu. Dla niższych wartości promienia R [m] krzywizny k trajektorii ziarna występuje mniejszy przyrost temperatury ΔT [°C] gładzonego przedmiotu niż dla większych wartości R [m].



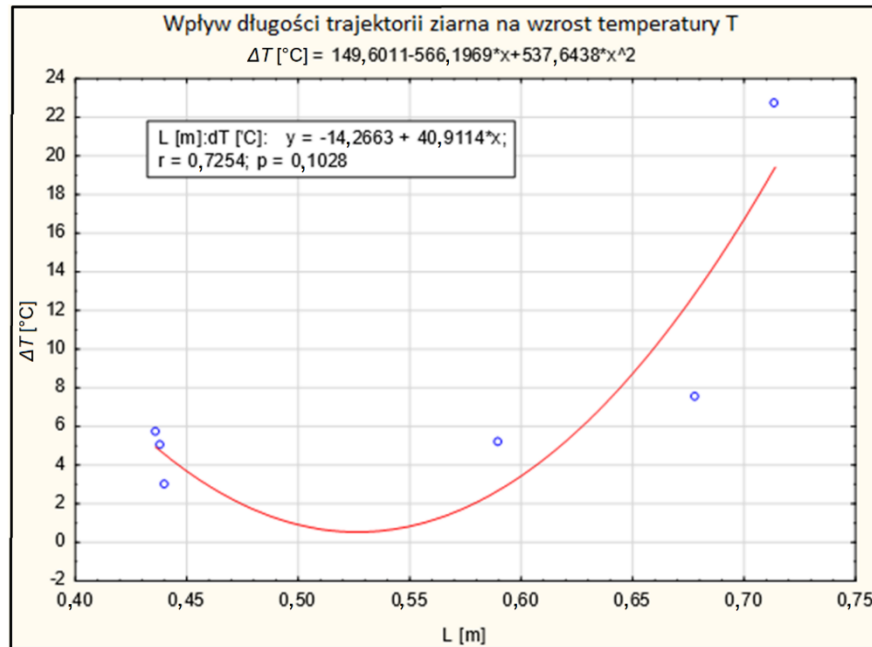
Rys. 240. Wpływ sumarycznej wartości promienia $\sum R$ [m] krzywizny trajektorii ziarna na przyrost temperatury ΔT [°C]

Rys. 241 omawia wpływ sumarycznej wartości przyspieszenia normalnego $\sum a_n$, dla poruszającego się ziarna ściernego, na przyrost temperatury ΔT gładzonego przedmiotu. Najniższy przyrost temperatury ΔT [°C] uzyskano dla $a_n = 2,2$ m/s².



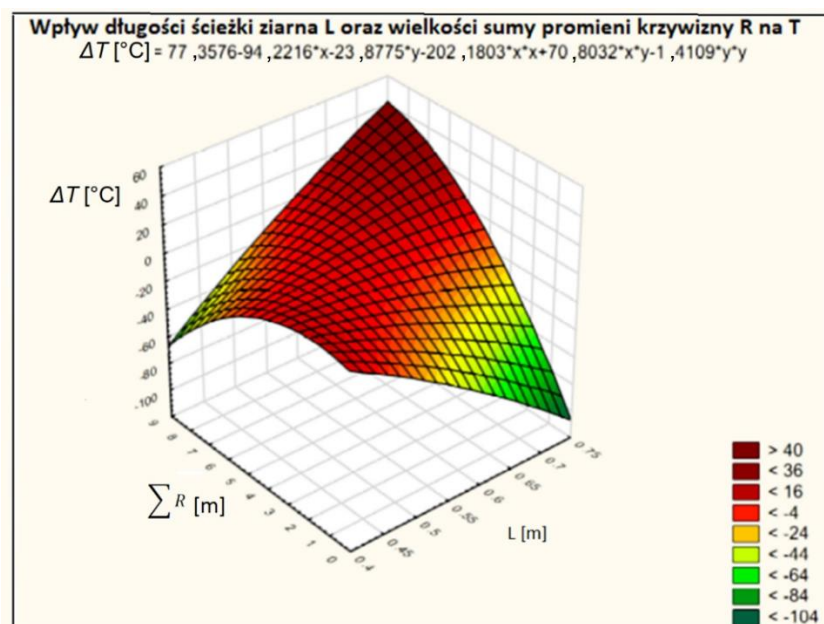
Rys. 241. Wpływ sumarycznej wartości przyspieszenia normalnego $\sum a_n$ [m/s²] na przyrost temperatury ΔT [°C]

Na rys. 242 zaprezentowano wpływ długości trajektorii ziarna ściernego o długości L [m] na przyrost temperatury ΔT [°C] gładzonego przedmiotu. Im większa długość trajektorii, tym większy przyrost temperatury przedmiotu gładzonego.



Rys. 242. Wpływ długości trajektorii ziarna ściernego o długości L [m] na przyrost temperatury ΔT [°C] gładzonego przedmiotu

Na rys. 243 zaprezentowano wpływ długości ścieżki ziarna L [m] oraz wielkości promieni R [m] krzywizny k trajektorii ziarna, na wielkość przyrostu temperatury ΔT [°C] przedmiotu gładzonego. **Bardzo dobrym wynikiem przeprowadzonych badań eksperymentalnych jest występowanie niższego przyrostu temperatury przedmiotu dla mniejszej wartości sumy promieni $\sum R$ [m] krzywizn trajektorii ziarna ściernego.**

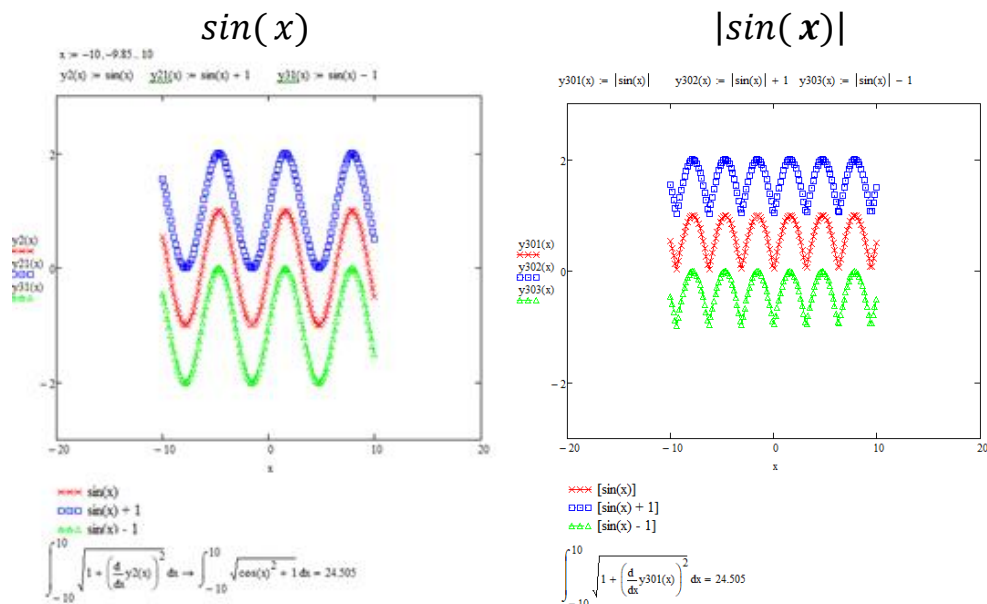


Rys. 243. Wpływ długości ścieżki ziarna L [m] oraz promienia krzywizny R [m] na przyrost temperatury ΔT [°C]

Ziarna posiadają różną wytrzymałość, w zależności od kierunku przyłożenia siły do ich powierzchni. Niektóre płaszczyzny w trakcie skrawania ulegną wykruszeniu lub pęknięciu. Cykl pracy ziarna powtarza się, w ten sposób występuje samoostrzenie się narzędzia obróbkowego.

Zmienna kinematyka gładzenia zapewnia optymalną pracę ziarna ze względu na ułatwienie samooostrzenia się narzędzia oraz ze względu na obniżenie temperatury występującej w układzie OUPN. Zmienna kinematyka gładzenia poprawia również ewakuację wiórów z obszaru skrawania. Literatura oraz badania własne wskazują na korzyści ze stosowania zmiennej kinematyki gładzenia.

Na rys. 244 pokazano przykłady trajektorii ziarna ściernego, otrzymanej (na rozwiniętej powierzchni otworu) podczas gładzenia ze zmienną kinematyką, o różnej częstotliwości i o różnej wielkości amplitudy ruchu głowicy (z jednakową długością ścieżki $L_{\text{ścież}} = 24,5\text{mm}$ na fragmencie obwodu gładzonego otworu o długości $L_{\text{obw}} = 20\text{ mm}$). Można tę samą długość ścieżki wykonywać z mniejszą lub z większą liczbą zmian kierunku obróbki, oraz z większym lub z mniejszym promieniem krzywizny trajektorii ziarna. Funkcja $\sin(x)$ posiada mniejszą ilość zmian kierunku obróbki (mniejsza ilość ekstremów) oraz większą amplitudę (dłuższa trasa ziarna ze stałym kierunkiem) niż funkcja $|\sin(x)|$. Można dokonywać wyboru kształtu trasy ziarna ściernego, otrzymując dla różnych funkcji opisującej trajektorię ruchu ziarna, różny kształt trajektorii.



Rys. 244. Przykładowe trajektorie ziarna ściernego o różnej wielkości amplitudy i o różnej częstotliwości ruchu, na rozwiniętej płaszczyźnie gładzonego otworu, w przedziale $\hat{x} \in \langle -10, 10 \rangle$ (czyli na fragmencie obwodu o długości 20 mm) z tą samą długością ścieżki $L = 24,505\text{ mm}$ (obliczenia wykonano w oprogramowaniu Mathcad)

Podczas gładzenia, wraz z przyrostem prędkości obrotowej głowicy przy zachowaniu stałej prędkości skoku, kąt nachylenia stycznej do trajektorii ziarna maleje a temperatura obróbki rośnie.

Podczas zmniejszania prędkości obrotowej głowicy przy zachowaniu stałej prędkości skoku kąt stycznej do trajektorii ziarna rośnie a temperatura obróbki maleje. Podczas zwiększania wartości

skoku głowicy przy zachowaniu stałej prędkości obrotowej kąt nachylenia stycznej do trajektorii ziarna rośnie. Podczas zmniejszania wartości skoku głowicy przy zachowaniu prędkości obrotowej kąt stycznej do trajektorii ziarna maleje.

Przy zmianie kierunku skrawania materiał obrabiany napiera na powierzchnie ziarna pod różnym kątem i ze zmienną wartością siły, ze względu na zmianę wielkości powierzchni skrawającej ziarna. Przy stałym kierunku skrawania występuje niezmienny kierunek natarcia materiału na ziarno.

Wybór optymalnego kształtu ścieżki roboczej, będącej zależnością kierunku skrawania ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu, może być wspomagany analizą wielkości promienia krzywizny otrzymywanej trajektorii, która to krzywizna ma decydujący wpływ na sposób pracy narzędzia, oraz na wielkość powstającej w układzie *OUPN* temperatury.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

6.1. Wnioski poznawcze

Przedmioty gładzone są stosowane w wielu gałęziach przemysłu, np. przy produkcji elementów silników spalinowych: tulei cylindrowych, korbowodów, jak również do produkcji cylindrów hydraulicznych, siłowników pneumatycznych oraz do wykonywania elementów maszyn charakteryzujących się małą chropowatością powierzchni i dużą dokładnością wymiarową otworów. Zapotrzebowanie na elementy gładzone stale wzrasta, co powoduje konieczność rozwoju tej metody obróbki wykończeniowej.

Elementy gładzone zapewniają mniejszy współczynnik tarcia oraz dłuższą żywotność współpracujących elementów np. silnika i wpływają na zmniejszenie ilości emisji środków toksycznych do środowiska. Mniejsze zużywanie się elementów współpracujących oraz niższy współczynnik tarcia uzyskiwany jest wskutek powstawania podczas gładzenia kanałów olejowych dystrybuujących olej smarny i zapewniających stałą obecność oleju w kanale, co jest kluczowym zadaniem podczas rozruchu silnika i kolejno w trakcie jego eksploatacji.

Występuje duża ilość możliwych do uzyskania kombinacji kształtów kanałów olejowych. Trajektoriami ziarna uzależnionymi jest od parametrów prędkości obrotowej, prędkości skoku, długości skoku, oraz od dodatkowych oscylacji głowicy w kierunku pionowym, poziomym lub i pionowym i poziomym jednocześnie. Wiele również zależy od możliwości sterowania zmianą kierunku posuwu i obrotu głowicy na honownicach o różnej konstrukcji.

Zmiana prędkości obrotowej głowicy gładzącej, w trakcie trwania cyklu obróbki, zapewnia dobrą jakość powierzchni obrabianej oraz korzystne, dla minimalizacji odchyłki termicznej gładzonych przedmiotów, zmniejszenie temperatury w układzie *OUPN*.

Większość opracowań literatury związanych z zagadnieniem gładzenia opisuje wynik procesu w wymiarze analizy otrzymywanych parametrów profilu chropowatości. Kluczowym



i opisywanym zagadnieniem również są uzyskiwane odchyłki kształtu gładzonego otworu. Parametry profilu chropowatości oraz uzyskiwane wartości odchyłek kształtu stanowią główne kryterium wyboru metody gładzenia w procesie technologicznym.

Analizując wydajność procesu należy brać pod uwagę zagadnienie przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego wskutek obróbki, co wpływa na deformacje kształtu otworu oraz co powoduje konieczność studzenia przedmiotu obrabianego do temperatury otoczenia. Przedmiot ostudzony umożliwi na weryfikację otrzymanych wymiarów średnic wraz z ich odchyłkami kształtu w kilku przekrojach na długości gładzonego otworu.

Niższa temperatura przedmiotu zatem umożliwi na skrócenie czasu obróbki, eliminuje konieczność podziału gładzenia na etapy lub minimalizując ich ilość. Dla obróbki seryjnej, zagadnienie obniżenia temperatury przedmiotu gładzonego jest kluczowym zagadnieniem. Wraz ze wzrostem produkcji elementów gładzonych redukcja czasu potrzebnego na obróbkę jest wskazana i oczekiwana.

Z pracy wynikają nst. wnioski poznawcze:

1. Większa wartość zmiennej prędkości obrotowej, w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min wpływa korzystnie na zmniejszenie odchyłki walcowości (otworu o średnicy $d = 100$ mm) oraz na uzyskanie najniższego przyrostu temperatury gładzonego przedmiotu, wynoszącego $\Delta T +3,03$ °C / min. Temperatura przedmiotu gładzonego ulega zmniejszeniu o 35,2% w porównaniu do gładzenia tradycyjnego.
2. Większa wartość średnia zmiennego posuwu głowicy V_{ax} w zakresie $1000 \div 6000$ mm/min wpływa korzystnie na zmniejszenie odchyłki walcowości gładzonego otworu, do wartości 0,041 mm. Odchyłka walcowości dla zmiennego posuwu, zastosowanego przy stałej prędkości obrotowej głowicy gładzącej, ulega zmniejszeniu o 12,77% w porównaniu do gładzenia tradycyjnego.
3. Mniejsza wartość zmiennego posuwu głowicy wpływa na zmniejszenie parametrów profilu chropowatości, przy czym uzyskane parametry nie są mniejsze niż uzyskiwane podczas gładzenia tradycyjnego.
4. Średnia wielkość wartości zmiennej prędkości obrotowej wpływa na zmniejszenie parametrów profilu chropowatości, m.in. R_a , R_z , R_p , R_q , R_k , R_{pk} , R_{vk} .
5. Większe ciśnienie nacisku oselki do przedmiotu gładzonego powoduje większą odchyłkę walcowości otworu.
6. Gładzenie przeprowadzane ze zmianą prędkości obrotowej w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min powoduje wzrost temperatury ΔT gładzonej powierzchni o blisko 23 °C/min. Większa prędkość obrotowa głowicy powoduje wyższą temperaturę gładzonego przedmiotu.
7. Większa prędkość obrotowa wpływa na szybsze zużycie narzędzia ściernego, możliwe jest całkowite zużycie narzędzia w czasie 60 s





8. Przyrost temperatury gładzonego przedmiotu w największym stopniu uzależniony jest od wartości ciśnienia roboczego nacisku osetki ściernej do obrabianej powierzchni gładzonego otworu.
9. Podczas gładzenia przedmiotów cienkościennych z różną grubością ścianek wydajność obróbki w każdym przekroju jest różna i zastosowanie zmiennej długości skoku głowicy wspomaga proces uzyskania otworu z minimalną odchyłką kształtu walcowości.
10. Niższa wartość sumy promieni krzywizny krzywej trajektorii ziarna ściernego wpływa na obniżenie temperatury przedmiotu obrabianego.
11. Zmienna kinematyka gładzenia, z wartością przyspieszenia normalnego $a_n = 2,2 \text{ m/s}^2$, umożliwia zminimalizowanie odchyłki walcowości otworu cienkościennej tulei cylindra.
12. Gładzenie ze zmienną kinematyką, czyli gładzenie ze zmianą prędkości obrotowej oraz ze zmianą prędkości skoku głowicy, wpływa korzystnie na przebieg obróbki i zaleca się stosować taką metodę obróbki do przedmiotów cienkościennych, szczególnie tych z przekrojami o różnych grubościach.

6.2. Proponowane kierunki dalszych badań

Wdrożenie do oprogramowania honownic sterowania krzywizną trajektorii ziarna za pomocą funkcji opisującej trajektorię ziarna ściernego, może stanowić istotny krok w rozwoju nowoczesnych honownic CNC.

Honownice CNC posiadają możliwość zaprogramowania prędkości obrotowej, prędkości skoku głowicy, prędkości wysuwu osetki, wartości ciśnienia docisku osetki do przedmiotu gładzonego, jednak nie posiadają możliwości weryfikacji, związanej z przyrostem temperatury, wielkości odkształcenia termicznego gładzonego otworu. Honownice CNC nie posiadają możliwości weryfikacji i korekcji wydajności usuwania materiału na ściankach o różnej grubości. Sterowanie kształtem trajektorii ziarna, w zależności od konstrukcji przedmiotu może pomóc w rozwiązaniu tych kłopotów wykonawczych.

Literatura oraz badania własne potwierdzają występowanie problematyki nagrzewania się przedmiotów w trakcie gładzenia, co skutkuje odchyłkami walcowości gładzonego otworu.

Sterowanie trajektorią ziarna ściernego, umożliwiające generowanie na gładzonej powierzchni kształtów ścieżek o różnych krzywiznach, umożliwia na zmniejszenie przyrostu temperatury, wielkości odchyłki walcowości oraz na wyrównanie wydajności usuwania nadmiaru materiału w przekrojach o różnej grubości, na całej długości gładzonego otworu.

Wzrost wydajności obróbki seryjnej mógłby być znaczący po wdrożeniu do honownic CNC narzędzi kontrolujących temperaturę przedmiotów gładzonych (rys. 245 / Dodatek A).





WYKAZ LITERATURY

1. Akkurt A. (2011): Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel, *Journal of Materials Engineering and Performance* 20 (6), s. 960÷968. DOI: 10.1007/s11665-010-9718-x.
2. Allard N. (2007): Consequences of machining on roughness and functions of cylinder liners surfaces. Final year project from 12th of February till 29th of June 2007, University of Halmstad
3. Anderberg C., Pawlus P., Rosén B.G., Thomas T.R. (2008): Alternative descriptions of roughness for cylinder liner production, *Journal of Materials Processing Technology* 209, s. 1936 ÷ 1942. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.059.
4. Animex: Manual Honing tools RM404D, dostępne na stronie internetowej: www.animextechnology.ch/documents/en/RM404D.pdf w dniu 28.01.2018.
5. Arantes L.J., Fernandes K.A., Schramm C.R., Silveira Leal J.E., Piratelli-Filho A., Franco S.D., Arencibia R.V. (2017): The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93, s. 635 ÷ 649. DOI: 10.1007/s00170-017-0544-2.
6. Babiczew A.P., Poljanchikov Ju.I., Slavin A.V. (2013): Gładzenie. Министерство образования и науки Российской Федерации. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т; Донской гос. техн. ун-т. – Волгоград.
7. Barnes: Precision honing & bore finishing, dostępne na stronie internetowej: <http://www.barneshoning.com/assets/files/BarnesBrochure.pdf> w dniu 18.03.2018.
8. Barylski A., Sender P. (2014): Badania przyrostów średnic i temperatury przedmiotów podczas gładzenia długich otworów w warunkach produkcyjnych, *Mechanik* 9, s. 34 ÷ 43.
9. Borse S., Chaudhari A., Deshmukh S., Bhandarkar M.S. (2016): Honing machine stone feeding system, *International journal of innovative research in electrician, electronics, instrumentation and control engineering* 4 (3). DOI: 10.17148/IJREEICE.2016.4322.
10. Bouassida H. (2014): Lubricated piston ring cylinder liner contact : influence of the liner microgeometry. INSA de Lyon, dostępne na stronie internetowej: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2014ISAL0088/these.pdf>.
11. Brush research manufacturing Co. Inc.: A study of a cylinder wall micro-structure, dostępne na stronie internetowej: <http://info.brushresearch.com/study-of-cylinder-wall-micro-structure> w dniu 18.03.2018.
12. Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J. (2017): Residual stresses induced by honing processes on hardened steel cylinders. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Tom 88, Wydanie 5 ÷ 8, s. 2321 ÷ 2329
13. Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J. (2011): Roughness variability in the honing process of steel cylinders with CBN metal bonded tools. w: *Precision Engineering* 35, s. 289 ÷ 293. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.11.004.
14. Buj-Corral I., Álvares-Florez J., Domingurz-Fernandez A. (2018): Acoustic emission analysis for the detection of appropriate cutting operations in honing processes, *Mechanical Systems and Signal Processing* 99, s. 873 ÷ 885, dostępne na stronie internetowej: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.06.039>.
15. Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Coba-Salcedo M. (2014): Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing, *Precision Engineering* 38, s. 100 ÷ 108. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.07.009.
16. Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Rodero-de-Lamo L., Marco-Almagro Li. (2015): Comparison between mathematical models for roughness obtained in test machine and in industrial machine in semifinish honing processes. *The Manufacturing Engineering Society International*



- Conference, MESIC 2015, Elsevier Ltd., Procedia Engineering 132, s. 545 ÷ 552.
DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.531.
17. Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Salcedo M.C. (2010): Use of roughness probability parameters to quantify the material removed in plateau-honing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50, s. 621 ÷ 629. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.02.007.
 18. Bujukli I.M., Kolesnik V.M. (2015): Improving accuracy of holes honing, *Odeskyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi* (1), s. 34 ÷ 43. DOI: 10.15276/opu.1.45.2015.07.
 19. Cabanettes F., Dimkovski Z., Rosén B.G. (2015): Roughness variations in cylinder liners induced by honing tool's wear, *Precision Engineering* 41, s. 40 ÷ 46.
DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.01.004.
 20. Cabanettes F., Fahlgren L., Hoering T., Rosén B.G. (2014): Global and local mapping of motor blocks liners roughness for the analysis of honing performance, *J. Phys.: Conf. Ser.* 483. DOI: 10.1088/1742-6596/483/1/012009.
 21. Chavan P.S., Harne M.S. (2013): Effect Of Honing Process Parameters On Surface Quality Of Engine Cylinder Liners, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 2 (4).
 22. Chris-Marine: Automatic honing machine Hon A, dostępne na stronie internetowej: https://www.chris-marine.com/wp-content/uploads/2015/09/HONA_H044_1615.pdf w dniu 18.03.2018.
 23. Chris-Marine: Liner wear measurement, dostępne na stronie internetowej: https://www.chris-marine.com/wp-content/uploads/2014/05/LDM-brochure_web3.pdf w dniu 18.03.2018.
 24. Costa H.L., Hutchings I.M. (2005): Reciprocating lubricated sliding on textured steel surfaces.: *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, 17 (1/2).
 25. Ćalkin I.A. (2016): Повышение качества внутренних цилиндрических поверхностей при финишной обработке деталей технологических машин НГК. Институт нефти и газа институт, Красноярск.
 26. Dahlmann D., Denkena B. (2017): Hybrid tool for high performance structuring and honing of cylinder liners, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.032.
 27. Deepak Lawrence K., Ramamoorthy B. (2016): Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines, *Applied Surface Science* 365, s. 19–30, dostępne na stronie internetowej: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.245>.
 28. Delapena Honing Equipment Ltd.: Mandrels & accessories for honing diameters 1.14 to 79.37 mm (0.045 ÷ 3.125"), dostępne na stronie internetowej: http://www.delapena.co.uk/pdf/tooling/mandrels_accessories_brochure_1.pdf w dniu 18.03.2018.
 29. Demirci I., Mezghani S., Yousfi M., El Mansori M. (2016): Impact of superficial surface texture anisotropy in helical slide and plateau honing on ring-pack performance, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 230 (8), s. 1030 ÷ 1037. DOI: 10.1177/1350650115623452.
 30. Deshpande A.K., Bhole H.A., Choudhari L.A. (2015): Analysis of Super-Finishing Honing Operation with Old and New Plateau Honing Machine Concept, *International Journal of Engineering Research and General Science* 3 (2, Part 2), dostępne na stronie internetowej: www.ijergs.org.
 31. Dimkovski Z., Anderberg C., Ohlsson R., Rosén B.G. (2011): Characterisation of worn cylinder liner surfaces by segmentation of honing and wear scratches, *Wear* 271, s. 548 ÷ 552. DOI: 10.1016/j.wear.2010.04.024.
 32. Dimkovski Z., Anderberg C., Rosén B.G., Ohlsson R., Thomas T.R. (2009): Quantification of the cold worked material inside the deep honing grooves on cylinder liner surfaces and its effect on





wear, Wear 267, s. 2235 ÷ 2242, dostępne na stronie internetowej:
www.elsevier.com/locate/wear.

33. Dimkovski Z., Cabanettes F., Lofgren H., Anderberg C., Ohlsson R., Rosen B. G. (2012): Optimization of cylinder liner surface finish by slide honing, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 226 (4), s. 575 ÷ 584. DOI: 10.1177/0954405410396154.
34. Droeder K., Hoffmeister H.W., Grosse T. (2017): Force-controlled form honing using a piezo-hydraulic form honing system, CIRP Annals - Manufacturing Technology. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.091.
35. Drossel W. G., Hochmuth C., Schneider R. (2013): An adaptronic system to control shape and surface of liner bores during the honing process, CIRP Annals - Manufacturing Technology 62, s. 331 ÷ 334. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.074.
36. Drossel W.G., Bucht A., Hochmuth C., Schubert A., Stoll A., Schneider J., Schneider R. (2014): High Performance of Machining Processes by Applying Adaptronic Systems. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014, Elsevier 14, s. 500 ÷ 505. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.072.
37. Edberg S., Landqvist E.: The impact of honing process parameters on the surface quality of cylinder liners. Master's Thesis at Department of Production Engineering KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden Supervisors: Andreas Archenti, KTH and Björn Lindbom, Scania CV AB.
38. Engis: Microsoft Word - Engis SH1000 Honing Machine.docx, dostępne na stronie internetowej: <http://www.engis.com/pdf/Engis-SH1000-Honing-Machine.pdf> w dniu 18.03.2018.
39. Entezami S.S., Farahnakian M., Akbari A. (2015): Experimental Study of Effective Parameters on Honing Process of Cast Iron Cylinder, Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production (Tom 4 nr 3) w dniu 09.2015.
40. Feld M. (2003): Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn, WNT 2003, Warszawa, ISBN 978-83-204-3287-9
41. Fiat Chrysler America (2016): Chrysler IIIH Engine Assembly Manual DRAFT. red. Betz J.
42. Flemming. J., Hornes A. (2013): Lissajous-like figures with triangular and square waves, Rev. Bras. Ensino Fís. 35 (3). DOI: 10.1590/S1806-11172013000300031.
43. Galloway Engine Reconditioning: Plateau honing, dostępne na stronie internetowej: <http://www.gallowayengines.com.au/plateau-honing> w dniu 18.03.2018.
44. Gałda L., Sęp J., Tomczewski L. (2014): Wpływ geometrii mikrowgłębień w powierzchni na właściwości tribologiczne elementów ślizgowych, Tribologia 5.
45. Gao, Shaowu; Yang, Changyong; Xu, Jiuhua; Su, Hao; Fu, Yucan (2018): Modelling and simulation of bore diameter evolution in finish honing, Procedia Manufacturing 26, s. 462 ÷ 468. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.054.
46. Gashev E.A., Muratov K.R. (2014): Tool Motion in the Honing of Cylindrical Surfaces, Russian Engineerin Research 34 (4), s. 268 ÷ 271. DOI: 10.3103/S1068798X14040078.
47. Gehring Technologies GmbH: Form Honing, dostępne na stronie internetowej: https://www.gehring.de/sites/default/files/text/formhonen_en_web-en-ww.pdf w dniu 18.03.2018.
48. Gehring Technologies GmbH: Laser Honing, dostępne na stronie internetowej: https://www.gehring.de/sites/default/files/text/laserstrukturieren_en_web-en-ww.pdf w dniu 18.03.2018.
49. Gehring Technologies GmbH: Position honing, dostępne na stronie internetowej: https://www.gehring.de/sites/default/files/text/positionhoning_en-en-ww.pdf w dniu 18.03.2018.



50. Gehring Technologies GmbH (red.) (2013): Optimization of Power Train Friction. Engineexpo 2013, 4 ÷ 6 June 2013 Stuttgart. we współpracy z Wiens A. Flores G.
51. Gehring Technologies GmbH (2017): Method and device for producing non-cylindrical bores with at least one recess by honing. Veröffentlichungsnr: US 2017/0129070 A1.
52. Goedel B., El Mansori M., Didier D. (2012): Macroscopic simulation of the liner honing process, CIRP Annals - Manufacturing Technology 61, s. 319 ÷ 322. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.044.
53. Goedel B., El Mansori M., Dumur D. (2013): Simulation of Roughness and Surface Texture Evolution at Macroscopic Scale During Cylinder Honing Process. 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), Procedia CIRP 8, s. 27 ÷ 32. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.060.
54. Goedel B., Voisin J., Dumur D., El Mansori M., Frabolot M. (2013): Flexible right sized honing technology for fast engine finishing, CIRP Annals - Manufacturing Technology 62, s. 327 ÷ 330, dostępne na stronie internetowej: <http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>.
55. Gold J., Benham Ch. E., Keer R.: Harmonic vibrations and vibration figures, Newton and Co., Scientific Instrument Makers.
56. González-Rojas H.A., Vivancos-Calvet J., Coba-Salcedo M. (2006): Thermal Analysis of Honing Process, Materials Science Forum 526, s. 235 ÷ 240.
57. Gousskov A.M., Voronov S.A., Butcher E.A., Sinha S.C. (2006): Non-conservative oscillations of a tool for deep hole honing, Elsevier 11, s. 685 ÷ 708, dostępne na stronie internetowej: www.elsevier.com/locate/cnsns.
58. Górski E. (1963): Obróbka gładkościowa. Wydanie pierwsze, Warszawa, WNT.
59. Graboń W., Paweł P., Koszela W., Reizer R. (2014): Proposals of methods of oil capacity calculation, Tribology International 75, s. 117 ÷ 122. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.03.015.
60. Graboń W., Pawlus P., Sep J. (2010): Tribological characteristics of one-process and two-process cylinder liner honed surfaces under reciprocating sliding conditions, Tribology International 43 (10), s. 1882 ÷ 1892. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.02.003.
61. Graboń W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wieczorowski M. (2017): Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring-liner assembly in short time tests, Tribology International 113, s. 137 ÷ 148, dostępne na stronie internetowej: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.025>.
62. Grigoryev S.E., Kadyrov R.R., Charikov P.N., Pryanichnikova V.V. (2017): Simulation of honing of a processed workpiece on CNC machine, Key Engineering Materials 743, s. 236 ÷ 240. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.236.
63. Gropper D., Wang L., Harvey T. J. (2016): Hydrodynamic lubrication of textured surfaces. A review of modeling techniques and key findings, Tribology International 94, s. 509 ÷ 529. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.10.009.
64. Grosse T., Winter M., Baron S., Hoffmeister H.W., Baron S., Hoffmeister H.W., Herrmann C., Dröder K. (2015): Honing with polymer based cutting fluids, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 11, s. 89 ÷ 98, dostępne na stronie internetowej: www.elsevier.com/locate/cirpj.
65. Gruszka J., Suchecki A. (2007): Nowe metody kształtowania powierzchni cylindrów silników spalinowych, Silniki Spalinowe 3 (130).
66. Grzesik W. (2010): Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych. Wydanie drugie. Warszawa, WNT.
67. Grzesik W. (2016): Influence of surface textures produced by finishing operations on their functional properties, Journal of Machine Engineering 16 (1). DOI: 10.1002/9781119193463.ch1.



68. Grzesik W., Rech J., Żak K. (2015): Characterization of surface textures generated on hardened steel parts in high-precision machining operations, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 78, s. 2049 ÷ 2056. DOI: 10.1007/s00170-015-6800-4.
69. Günay M., Korkmaz M.E. (2017): Optimization of honing parameters for renewal of cylinder liners, *Journal of Science* 30 (1), s. 111 ÷ 119, dostępne na stronie internetowej: <http://dergipark.gov.tr/gujs>.
70. Guo C., Zhu X. (2018): Effect of ultrasound on dynamics characteristic of the cavitation bubble in grinding fluids during honing process, *Ultrasonics* 84, s. 13 ÷ 24, dostępne na stronie internetowej: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.016>.
71. Guo Y.B., Warren A.W. (2005): Microscale Mechanical Behavior of the Subsurface by Finishing Processes, *J. Manuf. Sci. Eng.* 127, s. 333 ÷ 338. DOI: 10.1115/1.1807853.
72. Guo Z., Yuan Ch. Liu P., Peng Z., Yan X. (2013): Study on influence of cylinder liner surface texture on lubrication performance for cylinder liner–piston ring components, *Tribology Letter* 51 (1), s. 9 ÷ 23. DOI: 10.1007/s11249-013-0141-y.
73. Harasymowicz J., Wantuch E. (1994): *Obróbka gładkościowa. Skrypt dla studentów wyższych szkół technicznych*. Kraków: Zakład Graficzny Politechniki Krakowskiej.
74. Hoffmeister H.W., Grosse T., Gerdes A. (2012): Investigation of the Influence of Different Process Setting Parameters on the Surface Formation at Honing of Thermally Sprayed Layers. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, *Procedia CIRP* 1, s. 371 ÷ 376. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.066.
75. Howell-Smith S., Rahnejat H., King P.D., Dowson D. (2014): Reducing in-cylinder parasitic losses through surface modification and coating, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 228 (4), s. 391 ÷ 402. DOI: 10.1177/0954407013512626.
76. Hu Y., Meng X., Xie Y (2018): A new efficient flow continuity lubrication model for the piston ring-pack with consideration of oil storage of the cross-hatched texture consideration of oil storage of the cross-hatched texture, *Tribology International* 119, s. 443 ÷ 463, dostępne na stronie internetowej: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.027>.
77. Iliuc I. (2008): Improvement of mixed lubrication regime for friction and CO2 emission reduction in internal combustion engine, *Institute of Solid Mechanics, Romanian Academy, Bucharest*.
78. ISO 13565-2 (1996)
79. ISO 13565-3 (1998)
80. ISO 13565-1 (1996)
81. Iskra A., Kałużny J. (2000): Wpływ rzeczywistego kształtu powierzchni bocznej tłoka na parametry filmu olejowego, *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, 7 (1 ÷ 2).
82. Jatti P., Mench R.G. (2015): Developing an auto sizing system for vertical honing machine, *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering* (ISSN: 2393÷8471), s. 6÷15, dostępne na stronie internetowej: www.paperpublications.org.
83. Jocsak J. (2005): The effects of surface finish on piston ring-pack performance in advanced reciprocating engine Systems. *Mechanical Engineering Queen's University at Kingston, Massachusetts Institute of Technology*.
84. Johansson S., Nilsson Per.H., Ohlsson R., Anderberg C., Rosen B.G. (red.) (2005): Optimization of the cylinder liner surface for reduction of oil consumption. *Proceedings of WTC2005 World Tribology Congress III*. London, Singapore: Imperial College Press.
85. Johansson S., Nilsson Per.H., Ohlsson R., Anderberg C., Rosen B.G. (2008): New cylinder liner surfaces for low oil consumption, *Tribology International* 41 (9 ÷ 10), s. 854 ÷ 859. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.02.012.
86. Kaczmarek J. (1970): *Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej*, Warszawa WNT.



87. KADIA Produktion GmbH + Co.: T line Precision Honing Machine, dostępne na stronie internetowej: https://kadia.de/fileadmin/user_upload/09-broschueren/Kadia_Prodktbroschu__re_Tline_eng_RZ_ES.pdf w dniu 10.06.2017.
88. Kadyrov, Ramil R.; Charikov, Pavel N.; Pryanichnikova, Valeria V. (2018): Honing process optimization algorithms, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 327, DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022052.
89. Kapoor J. (2015): Parametric investigations into bore honing through response surface methodology, Materials Science Forum 808, s. 11 ÷ 18.
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.808.11.
90. Karpuschewski B., Welzel F., Risse K., Schorgel M. (2016): Reduction of friction in the cylinder running surface of internal combustion engines by the finishing process. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI), Procedia CIRP 45, s. 87 ÷ 90.
DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.338.
91. Karpuschewski B., Welzel F., Risse K., Schorgel M., Kreter S. (2016): Potentials for Improving Efficiency of Combustion Engines Due to Cylinder Liner Surface Engineering. 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting, Procedia CIRP 46, s. 258 ÷ 265.
DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.025.
92. Khanov A.M., Gashev E.A., Muratov K.R. (2013): Formation of raster trajectories in the honing of cylindrical surfaces, Russ. Engin. Res. 33 (7), s. 423 ÷ 426.
DOI: 10.3103/S1068798X13070101.
93. Khanov A.M., Muratov K.R., Gashev E.A., Muratov R.A.: Kinematic Potential of Honing Machines, Russian Engineering Research, 2011, Vol. 31, No. 6, 2011 (ISSN 1068798X), s. 607 ÷ 609. DOI: 10.3103/S1068798X11060104.
94. Khanov A.M., Muratov K.R., Gaszew E.A., Pepelyszewie A.V. (2011): Kinematyka metod gładzenia. Rosyjska Akademia Nauk 13 (4).
95. Kim E.S., Kim S.M., Lee Y.Z. (2018): The effect of plateau honing on the friction and wear of cylinder liners, Wear 400-401, s. 207 ÷ 212. DOI: 10.1016/j.wear.2017.09.028.
96. Kim J.K., Xavier F.A., Kim D.E. (2015): Tribological properties of twin wire arc spray coated aluminum cylinder liner, Materials & Design 84, s. 231 ÷ 237.
DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.122.
- [97]. Kishore K., Gopal Krishna P.V., Kiran Kumar G., Srihari T. (2014): Design and performance evaluation of a horizontal hydraulic honing attachment to lathe, International Journal of Engineering, Science and Technology 6 (1), s. 106 ÷ 111. DOI: 10.4314/ijest.v6i1.12.
98. Klein S., Fang S., Bähre D. (2017): Analysis of Different Surface Structures of Hard Metal Guiding Stones in the Honing Process, Procedia Manufacturing 10, s. 265 ÷ 275.
DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.055.
99. Knoll G., Rienacker A.: Tribology in Automotive Engine Applications. Institute for Machine Elements and Design, University Kassel.
100. Korczewski Z. (2007): Identyfikacja uszkodzeń tulei cylindrowych okrętowego tłokowego silnika spalinowego w eksploatacji, Zeszyty NAMW 2 (169).
101. Korzyński M. (2006, 2013): Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych. wydanie drugie. Warszawa, WNT.
102. Koszela W., Pawlus P., Gałda L. (2007): The effect of oil pockets size and distribution on wear in lubricated sliding, Wear 263 (7 ÷ 12), s. 1585 ÷ 1592.
DOI: 10.1016/j.wear.2007.01.108.
103. Koszela W., Pawlus P., Rejwer E., Ochwat S. (2013): Possibilities of oil pockets creation by the burnishing technique, Archives of Civil and Mechanical Engineering 13 (4), s. 465 ÷ 471.
DOI: 10.1016/j.acme.2013.03.004.





104. KS Motor Service International GmbH: Honing of gray cast iron cylinder blocks, dostępne na stronie internetowej: www.msi-motor-service.com;
(<http://file.seekpart.com/keywordpdf/2011/3/30/2011330113527501.pdf>) w dniu 18.03.2018.
105. Kurzyna Z., Lejda K., Woś P.: Przegląd metod kształtowania topografii powierzchni gładzi cylindrów silników spalinowych.
106. Lawrence D.K., Ramamoorthy B. (2016): Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines, *Applied Surface Science* 365, s. 19 ÷ 30, dostępne na stronie internetowej: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.245>.
107. Mansori E.I. M., Goeldel B., Sabri L. (2013): Performance impact of honing dynamics on surface finish of precoated cylinder bores, *Surface and Coatings Technology* 215, s. 334 ÷ 339, dostępne na stronie internetowej <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.062>.
108. Marciniak M., Nowicki B. (2007): Obróbka skrawaniem ścierna i erozyjna. Laboratorium. Warszawa, WNT.
109. Marinescu L.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. (2004): *Tribology of Abrasive Machining Processes*. w: William Andrew, Inc. (ISBN: 0-8155-1490-5).
110. Marketing Communications - KOMET GROUP: Honing on the machining centre, dostępne na stronie internetowej:
http://classic.kometgroup.com/fileadmin/user_upload/pdf/products/komet/93232_KomTronic-Honen_GB.pdf w dniu 18.03.2018.
111. Masip R.F., Coba-Salcedo M., Vivancos Calvet J. (red.) (2006): Plateau-honing semi-empirical model. 10th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology". Barcelona.
112. Mezghani S., Demirci I., Yousfi M., Mansori E.M. (2013): Mutual influence of crosshatch angle and superficial roughness of honed surfaces on friction in ring-pack tribo-system, *Tribology International* 66, s. 54 ÷ 59. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.04.014.
113. Mezghani S., Demirci I., Yousfi M., Mansori E.M. (2013): Running-in wear modeling of honed surface for combustion engine cylinder liners, *Wear* 302 (1 ÷ 2), s. 1360 ÷ 1369. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.026.
114. Mezghani S., Demirci I., Zahouani H., Mansori E.M. (2012): The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction, *Precision Engineering* 36 (2), s. 210 ÷ 217. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2011.09.008.
115. Mezghani S., Demirci I., Mansori E.M., Zahouani.H (2013): Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack system, *Tribology International* 59, s. 240 ÷ 247. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.01.015.
116. Michalski J., Woś P. (2011): The effect of cylinder liner surface topography on abrasive wear of piston-cylinder assembly in combustion engine, *Wear* 271 (3 ÷ 4), s. 582 ÷ 589. DOI: 10.1016/j.wear.2010.05.006.
117. Modern Machine Shop (2012): Sing le-Pass Vs. Multi-Stroke: The Ins and Outs of Honing, dostępne na stronie internetowej: <https://www.mmsonline.com/articles/single-pass-vs-multi-stroke-the-ins-and-outs-of-honing> w dniu 18.03.2018.
118. Moos U., Bähre D. (2015): Analysis of process forces for the precision honing of small bores. : *Procedia CIRP* 31, s. 387÷392. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.066.
119. Muratov K.R., Gashev E.A. (2014): Methods of precision hole honing, 1 Perm national research polytechnic university, Russia, (УДК 620. 923).
120. Muratov R.A., Muratov K.R. (2007): Honing bar expansion mechanism with variable pressure along the workpiece, *Russian Engineering Research* 27 (5), s. 288 ÷ 290. DOI: 10.3103/S1068798X07050115.
121. Nagel GmbH: Honing tools N-Series, dostępne na stronie internetowej:
<https://www.nagel.com/en/news-press> w dniu 03.01.2019.



122. Napadłek W. (2011): Mikroobróbka laserowa warstwy wierzchniej tulei cylindrowej w aspekcie tribologicznym, Problemy Eksploatacji 4-2011
- [123]. Napadłek W. (5): Modele tribologiczne współpracy skojarzenia tłok-pierścienie tłokowe-tuleja cylindrowa silnika spalinowego, Tribologia 2009.
- [124]. Nowicki B., Stefko A., Szulc S. (1960): Obróbka powierzchniowa. Nadawanie częściom maszyn własności eksploatacyjnych. wydanie pierwsze. Oddział w Łodzi, WNT.
125. Obara R.B.; Souza R.M.; Tomanik E. (2017): Quantification of folded metal in cylinder bores through surface relocation, Wear 384-385, s. 142 ÷ 150.
DOI: 10.1016/j.wear.2017.05.016.
126. Oerlikon Metco AG (2016): SUMEBore Technology, dostępne na stronie internetowej: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/sumebore/> w dniu 18.03.2018.
127. Ogorodov V.A. (2017): Hole shaping in the honing of thin-walled cylinders, Russian Engineering Research 37 (6), s. 549 ÷ 553. DOI: 10.3103/S1068798X17060168.
128. Ozdemir M., Korkmaz M.E., Gunay M.B. (2016): Optimization of surface roughness in honing of engine cylinder liners with SiC honing stones, 1 st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences Afyon Kocatepe University,
129. Pastor R.M., Soldevila R.A. (2006): New design and manufacturing process for high pressure fluid power products.
130. Paswan S.,K., Bedi T.S., Singh A.K.: Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological fluid based honing process, Wear (2017), s. 1207 ÷ 1221.
DOI: 10.1016/j.wear.2016.11.025.
131. Pawlus P., Cieslak T., Mathia T. (2009): The study of cylinder liner plateau honing process 209 (20), s. 6078÷6086. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.025.
132. Pawlus P., Michalski J., Reizer R. (red.) (2012): Progress in cylinder honing. Part II: Honing of cylinder liners from highly loaded internal combustion engines. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania: Rusek P. (Innovative manufacturing technology, t. 2).
133. Pawlus P., Michalski J., Reizer R. (red.) (2012): Progress in cylinder honing. Part I: Honing of blind holes. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania. Rusek P. (Innovative manufacturing technology, t. 2).
134. Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M. (2014): The analysis of directionality of honed cylinder liners surfaces, Scanning 36 (1), s. 95 ÷ 104. DOI: 10.1002/sca.21101.
135. Pimpalgaonkar M.H., Ghuge Ranjesh Laxmanrao, Santosh Laxmanrao (2013): A review of optimization process parameters on honing machine, International Journal of Mechanical and Production Engineering, 1 (5).
136. Podgaetski M., Scherbina K. (2015): Kinematics of cutting holes in honing spiral spring hone (ISSN 2409-9392).
137. Podgaetski M.M., Sczerbina K.K.: УТВОРЕННЯ СКЛАДНОЇ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ЗЕРНА ПРИ ХОНІНГУВАННІ ОТВОРІВ, Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна (УДК 621.923.5).
138. Polyanchikov Yu. N., Plotniko A.L., Polyanchikova M.Yu., Kursin O.A., Leshukov A.V. (2008): Honing with Increase in the Cutting Speed (ISSN 1068-798X,). DOI: 10.3103/S1068798X08070228.
139. Qin P.P., Yang C.I., Huang W., Xu G.W., Liu C.J. (2015): Honing process of hydraulic cylinder bore for remanufacturing, 4th International Conference on Sensors, Measurement and Intelligent Materials (ICSMIM 2015).
140. Raza K (2016): Effect of grooved surface texturing on the behavior of lubricated contacts. Universidade de Coimbra.





141. Reizer R., Pawlus P. (2011): 3D surface topography of cylinder liner forecasting during plateau honing process, *Journal of Physics Conference Series* 311, DOI: 10.1088/1742-6596/311/1/012021.
142. Reizer R., Pawlus P., Galda L., Grabon W., Dzierwa A. (2012): Modeling of worn surface topography formed in a low wear process, *Wear* 278 ÷ 279, s. 94 ÷ 100. DOI: 10.1016/j.wear.2011.12.012.
143. Rosén B.G., Garnier J. (2011): Uncertainties and optimized sampling in surface roughness characterization, *Wear* 271 (3 ÷ 4), s. 610 ÷ 615. DOI: 10.1016/j.wear.2010.07.002.
144. Rottler: HP7A Smart Hone, dostępne na stronie internetowej: <https://www.rottermfg.com/diamond-honing-machine.php> w dniu 18.03.2018.
145. Sabri L., Mansori E.M. (2009): Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools, *Surface and Coatings Technology* 204. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.05.013.
146. Sabri L., Mezghani S., Mansori E.M., Le Lan Jean-Vincent (red.) (2008): 3D Multi-Scale Topography Analysis in Specifying Quality of Honed Surfaces. Volume 1: Advanced Energy Systems; Advanced and Digital Manufacturing; Advanced Materials; Aerospace. ASME 2008 9th Biennial Conference on Engineering Systems. Haifa, Israel, July 7 ÷ 9, 2008: ASME.
147. Sabri L., Mezghani S., Mansori E.M., Zahouani H. (2011): Multiscale study of finish-honing process in mass production of cylinder liner, *Wear* 271 (3 ÷ 4), s. 509 ÷ 513. DOI: 10.1016/j.wear.2010.03.026.
148. Saint-Gobain Abrasivi S.p.A.: Microabrasives for Honing & Superfinishing, dostępne na stronie internetowej: https://www.nortonabrasives.com/sites/sga.na.com/files/document/Norton_Microabrasives_for_Honing_Superfinishing_5.pdf w dniu 18.03.2018.
149. Schmid J. (2010): Friction optimization of cylinder surfaces. from the perspective of production technology. *MTZ Springer Automotive Media* (06), dostępne na stronie internetowej: <https://www.springerprofessional.de/friction-optimization-of-cylinder-surfaces-from-the-perspective-/4992136> w dniu 18.03.2018.
150. Schmitt Ch., Bähre D. (2013): An Approach to the Calculation of Process Forces During the Precision Honing of Small Bores, *Procedia CIRP* 7, s. 282 ÷ 287. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.048.
151. Schmitt Ch., Bähre D. (2014): Analysis of the Process Dynamics for the Precision Honing of Bores. *Variety Management in Manufacturing. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP* 17, s. 692 ÷ 697. DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.05.
152. Schmitt Ch., Klein S., Bähre D. (2015): An Introduction to the Vibration Analysis for the Precision Honing of Bores. *43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research. w: Procedia Manufacturing* 1, s. 637 ÷ 643. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.056.
153. Schmitt Ch. (2015): Analyse und Modellbildung von Kräften beim Präzisionshonen von Bohrungen.
154. Schmitt R., König N., Zheng, H. (2011): Machine integrated optical measurement of honed surfaces in presence of cooling lubricant, *J. Phys.: Conf. Ser.* 311. DOI: 10.1088/1742-6596/311/1/012007.
155. Sender P. (2018): Variable kinematics of honing process - influence on machined workpiece. "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2018, 18-22 September 2018, Karlovy Vary, Czech Republic, dostępne na stronie internetowej: <https://www.tmt.unze.ba/proceedings2018.php>.
156. Sender P. (2013): Wariantowanie procesów technologicznych obróbki skrawaniem. Tom II. Współczesne technologie i konwersja energii. Redaktor Szantyr J.: Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej.



157. Sender P (2018): Wpływ trajektorii ziarna ściernego na obróbkę cienkościennych tulei cylindrów silników spalinowych przy gładzeniu ze zmienną kinematyką. *Autobusy* 12/2018 Technika - Eksploatacja - Systemy Transportowe DOI: 10.24136/atest.2018.468.
158. Singh V., Agawal V.P., Deb P. (red.) (2010): A decision making method for selection of finish process for a cylindrical surface. *Proceedings of the 2010 IEEE IEEM*. Institute of Electrical and Electronics Engineers; Technology Management Council; IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management; IEEM. Piscataway, NJ: IEEE, dostępne na stronie internetowej: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5668971>.
159. Sivatte-Adroer M., Sivatte-Adroer M., Llanas-Parra X., Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J. (2016): Indirect model for roughness in rough honing processes based on artificial neural networks, *Precision Engineering* 43, s. 505 ÷ 513. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.09.004.
160. Spencer A., Almqvist A., Larsson R. (2011): A numerical model to investigate the effect of honing angle on the hydrodynamic lubrication between a combustion engine piston ring and cylinder liner, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 225 (7), s. 683 ÷ 689. DOI: 10.1177/1350650111403867.
161. Sunnen (1990): A new look at honing (X-NR-1005 01/14-POD), dostępne na stronie internetowej: <http://www.sunnen.com/graphics/assets/documents/7993aa12c52a.pdf>, ostatnia aktualizacja 2013 w dniu 18.06.2017.
162. Szulc S., Stefko A. (1976): *Obróbka powierzchniowa części maszyn. Podstawy fizyczne i wpływ na własności użytkowe*. Warszawa, WNT.
163. Szabo O. (2014): Examination of material removal process in honing. Tom VII. University of Miskolc, Institute of Manufacturing Science, HUNGARY, *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering* (ISSN: 2067-3809).
164. Tripathi B.N., Singh N.K., Vates U.K. (2015): Surface Roughness Influencing Process Parameters & Modeling Techniques for Four Stroke Motor Bike Cylinder Liners during Honing: Review, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering (IJMME-IJENS Vol:15 No:01)*.
165. Uhlmann E., Spur G., Kleinschnitker M. (2015): *Handbook of Ceramics Grinding and Polishing*. Chapter 5. Honing and Superfinishing, dostępne na stronie internetowej: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4557-7858-4.00005-4>.
166. Vlădescu S.C., Ciniero A., Tufail K., Gangopadhyay A., Reddyhoff T. (2017): Optimization of Pocket Geometry for Friction Reduction in Piston-Liner Contacts, *Tribology Transactions*. DOI: 10.1080/10402004.2017.1363930.
167. Voronov S.A. (2008): *Rozwój metod matematycznych analizy dynamiki procesów gładzenia otworów*. Państwowy Uniwersytet Techniczny w Moskwie. im. N.E. Baumana.
168. Voronov S.A., Gousskov A.M., Bobrenkov O. A. (2009): Modelling of bore honing, *IJMMS* 2 (5/6). DOI: 10.1504/IJMMS.2009.028081.
169. Vrac D., Laposava P., Sidjanin P., Kovac P., Balos S. (2012): The influence of honing process parameters on surface quality, productivity, cutting angle and coefficients of friction, *Ind Lubrication and Tribology* 64 (2), s. 77 ÷ 83. DOI: 10.1108/00368791211208679.
170. Vrac D., Sidjanin L., Balos S. (2014): The Effect of Honing Speed and Grain Size on Surface Roughness and Material Removal Rate during Honing, *Acta Polytechnica Hungarica* (Vol.11 No.10).
171. Wang J., Shao Y., Xijin Z. (2009): Kinematics analysis and experimental study on ultrasonic vibration honing, *International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009)*. DOI: 10.1049/cp.2009.1420.
172. Wang L. (2014): *Image analysis and evaluation of cylinder bore surfaces in micrographs*. Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2013. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek,





dostępne na stronie internetowej:

<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fn15/800068599.pdf>.

173. Wang, Qian; Feng, Qiang; Li, Q. F.; Ren, Cheng Zu (2011): The Experimental Investigation of Stone Wear in Honing, KEM 487, s. 462 ÷ 467.
DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.487.462.
174. Welzel F. (2014): Tribologische Optimierung von Zylinderlaufflächen in Verbrennungsmotoren aus fertigungstechnischer Sicht.
175. WEMA (1986): Materiały i narzędzia ściernie fabryki "Korund". Katalog. Warszawa: Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego "WEMA".
176. Wendt: Precision honing machines, dostępne na stronie internetowej: <https://www.wendtindia.com/pdf/8.%20Honing%20Machines.pdf> w dniu 18.03.2018.
177. Whitehouse D.J. (1983): Some theoretical aspects of a practical measurement problem in plateau honing, Int. J. Prod. Res. 21 (2), s. 215 ÷ 221.
178. WMW Werkzeugmaschinenfabrik Naumburg (1966): Honownica do otworów SZS 200. Paszport techniczny.
179. WNT (1991): Poradnik inżyniera. Obróbka skrawaniem. Tom I.
180. Wooldridge D.: An experimental investigation into the honing process.
181. Wos S., Koszela W., Pawlus P. (2017): The effect of both surfaces textured on improvement of tribological properties of sliding elements, Tribology International 113, s. 182 ÷ 188.
DOI: 10.1016/j.triboint.2016.10.044.
182. Xi C., Hu X., Zhang Z. (2011): Research for cylindricity prediction model of inner-hole honing. w: Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference. DOI: 10.1109/MACE.2011.5987234.
183. Yadav A.,K., Singh S., Gupta G. (2014): Design and Manufacturing of Honing Tool for Drilling Machine, International Journal of Advance Research and Innovation 2 (ISSN 2347 - 3258), s. 433 ÷ 435.
184. Yokoyama K., Ichimiya R.: Analysis of thermal deformation of workpiece in honing process (3rd report). Numerical analyses of cylindrical and non-cylindrical workpieces.
185. Yokoyama K., Ichimiya R., Iwata K., Moriwaki T.(1985): Analysis of thermal deformation on workpiece on honing process (5th report). Thermal effects due to heat capacity of workpiece and kind of honing stone (JSPE-51-12-85-12-2302).
186. Yousfi M. (2014): Tribofunctional study of low-friction engine liner textures generated by honing process, dostępne na stronie internetowej: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01148194>.
187. Yousfi M., Mezghani S., Demirci I., El Mansori M. (red.) (2016): Texturation mécanique antifricción par rodage du tribo-système segment-cylindre. Présentation du projet d'acquisition d'un tribo-simulateur du fonctionnement moteur. 28 Journées Internationales Francophones de Tribologie. Ecole Nationale d'Ingenieurs de Saint-Etienne.
188. Yousfi M., Mezghani S., Demirci I., El Mansori M. (2014): Mutual Effect of Groove Size and Anisotropy of Cylinder Liner Honed Textures on Engine Performances. w: AMR 966-967, s. 175 ÷ 183. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.175.
189. Yousfi M., Mezghani S., Demirci I., Mansori E.M. (2015): Generation of circular and elliptic low-friction texture patterns by honing process. Yousfi M., Mezghani S., Demirci I., El Mansori M., 2015.
190. Yousfi M., Mezghani S., Demirci I., Mansori El. M. (2015): Smoothness and plateauiness contributions to the running-in friction and wear of stratified helical slide and plateau honed cylinder liners, Wear 332÷333, s. 1238 ÷ 1247, dostępne na stronie internetowej: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.011>.





191. Yousfi M., Mezghani S., Demirci I., Mansori El. M., Zahouani H. (2012): Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack system, *Tribologie et Développement Durable – Aix-en-Provence 2012*.
192. Yousfi M., Mezghani S., Demirci I., El. Mansori M. (red.) (2014): Comparative study between 2D and 3D characterization methods for cylinder liner plateau honed surfaces. *Proceedings of NAMRI/SME* (t. 42).
193. Yousfi M., Mezghani S., I. Demirci L., Mansori E.M. (2016): Tribological performances of elliptic and circular texture patterns produced by innovative honing process, *Tribology International*. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.049i.
194. Yuan S., Huang W., Wang X. (2011): Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces, *Tribology International* 44, s. 1047 ÷ 1054. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.04.007.
195. Yurdakul, M.; Tansel Ic, Y.; Güneş, S. (2018): An optimization study for the surface quality of the honing process, *dtetr (icpr)*. DOI: 10.12783/dtetr/icpr2017/17642.
196. Zaborski S., Poroś D., Sudzik A. (red.) (2011): Gładzenie cylindrów bloku silnika spalinowego. Redaktor A. Barylski Politechnika Gdańska: Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji Politechnika Gdańska (Obróbka ścierna. Współczesne problemy).
197. Zahouani H., Mansori E.M. (2017): Multi-scale and multi-fractal analysis of abrasive wear signature of honing process, *Wear* 376 ÷ 377, dostępne na stronie internetowej: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.087>.
198. Zavos A., Nikolakopoulos P.G. (red.): On the Cylinder Honing and Wavecut Effects against Piston Ring Artificial Texturing on the Friction in Marine Engines. 2nd International MARINELIVE Conference on "All Electric Ship". University of Patras.
199. Zavos A., Nikolakopoulos P.G. (2014): Simulation and modeling of friction for honed and wave-cut cylinder bores of marine engines, *Simulation Modelling Practice and Theory* 49, s. 228 ÷ 244. DOI: 10.1016/j.simpat.2014.10.002.
200. Zhang X., Q., Zhu X.J., Cheng L.L. (red.) (2015): Stability Study of Single-abrasive Coupled Flutter in Ultrasonic Vibration Honing. 5th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials: Atlantis Press.
201. Zhang X., Xiaoqing W., Daming W., Fifeng Xi., Xiaojuan W. (2017): Methodology to Improve the Cylindricity of Engine Cylinder Bore by Honing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. DOI: 10.1115/1.4034622.
202. Zhang X., Zhu X., Cheng L., Gong H., Yan B., Lee J.H. (red.) (2016): The Influence Study of Ultrasonic honing parameters to workpiece surface temperature. *MATEC Web of Conferences* 45 (t. 45).
203. Zhang Y., Yang Y., Niu J., Gong J. (red.): Study on the Impact of Honing Machine Reciprocating Reversing Acceleration upon Reticulate Pattern Trajectory.
204. Zhu L., Lin P., Chen Y. (2014): The Adherence Mechanism of Superalloy Honing Oilstone, *Key Engineering Materials*, s. 589 ÷ 590. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.589-590.464.
205. Żebrowski H. (2004): Techniki wytwarzania. Obróbka wiórowa, ścierna i erozyjna. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

WYKAZ ILUSTRACJI

Rys. 1. Możliwości sterowania ruchem głowicy: a) sterowanie siłowe, b) sterowanie położeniem [165]	15
Rys. 2. Fazy procesu gładzenia przy ruchu w głowicy w górę: P0 – początek drogi skoku, P3 – koniec drogi skoku głowicy, fazy procesu gładzenia przy ruchu w głowicy w dół: P3 – początek drogi skoku, P0 – koniec drogi skoku głowicy [151].....	16
Rys. 3. Porównanie odchyłki walcowości otworu uzyskiwanej dla różnych metod obróbkowych: a) gładzenie, b) wiercenie, c) toczenie, d) szlifowanie, e) nagniatanie, f) rozwiercanie [1]	17
Rys. 4. Profile chropowatości powierzchni uzyskane w różnych metodach obróbkowych [1]	18
Rys. 5. Zestawienie wybranych powierzchniowych parametrów chropowatości: a) powierzchnia toczone, b) powierzchnia szlifowana, c) powierzchnia gładzona [68]	19
Rys. 6. Przykładowe porównanie warunków hydrodynamicznych dla wybranych tekstur powierzchni cylindra i pierścienia tłokowego: a) powierzchnia cylindra szlifowana „wavecut” i gładka powierzchnia pierścienia, b) powierzchnia cylindra szlifowana „wavecut” i gładzona powierzchnia pierścienia, c) powierzchnia cylindra gładzona i gładka powierzchnia pierścienia, d) powierzchnia cylindra gładzona i gładzona powierzchnia pierścienia, e) schemat współpracy pierścienia z cylindrem; cyfra 1 wskazuje teksturowaną powierzchnię pierścienia tłokowego [198]	19
Rys. 7. Grubość warstwy oleju smarnego w kanałach olejowych [76]	21
Rys. 8. Przykład tekstur cylindra z kątem gładzenia: a) 45°, b) 140°, c) powierzchnia gładzona z siatką zasobników punktowych wykonanych za pomocą lasera [149]	21
Rys. 9. Przykład tekstur cylindra: a) gładzenie plateau, b) gładzenie warstwy AISi, c) teksturowanie laserowe [91].....	21
Rys. 10. Przykład tekstur powierzchni cylindra i rozmieszczenia kanałów: a) wykonanych narzędziem ceramicznym <i>PHC</i> , b) uzyskanych za pomocą narzędzia diamentowego <i>PHD</i> , oraz c) zdjęcia powierzchni z zalegającymi w kanałach olejowych fragmentami materiału obrabianego otworu [125]	22
Rys. 11. Metody gładzenia otworów walcowych: a) gładzenie tradycyjne jedno zabiegowe, b) gładzenie plateau $\alpha = 45^\circ$, c) gładzenie spiralne $\alpha = 130^\circ$, d) gładzenie laserowe, e) teksturowanie laserowe [67].....	22
Rys. 12. Przykład tekstur cylindra: a) po gładzeniu tradycyjnym, b) po gładzeniu napyłonej powłoki na powierzchnię cylindra. Wykres obrazujący zużycie oleju dla obu tekstur a) i b) prezentuje rysunek c) [126].....	23
Rys. 13. Przykład tekstur powierzchni cylindra z różną gęstością ścieżek dystrybuujących olej smarny [140]	23
Rys. 14. Schemat współpracy pierścienia tłokowego z gładzią cylindra [123].....	24
Rys. 15. Schemat współpracującego pierścienia tłokowego z gładzią cylindra posiadającą mikrozasobniki olejowe w kształcie: a) rys prostoliniowych, b) zasobników punktowych [123].....	24
Rys. 16. Przykład tekstur cylindrów gładzonych i teksturowanych za pomocą lasera: a) siatka rys, b) zasobniki liniowe i punktowe; cyfra 1 wskazuje siatkę rys otrzymaną po gładzeniu, cyfra 2 wskazuje dodatkową teksturę wykonaną za pomocą lasera, wytworzoną w górnej części cylindra [77]	25
Rys. 17. Przykład tekstury górnej części cylindra. Za pomocą cyfry 1 wskazano mikrozasobniki olejowe wykonane z użyciem lasera [105]	25
Rys. 18. Przykład tekstur górnej części cylindra: a) widok tulei cylindrowej, zaś b), c), d) tekstury laserowe [122]	26
Rys. 19. Przykład tekstury laserowej gładzi cylindra [140].....	26
Rys. 20. Przykład tekstur cylindra: a) siatka otworów, b) pojedynczy zasobnik, c) powierzchnia polerowana [98].....	27



Rys. 21. Przykład tekstury laserowej gładzi cylindra z różną gęstością zasobników punktowych [44].....	27
Rys. 22. Przykład nagniatanej tekstury cylindra z różnymi wzorami punktowej tekstury zasobników olejowych [102].....	28
Rys. 23. Przykład tekstury gładzi cylindrowej z napyłoną warstwą FeC0.8: a) etapy powstawania kieszeni olejowej, b) widok wytworzonych zasobników olejowych [74].....	28
Rys. 24. Głębokość mikrozasobników punktowych olejowych a), krzywa nośności b) [59].....	29
Rys. 25. Przykład tekstury cylindra o różnej gęstości rozmieszczenia na powierzchni (2,5%, 5%, 9%, 14%, 20,25%), w postaci zasobników punktowych oraz profil przekroju kanałów [181]. W kolumnie a) pokazano obraz powierzchni, w kolumnie b) pokazano przekrój przez zasobniki olejowe; cyfra 1 wskazuje zasobniki punktowe, cyfra 2 wskazuje przekrój przez zasobnik punktowy.	29
Rys. 26. Przykładowe kształty kieszeni olejowych: a) przekrój, b) widok z góry, c) możliwe kierunki współpracy pary ciernej [63].....	30
Rys. 27. Przykład tekstury cylindra wykonanej za pomocą specjalnego narzędzia mechatronicznego [26].....	30
Rys. 28. Przykład tekstury cylindra z widocznymi rysami wykonanymi za pomocą narzędzia dogniatającego specjalnej konstrukcji [60].....	31
Rys. 29. Przykład tekstur cylindra: a) rysy wykonane z użyciem lasera, b) widok pojedynczej rysy [65].....	31
Rys. 30. Przykłady różnorodnych tekstur, wybranych gabarytów wzoru tekstury oraz kierunków współpracy powierzchni [24].....	32
Rys. 31. Oznaczenie składowych siły i prędkości występujące w procesie gładzenia: V_{ax} – prędkość liniowa osiowa głowicy, V_{az} - prędkość obwodowa głowicy, V_c - wypadkowa prędkość skrawania, F_{az} - siła działająca w kierunku stycznym (promieniowym), F_{ax} - siła działająca w kierunku osiowym, F_c - siła wypadkowa, α - kąt gładzenia; cyfra 1 wskazuje ośkę ścierną [155].....	34
Rys. 32. Model strukturalny procesu gładzenia	35
Rys. 33. Profil chropowatości powierzchni: a) powstałej wskutek gładzenia , b) widok powierzchni gładzonej [2].....	36
Rys. 34. Parametry profilu chropowatości z grupy R_k [78].....	37
Rys. 35. Gładzenie ze zmienną kinematyką – ścieżki o różnych kształtach z zaznaczoną liczbą ruchów składowych głowicy gładzącej [25]	37
Rys. 36. Możliwe do uzyskania trajektorie ziaren ściernych z zaznaczoną liczbą ruchów składowych głowicy gładzącej [136].....	38
Rys. 37. Kształty trajektorii ziaren ściernych w zależności od zastosowanych parametrów obróbkowych [73].....	38
Rys. 38. Zmiana kąta skrzyżowania śladów obróbkowych w zależności od wielkości amplitudy B trajektorii ziarna ściernego, β – kąt skrzyżowania rys [73].....	38
Rys. 39. Trajektoria ziarna ściernego dla różnych prędkości obrotowych głowicy w ruchu powrotnym [203]	39
Rys. 40. Siatka rys uzyskana dla różnych wartości przyspieszenia a [203]	39
Rys. 41. Przykład krzywoliniowej trajektorii ziarna ściernego: a) krzywoliniowy kształt trajektorii ziarna, b) zdjęcie powierzchni po gładzeniu [186]	40
Rys. 42. Przykład krzywoliniowej trajektorii ziarna ściernego [54]	40
Rys. 43. Przykład siatki rys uzyskanej za pomocą honownicy CNC o trajektorii ziarna w kształcie: a) okręgów, b) elips wydłużonych w kierunku osiowym, b) elips wydłużonych w kierunku promieniowym [186, 187, 189].....	40
Rys. 44. Przykład siatki rys o zmiennym kącie trajektorii ziarna, uzyskanej za pomocą honownicy CNC [54].....	41
Rys. 45. Przykład krzywoliniowej ścieżki ziarna: a) trajektoria w kształcie okręgów, b) zmiana parametrów prędkości i przyspieszenia w czasie cyklu gładzenia [54]	41
Rys. 46. Kształt ścieżki ziarna uzyskiwany w procesie gładzenia ze zmiennymi parametrami obróbkowymi: A i B – amplitudy trajektorii ziarna w kierunku promieniowym X i w kierunku osiowym Y , ω_1 i ω_2 – częstotliwości ruchu	



	ziarna w kierunku promieniowym X i w kierunku osiowym Y , α – zmienny kąt gładzenia dla gładzenia ze zmienną kinematyką, L_f i H_f – obszar ścieżki ziarna dla pojedynczej sekwencji ruchu ziarna (gabaryt ramki ścieżki ziarna) [92].....	41
Rys. 47.	Szkic operacji gładzenia ze zmienną ścieżką ziarna: P - przedmiot, N - narzędzie, 1 - osiowa wibracyjna sinusoidalna trajektoria ziarna z amplitudą A , 2 - oś symetrii trajektorii ziarna, 3 - trajektoria ziarna, 4 - azymutalna wibracyjna sinusoidalna trajektoria ziarna z amplitudą B , 5 - przykładowa krzywoliniowa trajektoria ziarna [92]	42
Rys. 48.	Trajektoria ziarna w procesie gładzenia „Raster honing”: a) $\omega_2/\omega_1 < 0,5$, b) $\omega_2/\omega_1 < 4,5$ [92]	43
Rys. 49.	Trajektorie ziarna ściernego w wibracyjnym gładzeniu: a) jednokierunkowa cykloida, b) wielokierunkowa cykloida, c) gładzenie typu raster [93]	43
Rys. 50.	Zmiana wartości przyspieszenia całkowitego ruchu ziarna w trakcie jednego cyklu gładzenia t_{fr} [46].....	44
Rys. 51.	Zmiana prędkości ruchu ziarna ściernego V_c w trakcie czasu obiegu t_{tr} ziarna ściernego, V_{me} – prędkość średnia [46].....	44
Rys. 52.	Spiralna trajektoria ziarna: a) pojedyncza trajektoria, b) dwie ścieżki o różnych krzywiznach [137].....	47
Rys. 53.	Powierzchnie ze trajektoriami ziarna o różnym kształcie: a) zdjęcia wykonane po obróbce, b) uzyskana wartość współczynnika tarcia względem różnych tekstur, BLE – duża wzdłużna elipsa, SC – mały okrąg, SLE – mała wzdłużna elipsa, BC – duży okrąg, STE – elipsa mała poprzeczna do kierunku osiowego, BTE – elipsa duża poprzeczna do kierunku osiowego [187].....	48
Rys. 54.	Spiralna trajektoria ziarna: a) z dodatkową oscylacją kierunku obrotów głowicy ω_1 , b) z dodatkową oscylacją kierunku obrotów głowicy ω_1 i kierunku ruchu osiowego głowicy ω_2 [94]	49
Rys. 55.	Zmiana prędkości gładzenia w trakcie obróbki jednego otworu [6]	49
Rys. 56.	Krzywe Lissajous - możliwe kształty trajektorii ziarna ściernego [42]	50
Rys. 57.	Trajektorie ziarna ściernego dla dwóch różnych przykładowych wartości parametrów gładzenia [201]:	51
Rys. 58.	Parametry profilu chropowatości po gładzeniu zgrubnym [27].....	52
Rys. 59.	Profile chropowatości uzyskane dla różnych wartości zastosowanych parametrów czasu oraz wielkości ziarna [3].....	53
Rys. 60.	Wpływ nacisku osetki na parametr R_z [196]	53
Rys. 61.	Wpływ liczby skoków głowicy: a) na parametry powierzchniowe, b) na strukturę powierzchni gładzonej [192]	54
Rys. 62.	Przykłady powierzchni gładzonej, uzyskane dla różnej wartości prędkości wysuwu osetki: a) $1,5 \mu\text{m/s}$, b) $4 \mu\text{m/s}$, c) $8 \mu\text{m/s}$ [115]	55
Rys. 63.	Powierzchnia gładzona z różnymi kątami przecięcia się kanałów olejowych [112].....	58
Rys. 64.	Wpływ kąta gładzenia na współczynnik tarcia [114].....	58
Rys. 65.	Wpływ kąta gładzenia na współczynnik tarcia [99]	59
Rys. 66.	Wpływ kąta gładzenia na grubość filmu olejowego [160]	59
Rys. 67.	Wpływ kąta przecięcia rys na wybrane parametry profilu chropowatości powierzchni [29].....	60
Rys. 68.	Trajektoria ziarna ściernego ze zmiennym kątem [138]	60
Rys. 69.	Trajektoria ziarna ściernego ze zmiennym kątem [6].....	61
Rys. 70.	Wpływ wielkości ziarna na parametry profilu chropowatości powierzchni [147].....	62
Rys. 71.	Wpływ wielkości ziarna na parametry profilu chropowatości powierzchni [128].....	62
Rys. 72.	Wpływ wielkości ziarna G_s i nacisku p na parametr profilu chropowatości R_a oraz na wydajność obróbki Q [15]	63
Rys. 73.	Wpływ rodzaju osetki na wydajność procesu gładzenia żeliwa GG25. V_c – wypadkowa prędkość skrawania, Q – wydajność usuwania materiału obrabianego (1- ziarno Al_2O_3 , 2-ziarno SiC , 3 – ziarno CBN) [163].....	64
Rys. 74.	Otwory z odchyłką kształtu: a) stożka, b) siodłowości, c) baryłkowatości [25]	65
Rys. 75.	Wpływ dynamiki procesu gładzenia na odchyłkę kształtu otworu: a) prostoliniowość, b) walcowość, c) i d) okrągłość [107]	66





Rys. 76. Wpływ dynamiki procesu gładzenia na odchyłkę kształtu otworu dla kilku wartości przyspieszenia ruchu głowicy gładzącej: a) przyspieszenie $a \leq 1g$, b) przyspieszenie $a = 1,5g$, c) przyspieszenie $a \geq 2g$ [107]	66
Rys. 77. Wpływ parametrów gładzenia na odchyłkę kształtu otworu: L – długość skoku, p – docisk ośki do powierzchni obrabianej, Y – odchyłka kształtu [182]	67
Rys. 78. Wybieg ośki w zależności od rodzaju odchyłki walcowości: a) otwory przelotowe, b) otwory nieprzelotowe [179]	68
Rys. 79. Nagrzewanie się tulei cienkościennej w procesie gładzenia w zależności od czasu obróbki [56]	69
Rys. 80. Odkształcenie tulei cienkościennej podczas gładzenia, w zależności od czasu obróbki [133].....	70
Rys. 81. Odkształcenia termiczne promienia otworu ΔR_0 w funkcji czasu gładzenia t dla różnych warunków gładzenia (cyfry 4,8,9,10 oznaczają różne warunki chłodzenia, cyfra 4 oznacza brak chłodzenia, czyli wsp. przenikania ciepła do chłodziwa $0 \text{ W/m}^2\text{K}$, cyfra 9 – olej do honowania, cyfra 8 – olej do szlifowania) [184]	70
Rys. 82. Tuleja cienkościenna ze zmienną grubością ścianki g : grubość $g_1 = 3,5 \text{ mm}$, $g_2 = 4,0 \text{ mm}$, $g_3 = 7,0 \text{ mm}$, $g_4 = 13,0 \text{ mm}$ (średnica otworu 150H7, długość otworu 281 mm)	73
Rys. 83. Termogram układu OUPN zarejestrowany podczas gładzenia tulei z rys. 82 (1- temperatura maksymalna w gładzonym otworze $40,2^\circ\text{C}$, 2 - temperatura chłodziwa $34,1^\circ\text{C}$)	74
Rys. 84. Pomiar średnicy gładzonego otworu przedmiotu zamontowanego pomiędzy usztywniającymi tarczami czołowymi (1 i 2 – tarcze czołowe, 3 - średnicówka mikrometryczna, 4 – łańcuch mocujący przedmiot gładzony na poziomej honownicy CNC Sunnen HTH 4000S)	75
Rys. 85. Termogram tulei cylindrowych: 1 – bezpośrednio po obróbce, o temperaturze znacznie wyższej od temperatury otoczenia, $T = 32,6^\circ\text{C}$, 2 – gładzonych wcześniej, przed obróbką tulei poz.1, częściowo ostudzonych, 3 – gładzonych przed obróbką tulei poz. 2 i ostudzonych do temperatury bliskiej temperatury otoczenia, 4 – tuleje oczekujące na obróbkę, 5 – temperatura otoczenia $T_{ot} = 22,5^\circ\text{C}$	76
Rys. 86. Termogram na początku obróbki: temperatura oleju $T_{ol} = 22,8^\circ\text{C}$, temperatura ośki $T_{os} = 28,4^\circ\text{C}$; poz. 1 – ośka, poz. 2 - olej.....	77
Rys. 87. Termogram dla obróbki trwającej 60 sekund: temperatura oleju $T_{ol} = 24^\circ\text{C}$, temperatura ośki $T_{os} = 36,2^\circ\text{C}$; poz. 1 – ośka, poz. 2 - olej	77
Rys. 88. Termogram wykonany po obróbce trwającej 120 sekund, poz. 1 - maksymalna wartość zmierzonej temperatury $T = 42,3^\circ\text{C}$	78
Rys. 89. Termogram dla obróbki trwającej 135 sekund, poz. 1 - maksymalna wartość zmierzonej temperatury $T = 43,6^\circ\text{C}$,	78
Rys. 90. Przedmiot przygotowany do gładzenia (cylinder nr 42 z partii produkcyjnej); cyfra 1 wskazuje numer obrabianego cylindra z partii produkcyjnej.....	79
Rys. 91. Temperatura przedmiotu po gładzeniu trwającym 180 sekund ($T = 38,3^\circ\text{C}$); cyfra 1 wskazuje numer obrabianego cylindra z partii produkcyjnej.....	79
Rys. 92. Termogram układu obróbkowego (ośka ścierna i otwór gładzonego cylindra) po zakończeniu gładzenia; 1 – gładzony cylinder, 2 – głowica gładząca, 3 – ośka ścierna, 4 – dysza chłodząca	80
Rys. 93. Przykładowy termogram ośki H70 NM57XM84, po zakończonym etapie gładzenia ($T = 37,5^\circ\text{C}$); cyfra 1 wskazuje głowicę gładzącą, cyfra 2 wskazuje ośkę ścierną	80
Rys. 94. Termogram cylindra po gładzeniu z zaznaczoną linią, gdzie wyznaczono charakterystykę temperaturową (rys. 95);	81
Rys. 95. Wykres zmian temperatury wzdłuż linii oznaczonej cyfrą 1 na rys. 94	81
Rys. 96. Temperatura oleju w wannie ($T_{ol} = 25,8^\circ\text{C}$).....	82
Rys. 97. Histogram temperatury oleju w wannie (rys. 96).....	82
Rys. 98. Schemat funkcjonalny procesu technologicznego; X_1, X_2, X_n – czynniki wejściowe, Z_1, Z_2, Z_3 – zakłócenia, Y_1, Y_2, Y_n – czynniki wyjściowe	83
Rys. 99. Schemat badań eksperymentalnych	84
Rys. 100. Graficzna interpretacja planu trzypoziomowego eksperymentu PS/DK 3^3 [101].....	86





Rys. 101. Graficzna interpretacja planu trzypoziomowego eksperymentu PS/DK 3 ²	93
Rys. 102. Stanowisko badawcze: 1 - honownica HTH - 4000S CNC firmy Sunnen, 2 - kamera termowizyjna Vigocam V50, 3 - komputer z oprogramowaniem THERM 2.23.2, 4 – przedmioty gładzone nie pomalowane, 5 – przedmiot gładzony (z rys. 110) pomalowany czarną matową farbą	95
Rys. 103. Stanowisko badawcze (c.d.): 6 - panel sterowania honownicy, 7 - przedmiot badany, 8 – czujnik Escort-99 z sondą temperatury, 9 – średnicówka.....	96
Rys. 104. Pomiar chropowatości gładzonego otworu (przedmiotu z rys. 109) z użyciem profilografometru f - my Mahr	96
Rys. 105. Pomiar temperatury przy pomocy czujnika dotykowego (kalibracja kamery termowizyjnej).....	97
Rys. 106. Stanowisko badawcze: cienkościenna tuleja silnika spalinowego zamocowana na honownicy HTH 4000S. Czerwona strzałka wskazuje termoparę, zamontowaną w celu kalibracji kamery termowizyjnej	97
Rys. 107. Termogram cylindra z rys. 82 po uruchomieniu gładzenia otworu	98
Rys. 108. Fragment stanowiska badawczego: 1 - osełka, 2 – głowica MPS-H50.....	98
Rys. 109. Termogram po przeprowadzonej operacji gładzenia otworu, poz. 1 – głowica gładząca, poz. 2 – ślizg (usztywniający i prowadzący głowicę po obrabianym otworze), poz. 3 - osełka	99
Rys. 110. Otwór gładzony cylindra maszyny precyzyjnej o średnicy 150 H9 mm i długości 1260 mm	100
Rys. 111. Obrazy z kamery termowizyjnej prezentujące kolejną sekwencję nagrzewania się cylindra z rys. 110. Cyfra 1 wskazuje na pierwszy zauważalny fragment spirali ciepła, który stopniowo przesuwa się po całej długości cylindra, cyfra 2 wskazuje zaobserwowaną spiralę ciepła.....	101
Rys. 112. Obrazy z kamery termowizyjnej prezentujące kolejną sekwencję nagrzewania się cylindra z rys. 110. Cyfra 1 wskazuje na miejsce występowania największej temperatury, które pokrywa się z miejscem pojawienia się spirali ciepła, co sugeruje, że honownica rozpoczyna wysuw osełek w tym miejscu. Cyfra 2 wskazuje zaobserwowaną spiralę ciepła	102
Rys. 113. Obrazy z kamery termowizyjnej prezentujące kolejną sekwencję nagrzewania się cylindrów z rys. 110	103
Rys. 114. Obrazy z kamery termowizyjnej charakteryzujące ostatnią sekwencję nagrzewania się cylindrów z rys. 110; poz. 1 – trzpień z głowicą gładzącą, poz. 2 – podpora uchwyty mocującego przedmiot do obróbki, poz. 3 – przedmiot gładzony (z rys. 110), poz. 4 – miejsce występowania najwyższej zmierzonej temperatury	104
Rys. 115. Profil chropowatości powierzchni gładzonej:	105
Rys. 116. Temperatura przedmiotu gładzonego T przy stałej prędkości obrotowej głowicy, zaobserwowany średni przyrost temperatury uzyskany w czasie $t = 10$ min gładzenia wynosi $\Delta T_{sr} = 14,17^\circ\text{C}$: a) pomiar pierwszy, b) pomiar drugi. Wykresy wygenerowano w oprogramowaniu THERM. Oś pionowa – temperatura, oś pozioma – czas.....	109
Rys. 117. Temperatura przedmiotu gładzonego T dla gładzenia przeprowadzanego ze zmianą prędkości obrotowej, w trakcie pojedynczego skoku głowicy, w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min, uzyskany średni przyrost temperatury w czasie $t = 10$ min gładzenia wynosi $\Delta T_{sr} = 14,36^\circ\text{C}$, a) pomiar pierwszy: przyrost temperatury $\Delta T = 12,49^\circ\text{C}$, b) pomiar drugi: przyrost temperatury $\Delta T = 16,22^\circ\text{C}$. Wykresy wygenerowano w oprogramowaniu THERM. Oś pionowa – temperatura, oś pozioma – czas	110
Rys. 118. Temperatura przedmiotu gładzonego T dla gładzenia przeprowadzanego ze zmianą prędkości obrotowej w trakcie pojedynczego skoku, dla zmiennej prędkości obrotowej w zakresie $n = 80 \div 120$ obr/min, pomiar pierwszy: a), pomiar drugi: b), w czasie $t = 10$ min gładzenia, średnia wartość przyrostu temperatury $\Delta T_{sr} = 14,06^\circ\text{C}$, a) pomiar pierwszy: przyrost temperatury $\Delta T = 14,67^\circ\text{C}$, b) pomiar drugi: przyrost temperatury $\Delta T = 13,44^\circ\text{C}$	111
Rys. 119. Miejsca wykonywania pomiarów średnicy i odchyłki kształtu walcowości gładzonej tulei o zmiennej grubości ścianki (grubość $g_1 < g_3 < g_2 < g_4$).....	112



Rys. 120. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego, dla przekroju nr 1 (z rys. 119)	113
Rys. 121. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego, dla grubości przekroju nr 2 (z rys. 119).....	114
Rys. 122. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego, dla grubości przekroju nr 3 (z rys. 119).....	114
Rys. 123. Ubytek materiału na średnicy przedmiotu gładzonego, dla grubości przekroju nr 4 (z rys. 119).....	115
Rys. 124. Stanowisko pomiarowe - maszyna współrzędnościowa CNC ZEISS Contura (1 – komputer z oprogramowaniem pomiarowym CAD / CAM Calypso, 2 – korpus głowicy, 3 – osełka, 4 – prowadnica oselki)	116
Rys. 125. Maszyna współrzędnościowa CNC Zeiss Contura z głowicą pomiarową skrętną RDS	117
Rys. 126. Pomiary elementów głowicy wykonywane na maszynie współrzędnościowej Zeiss Contura: a) prowadzenie oselki (poz. 4 z rys. 127), b) trzpień rozprężający (poz. 3 z rys.127)	117
Rys. 127. Model głowicy umożliwiający przeprowadzenia symulacji numerycznej (1 – osełka, 2 – korpus głowicy, 3 – trzpień rozprężny, 4 – prowadzenie oselki, 5 - podstawa oselki).....	118
Rys. 128. Model głowicy i cylindra	118
Rys. 129. Przykładowe parametry wprowadzone do modułu obliczeniowego symulacji numerycznej programu SolidWorks 2016: a) materiał użyty w symulacji, b) wizualizacja obciążenia temperaturą $T = 40^{\circ}\text{C}$ osełek ściernych. Cyfra 1 wskazuje komputerową wizualizację termicznego obciążenia oselki, 2 – gładzony cylinder	119
Rys. 130. Model głowicy i cylindra z nałożoną siatką obliczeniową: 1 – gładzony cylinder, 2 – głowica gładząca, 3 – osełka ścierna	120
Rys. 131. Model głowicy gładzącej i oznaczenie składowych sił skrawania; 1 – trzpień rozprężny, 2 – osełka ścierna.....	120
Rys. 132. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku osi X (nacisk 0,5 MPa)	121
Rys. 133. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku osi Y (nacisk 0,5 MPa)	121
Rys. 134. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku X (nacisk 1,0 MPa)	122
Rys. 135. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku Y (nacisk 1,0 MPa)	122
Rys. 136. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku X (nacisk 1,5 MPa)	123
Rys. 137. Symulacja odkształcenia cylindra w kierunku Y (nacisk 1,5 MPa)	123
Rys. 138. Wpływ nacisku oselki na odkształcenie cylindra (dla $X \in \langle 0,5, 1,5 \rangle$).....	124
Rys. 139. Widok okna z programu Solidworks Simulation 2016 – pomiar naprężeń w różnych przekrojach tulei cienkościennej ze zmienną grubością ścianki (z rys. 82).....	125
Rys. 140. Wykres odchyłki walcowości W gładzonego otworu w funkcji wydajności obróbki	126
Rys. 141. Wykres odchyłki kształtu walcowości W gładzonego otworu w funkcji przyrostu temperatury gładzonego otworu	127
Rys. 142. Termogram układu obróbkowego a) szkic przepływu strumienia ciepła przez przedmiot o przekroju rury, b) T_1 – temperatura wewnątrz, T_2 – temperatura zewnętrzna, r_1 – promień wewnętrzny cylindra, r_2 – promień zewnętrzny cylindra.....	128
Rys. 143. Termogram: a) oselki, b) cylindra po zakończonej operacji gładzenia otworu	128
Rys. 144. Widok izometryczny niezdeformowanego cylindra o zmiennej grubości ścianki; poz. 1 – przekrój najgrubszy, poz. 2 – przekrój najcieńszy	129
Rys. 145. Generowanie symulacji w programie Autodesk Simulation 2013	129
Rys. 146. Widok izometryczny zdeformowanego cylindra o zmiennej grubości ścianki; poz. 1 – przekrój najgrubszy i najmniejsze odkształcenie, poz. 2 – przekrój najcieńszy i największe odkształcenia.....	130
Rys. 147. Obraz symulacji komputerowej – odkształcenia cylindra o zmiennej grubości ścianki	130
Rys. 148. Obraz symulacji komputerowej – naprężenia w cylindrze o zmiennej grubości ścianki	131



Rys. 149. Widok izometryczny zdeformowanego cylindra o zmiennej grubości ścianki w przekroju z przodu cylindra.....	131
Rys. 150. Widok izometryczny zdeformowanego cylindra o zmiennej grubości ścianki w przekroju z przodu cylindra.....	132
Rys. 151. Obraz symulacji komputerowej – strumień ciepła	132
Rys. 152. Widok okna z programu Autodesk Simulation 2013: pomiar przepływu strumienia ciepła dla przekrojów o różnych grubościach ścianki; cyfra: 1 – sondy odczytujące w symulacji wartość przepływu strumienia ciepła w różnych miejscach cylindra, 2 – obciążenie cieplne osełek, 3 – wyniki dla poszczególnych sond (poz. 1).....	133
Rys. 153. Widok okna z programu Autodesk Simulation 2013 – pomiar przepływu strumienia ciepła; poszczególne krzywe obrazują zaobserwowany pomiar dla różnych przekrojów (1 - przekrój najgrubszy, 2 – przekrój najcieńszy).....	134
Rys. 154. Widok okna z programu Autodesk Simulation 2013 –zmiana temperatury w czasie; poszczególne krzywe obrazują zaobserwowany pomiar dla różnych przekrojów (1 - przekrój najgrubszy, 2 – przekrój najcieńszy).....	135
Rys. 155. Frezarka Haas VF-3SS z oprzyrządowaniem do gładzenia: 1) kamera termowizyjna, 2) chropo - watościomierz Mitutoyo SJ-210, 3) miernik natężenia dźwięku, 4) miernikiem drgań, 5) dysza powietrzna, średnicówka mikrometryczna (nie pokazana na zdjęciu).....	137
Rys. 156. Model frezarki CNC oraz ścieżki wygenerowane w programie EdgeCAM: a) model bryłowy całej obrabiarki, b) model bryłowy obrabiarki z widocznym przedmiotem obrabianym, c) przedmiot obrabiany i ścieżki obróbkowe wygenerowane w programie EdgeCAM.....	138
Rys. 157. Stanowisko badawcze: a) oprzyrządowanie do gładzenia f-my Honingtec, b) przedmiot obrabiany	139
Rys. 158. Oprzyrządowanie do gładzenia f-my Honingtec użyte do przeprowadzenia badań gładzenia na pionowym centrum frezerskim HAAS VF-3SS	139
Rys. 159. Widok okna Autodesk Mechanical ze zdjęciami powierzchni gładzonej wraz z okręgami wpisanymi w ślady rys wytworzonych przez ziarno ściernie	140
Rys. 160. Uzyskana tekstura powierzchni gładzonej dla zmiennej prędkości skoku w zakresie 1000 ÷ 3000 mm/min – średni kąt nachylenia stycznej do trajektorii ziarna 14°	140
Rys. 161. Uzyskana tekstura powierzchni gładzonej dla stałej prędkości skoku głowicy 5000 mm/min - średni kąt nachylenia stycznej do trajektorii ziarna 30°	140
Rys. 162. Pomiar odchyłek kształtu na maszynie pomiarowej współrzędnościowej CNC Zeiss Contura	141
Rys. 163. Gładzenie tradycyjne – odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji prędkości obrotowej	143
Rys. 164. Gładzenie tradycyjne – odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji posuwu głowicy	143
Rys. 165. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji stałej wartości parametrów posuwu osiowego V_{ax} i prędkości obrotowej n głowicy	144
Rys. 166. Przykładowy raport pomiarowy parametrów profilu chropowatości z profilografometru Mitutoyo SurfTest SJ-210 dla gładzenia przeprowadzanego ze zmienną prędkością obrotową w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min. Użyte ziarno NY102E181	145
Rys. 167. Wykres zależności parametru R_a w funkcji prędkości obrotowej głowicy i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY 102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej).....	148
Rys. 168. Wykres zależności parametru R_a w funkcji posuwu i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY 102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)	148



Rys. 169. Wykres zależności parametru R_q w funkcji wielkości ziarna ściernego w osełce (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY 102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)	149
Rys. 170. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji prędkości obrotowej głowicy i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY 102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)	149
Rys. 171. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji posuwu wzdłużnego i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY 102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej)	150
Rys. 172. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji wielkości ziarna ściernego w osełce	150
Rys. 173. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji prędkości obrotowej głowicy i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY 102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej).....	151
Rys. 174. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji wartości posuwu głowicy i wielkości ziarna (pomarańczowy kolor znacznika - ziarno „80” NY 102E1012 do obróbki zgrubnej, zielony kolor znacznika - ziarno „220” NY102E1512 do obróbki kształtującej, niebieski kolor znacznika – ziarno „400” NY102E1812 do obróbki wykończeniowej).....	151
Rys. 175. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji wielkości ziarna ściernego w osełce	152
Rys. 176. Wykres zależności parametru R_a w funkcji (stałych parametrów) posuwu i prędkości obrotowej	152
Rys. 177. Wykres zależności parametru R_a w funkcji (stałych parametrów) wielkości ziarna i prędkości obrotowej	153
Rys. 178. Wykres zależności parametru R_k w funkcji (stałych parametrów) posuwu i prędkości obrotowej.....	153
Rys. 179. Wykres zależności parametru R_k w funkcji (stałych parametrów) wielkości ziarna i prędkości obrotowej.....	154
Rys. 180. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji (stałych parametrów) posuwu i prędkości obrotowej.....	154
Rys. 181. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji (stałych parametrów) wielkości ziarna i prędkości obrotowej.....	155
Rys. 182. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji (stałych parametrów) posuwu i prędkości obrotowej	155
Rys. 183. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji (stałych parametrów) wielkości ziarna i prędkości obrotowej.....	156
Rys. 184. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji wartości średniej posuwu.....	158
Rys. 185. Wpływ prędkości obrotowej głowicy na odchyłkę walcowości W gładzonego otworu.....	158
Rys. 186. Wpływ wartości średniej (zmiennego) posuwu i stałej prędkości obrotowej na odchyłkę walcowości W obrabianego otworu.....	159
Rys. 187. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu względem zmiennej prędkości obrotowej głowicy	163
Rys. 188. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu w funkcji stałego posuwu głowicy	163
Rys. 189. Odchyłka walcowości W gładzonego otworu względem stałego posuwu i zmiennej prędkości obrotowej głowicy.....	164
Rys. 190. Wpływ zmiennego posuwu na parametr profilu chropowatości R_a	164





Rys. 191. Wpływ zmiennego posuwu na parametr profilu chropowatości R_{pk}	165
Rys. 192. Wpływ zmiennego posuwu na parametr profilu chropowatości R_{vk}	165
Rys. 193. Wpływ zmiennego posuwu na wydajność obróbki Q	166
Rys. 194. Wykres zależności parametru R_a w funkcji zmiennej prędkości obrotowej i wielkości ziarna	166
Rys. 195. Wykres zależności parametru R_{pk} w funkcji zmiennej prędkości obrotowej i wielkości ziarna	167
Rys. 196. Wykres zależności parametru R_{vk} w funkcji zmiennej prędkości obrotowej i wielkości ziarna	167
Rys. 197. Stanowisko badawcze: 1 – dźwignia do zmiany przełożenia przekładni hydraulicznej; 2 – pokrętło służące do zmiany prędkości obrotowej głowicy gładzącej; 3 – miernik prędkości obrotowej głowicy gładzącej [obr/min]; 4 – dźwignia do zmiany osiowego kierunku ruchu głowicy; 5 – miernik nacisku osełki (ciśnienia) do przedmiotu gładzonego; 6 – tuleja gładzona zamocowana w przyrządzie; 7 – głowica gładząca; 8 – dysza chłodziwa.	168
Rys. 198. Stanowisko badawcze: 1 – osełki do obróbki zgrubnej i wykończeniowej, 2 – dźwignia do zmiany prędkości osiowej głowicy, 3 – dźwignia do zmiany nacisku osełki do przedmiotu obrabianego, 4 – dźwignia do zmiany położenia stołu (nie używana w badaniach)	169
Rys. 199. Stanowisko badawcze; 1 – kamera termowizyjna, 2 – miernik chropowatości powierzchni Mitutoyo SJ-210, 3 – miernik drgań (użyty do badań dodatkowych, nie opisanych w pracy)	169
Rys. 200. Widok okna programu THERM v.20: a) Czas obróbki $t = 0$ s; temperatura maksymalna $T_{max} = 40^{\circ}\text{C}$, b) czas obróbki $t = 116$ s, temperatura maksymalna $T_{max} = 79,79^{\circ}\text{C}$	170
Rys. 201. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Stała prędkość obrotowa $n = 60$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 4,05^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 4,09^{\circ}\text{C}$	171
Rys. 202. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Stała prędkość obrotowa $n = 80$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 5,41^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 5,705^{\circ}\text{C}$	171
Rys. 203. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Stała prędkość obrotowa $n = 100$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 10,891^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 10,497^{\circ}\text{C}$	172
Rys. 204. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana prędkości obrotowej w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 2,5^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 3,025^{\circ}\text{C}$ (najniższy przyrost temperatury).....	172
Rys. 205. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 40 \div 80$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 4,904^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 5,03^{\circ}\text{C}$	173
Rys. 206 Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 5,71^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 5,75^{\circ}\text{C}$	173
Rys. 207. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 4,591^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 5,216^{\circ}\text{C}$	174
Rys. 208 Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 100 \div 140$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 7,27^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 7,52^{\circ}\text{C}$	174
Rys. 209. Zmierzona temperatura podczas gładzenia. Zmiana obrotów w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min, $p = 0,5$ MPa, kąt pochylenia linii trendu $a = 20,827^{\circ}$, przyrost temperatury w czasie 1 minuty $\Delta T = 22,70^{\circ}\text{C}$ (otrzymano największy przyrost temperatury).....	175
Rys. 210. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_a	176
Rys. 211. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_q	176
Rys. 212. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_z	177
Rys. 213. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_p	177

Rys. 214. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_v	178
Rys. 215. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{sk}	178
Rys. 216. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_c	179
Rys. 217. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{sm}	179
Rys. 218. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_f	180
Rys. 219. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_k	180
Rys. 220. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{pk}	181
Rys. 221. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr R_{vk}	181
Rys. 222. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr Mr_1	182
Rys. 223. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr A_1	182
Rys. 224. Wpływ wielkości ziarna i zmiennej prędkości obrotowej na parametr A_2	183
Rys. 225. Przykładowe trajektorie ziarna ściernego na rozwiniętej powierzchni otworu: a) ruch złożony jednostajnie zmienny, b) ruch złożony niejednostajnie zmienny [157]	184
Rys. 226. Promień krzywizny ścieżki olejowej $R = ds / d\theta$, a_n - przyspieszenie normalne, a_s - przyspieszenie styczne, $ds / d\theta$ - przyrost długości drogi poruszającego się ziarna względem przyrostu kąta [157]	185
Rys. 227. Przykładowy fragment krzywoliniowego kształtu kanału olejowego, uzyskiwanego w trakcie gładzenia ze zmienną kinematyką (opisany za pomocą funkcji $y = f(x)$ na rozwiniętej płaszczyźnie powierzchni gładzonego otworu), x - kierunek promieniowy, y - kierunek osiowy	185
Rys. 228. Trajektoria ziarna z większym promieniem R krzywej K dla zmiany prędkości obrotowej w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min, trajektoria ziarna z mniejszym promieniem R krzywej K dla zmiany prędkości obrotowej w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min	186
Rys. 229. Przykładowa trajektoria ziarna na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu	187
Rys. 230. Krzywa schodkowa uzyskiwana w trakcie gładzenia ze zmienną kinematyką (czyli ze zmienną prędkością i ze zmiennym posuwem głowicy), trajektoria w kolorze czerwonym to ruch ziarna z większą wartością średnią prędkości obrotowej głowicy [157]	188
Rys. 231. Przykładowe trajektorie ziarna na rozwiniętej powierzchni gładzonego otworu	188
Rys. 232. Promień krzywizny kanału olejowego $R = ds/d\theta$, (a_n - składowa normalna przyspieszenia, a_s - składowa styczna przyspieszenia)	189
Rys. 233. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy, zmiana prędkości obrotowej w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min; 5 pełnych obrotów głowicy dla jednego cyklu procesu gładzenia (ruch głowicy w dół i w górę) trwającego 1,7 s	191
Rys. 234. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). Suma promieni dla krzywej z rys. 238, $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,35\}$, wynosi $\sum R = 45,477$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 52,863$ m.	192
Rys. 235. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 40 \div 80$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n - promień krzywej w kroku nr n , L_n - długość krzywej w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238, $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,35\}$, wynosi $\sum R = 90,698$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 104,18$ m.	193
Rys. 236. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 60 \div 80$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n - promień krzywej w kroku nr n , L_n - długość krzywej w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238, $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,35\}$, wynosi $\sum R = 83,022$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 385,705$ m.	194
Rys. 237. Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 120$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n - promień krzywej w kroku nr n , L_n - długość krzywej w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238, $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$,	



	wynosi $\sum R = 150,649$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 247,515$ m.....	195
Rys. 238.	Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 140$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n – promień krzywej w kroku nr n , L_n – długość krzywej w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238, $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 99,464$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 173,11$ m	196
Rys. 239.	Trajektoria ziarna ściernego przy gładzeniu ze zmienną wartością prędkości obrotowej głowicy w zakresie $n = 100 \div 200$ obr/min (dla ruchu głowicy gładzącej w kierunku do góry). R_n – promień krzywej w kroku nr n , L_n – długość krzywej w kroku nr n . Suma promieni dla krzywej z rys. 238, $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 90,773$ m, zaś $\forall x = \{0, 0,01, 0,02, \dots, 0,5\}$, wynosi $\sum R = 161,67$ m....	197
Rys. 240.	Wpływ sumarycznej wartości promienia $\sum R$ [m] krzywizny trajektorii ziarna na przyrost temperatury ΔT [°C].	198
Rys. 241.	Wpływ sumarycznej wartości przyspieszenia normalnego $\sum a_n$ [m/s ²] na przyrost temperatury ΔT [°C].	198
Rys. 242.	Wpływ długości trajektorii ziarna ściernego o długości L [m] na przyrost temperatury ΔT [°C] gładzonego przedmiotu.....	199
Rys. 243.	Wpływ długości ścieżki ziarna L [m] oraz promienia krzywizny R [m] na przyrost temperatury ΔT [°C].....	199
Rys. 244.	Przykładowe trajektorie ziarna ściernego o różnej wielkości amplitudy i o różnej częstotliwości ruchu, na rozwiniętej płaszczyźnie gładzonego otworu, w przedziale $\hat{x} \in (-10, 10)$ (czyli na fragmencie obwodu o długości 20 mm) z tą samą długością ścieżki $L = 24,505$ mm (obliczenia wykonano w oprogramowaniu Mathcad).	200

WYKAZ TABEL

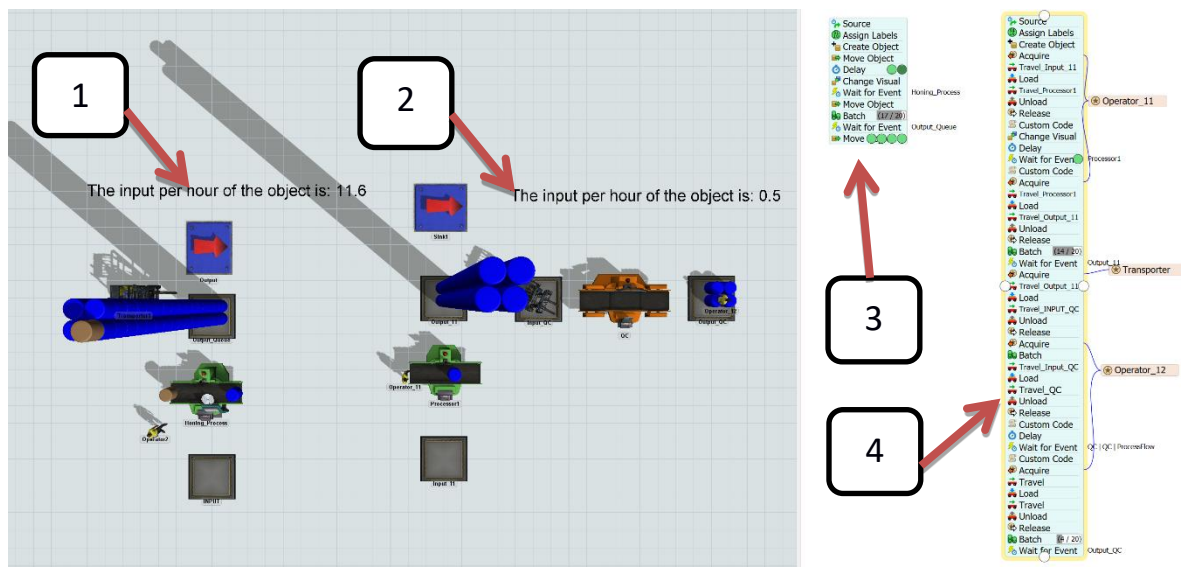
Tab. 1.	Stopnie swobody pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym [165]	15
Tab. 2.	Metody kształtowania powierzchni gładzi cylindrów spalinowych [105]	20
Tab. 3.	Kąty gładzenia omawiane w literaturze	56
Tab. 4.	Matryca planu trypoziomowego PS/DK 3 ³ , dla trzech czynników wejściowych (x_1 – prędkość obrotowa głowicy, x_2 - wartość posuwu liniowego, x_3 – wielkość ziarna).....	89
Tab. 5.	Matryca planu trypoziomowego PS/DK 3 ² , dla dwóch czynników wejściowych (x_1 – docisk osełki, x_2 – wartość posuwu głowicy).....	94
Tab. 6.	Czynniki wejściowe wstępnych badań gładzenia (X_1 - docisk – [„%” możliwego obciążenia], X_2 - prędkość liniowa osiowa [m/min])	106
Tab. 7.	Wyniki pomiarów ubytku materiału [mm] na średnicy podczas gładzenia otworu (w czasie 15 min)	106
Tab. 8.	Wyniki badań przyrostu temperatury przedmiotu gładzonego	107
Tab. 9.	Zmienne wejściowe gładzenia	142
Tab. 10.	Stałe wartości parametrów gładzenia (najniższą wartość odchyłki zaznaczono pogrubioną czcionką)	142
Tab. 11.	Dane wejściowe dla badań procesu gładzenia na frezarce CNC ze stałymi parametrami obróbkowymi	146
Tab. 12.	Zestawienie danych pomiarowych w badaniach przeprowadzonych na frezarce CNC ze stałą prędkością obrotową i ze stałą wartością posuwu głowicy (wg Tab.11)	147
Tab. 13.	Zmienne wartości posuwu podczas gładzenia (najniższą wartość odchyłki zaznaczono pogrubioną czcionką).....	157
Tab. 14.	Dane wejściowe do badań eksperymentalnych prowadzonych na frezarce CNC ze stałymi i ze zmiennymi warunkami kinematycznymi	160
Tab. 15.	Parametry profilu chropowatości dla gładzenia ze zmiennym posuwem	161
Tab. 16.	Zmienne wartości obrotów podczas gładzenia (najniższą wartość odchyłki zaznaczono pogrubioną czcionką)	162



DODATEK

Ponad 20 krotny wzrost wydajności dla obróbki seryjnej gładzenia występuje przy porównaniu obróbki na honownicy konwencjonalnej oraz na gnieździe honującym automatycznym (rys. 245). Różnica związana jest głównie z koniecznością studzenia przedmiotów gładzonych do temperatury otoczenia przy obróbce na honownicy konwencjonalnej, na wykonywaniu pomiarów uzyskanej średnicy po ostudzeniu (aby zweryfikować ilość pozostającego materiału do obróbki) i na wskutek wielokrotnego powtarzania tej czynności.

Obróbka na zautomatyzowanym gnieździe nie wymaga wykonywania operacji gładzenia kilkakrotnie ze względu na bieżący nadzór nad przebiegiem procesu.



Rys. 245. Okno z symulatora FlexSim 2020 - porównanie produkcji na gnieździe konwencjonalnym i na gnieździe automatycznym; 1 - automatyczne gniazdo do honowania, 2 - konwencjonalne gniazdo do honowania, 3 i 4 - algorytmy symulacji FlexSim dotyczące procesu honowania w przepływie procesu

Oprogramowanie FlexSim zostało współfinansowane przez NCBiR do projektu „MAZOWSZE/0127/19”.