



**POLITECHNIKA
KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII
PRODUKCJI**



PRACA DOKTORSKA

**BADANIA I ANALIZA KSZTAŁTOWANIA CHROPOWATOŚCI
POWIERZCHNI ELEMENTÓW ZE STALI AISI 304 W PROCESIE
OBRÓBKI W ROTACYJNO - KASKADOWEJ WYGŁADZARCE
POJEMNIKOWEJ Z ZASTOSOWANIEM
INNOWACYJNEGO UCHWYTU PRZEDMIOTU**

RESEARCH AND ANALYSIS OF THE FORMATION OF SURFACE ROUGHNESS
ELEMENTS MADE OF AISI 304 STEEL IN THE PROCESS OF MACHINING
IN CENTRIFUGAL DISC FINISHING USING AN INNOVATIVE OBJECT HOLDER

mgr inż. Mateusz Juniewicz

D-199

Promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Plichta

Koszalin 2024

Spis treści

Streszczenie pracy doktorskiej	4
Diploma thesis abstract	5
Wykaz symboli i akronimów	6
1. WPROWADZENIE	7
2. ANALIZA STANU WIEDZY W ZAKRESIE PROCESÓW OBRÓBK W WYGŁADZARKACH POJEMNIKOWYCH Z ZASTOSOWANIEM UCHWYTÓW PRZEDMIOTOWYCH.....	10
2.1. Charakterystyka rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej	10
2.2. Kinematyka i warunki procesu wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej.....	12
2.3. Rozkład energii kinetycznej wsadu roboczego w przestrzeni roboczej rotacyjno - kaskadowej wygładzarki pojemnikowej	17
2.4. Narzędzia robocze w postaci kształtek ściernych i polerskich	21
2.5. Procesy wygładzania pojemnikowego z zastosowaniem pasywnych i aktywnych uchwytów przedmiotowych.....	27
2.5.1. Obróbka z zastosowaniem pasywnych uchwytów przedmiotowych.....	28
2.5.2. Obróbka z zastosowaniem aktywnych uchwytów przedmiotowych	36
2.6. Wnioski z analizy literatury	45
3. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU I ZAKRESU PRACY ORAZ CELE I HIPOTEZY BADAWCZE	47
4. PROJEKT I BUDOWA AKTYWNEGO UCHWYTU DO MOCOWANIA PRZDMIOTU OBRABIANEGO W ROTACYJNO - KASKADOWEJ WYGŁADZARCE POJEMNIKOWEJ EC6	50
4.1. Projekt konstrukcyjny uchwytu	51
4.2. Weryfikacja działania aktywnego uchwytu przedmiotowego na podstawie symulacji komputerowej.....	57
5. BADANIA EKSPERYMENTALNE PROCESU OBRÓBK W ROTACYJNO- KASKADOWEJ WYGŁADZARCE POJEMNIKOWEJ EC6 Z ZASTOSOWANIEM AKTYWNEGO UCHWYTU PRZEDMIOTOWEGO.....	59
5.1. Cel i zakres prowadzonych badań	59
5.2. Podstawowe stanowiska badawcze i pomiarowe.....	61
5.2.1. Rotacyjno kaskadowa wygładzarka pojemnikowa	61
5.2.2. Aktywny uchwyt przedmiotowy.....	63
5.2.3. Profilometr optyczny TalySurf CLI 2000 Taylor-Hobson	63
5.2.4. Profilometr stykowy Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke	65
5.3. Materiał obrabiany stal nierdzewna AISI 304	66
5.4. Badania rozpoznawcze wpływu rodzaju ruchu przedmiotu obrabianego na kształtowanie struktury geometrycznej jego powierzchni.....	68

5.5.	Badania wpływu zintegrowanego ruchu obrotowo - wibracyjnego przedmiotu obrabianego na kształtowanie chropowatości powierzchni obrabianych elementów ze stali AISI 304	84
5.5.1.	Badania wpływu zintegrowanego ruchu obrotowo - wibracyjnego przedmiotu obrabianego na kształtowanie chropowatości powierzchni w intensywnym procesie obróbki	85
5.5.2.	Badania wpływu zintegrowanego ruchu obrotowo-wibracyjnego przedmiotu obrabianego na kształtowanie chropowatości powierzchni w intensywnym procesie obróbki pojemnikowej	94
6.	BADANIA 3-ETAPOWEGO PROCESU OBRÓBKİ STALI AISI 304 Z OKRESOWĄ ORIENTACJĄ PRZDMIOTU OBRABIANEGO W STREFACH WSADU ROBOCZEGO O STOPNIOWO ZMNIEJSZAJĄCEJ SIĘ WIELKOŚCI ENERGII KINETYCZNEJ	107
6.1.	Charakterystyka 3-etapowego procesu obróbki	107
6.2.	Badania doświadczalne	110
7.	BADANIA WPLYWU STĘPIENIA NARZĘDZI OBRÓBKOWYCH W POPRZEDZAJĄCYCH OPERACJACH TOCZENIA I SZLIFOWANIA NA KSZTAŁTOWANIE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI W PROCESIE POJEMNIKOWEGO WYGŁADZANIA ELEMENTÓW ZE STALI AISI 304	116
7.1.	Wprowadzenie	116
7.2.	Kształtowanie jakości technologicznej powierzchni stali AISI 304 w sekwencyjnym procesie technologicznym	117
7.3.	Kształtowanie chropowatości powierzchni w operacjach toczenia i szlifowania poprzedzających proces pojemnikowego wygładzania	120
7.4.	Badania procesu kształtowania chropowatości powierzchni w procesie wygładzania pojemnikowego	124
7.5.	Transformacja chropowatości powierzchni wariantach sekwencyjnego procesu technologicznego	128
8.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	131
8.1.	Wnioski poznawcze	132
8.2.	Wnioski uytylitarne	133
8.3.	Wnioski do dalszych badań	134
	Bibliografia	136
	Spis rysunków	140
	Spis tabel	145
	Spis załączników	146

Streszczenie pracy doktorskiej

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Katedra Inżynierii Produkcji

Tytuł: Badania procesu wygładzania stali nierdzewnej w rotacyjno - kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem aktywnego uchwytu przedmiotowego

Autor: Mateusz Juniewicz

Promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Plichta

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu zastosowania uchwytu aktywnego, który wprowadza dodatkowy ruch obrotowy oraz wibracyjny na kształtowanie chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego. W pierwszej części pracy została omówiona charakterystyka procesu obróbki w wygładzarkach rotacyjno-kaskadowych oraz stosowane dotychczas rozwiązania uchwytów aktywnych. Kolejna część pracy opisuje kinematykę ruchu wsadu roboczego oraz jego energię w poszczególnych częściach komory roboczej wygładzarki rotacyjno-kaskadowej. Następnie przedstawiono projekt uchwytu aktywnego oraz jego realizację. W ostatniej części pracy zostały zaprezentowane badania potwierdzające skuteczność opracowanego urządzenia. Badania zostały podzielone na trzy części. W części pierwszej zbadano wpływ rodzaju ruchu przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki z zastosowaniem uchwytu aktywnego. Kolejna część obejmuje propozycję trzy etapowej obróbki z zastosowaniem uchwytu aktywnego i przemieszczaniem przedmiotu obrabianego w kierunku promieniowym komory wygładzarki.. W ostatniej części przedstawiono wpływ dziedzictwa technologicznego na końcowy efekt obróbki powierzchni. Na zakończenie przedstawiono podsumowanie i wnioski o charakterze poznawczym, utylitarnym oraz wyznaczające kierunki dalszych badań.

Słowa kluczowe: obróbka wibracyjna, wygładzarka rotacyjna, uchwyt aktywny, obróbka wleczona, obróbka obrotowa, obróbka powierzchni, gratowanie

Diploma thesis abstract

KOSZALIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
Department of Production Engineering

Title: Investigations of the surface treatment process of stainless steel by centrifugal disc finishing with the use of an active workpiece holder

Author: Mateusz Juniewicz

Supervisor: prof. dr hab. inż. Jarosław Plichta

The aim of this study was to investigate the effect of the use of an active holder, which generate additional rotational and vibrational movement on the shaping of the geometric structure of the workpiece surface. In the first part of work, the characteristics of operation in rotary-cascade smoothing machines and the active holders used so far have been discussed. The next part of the work describes the kinematics of movement of the abrasive chips and its energy in individual parts of the rotary-cascade smoothing machine's working chamber. Then the design of the active grip and its implementation are presented. The last part of the work presents the research confirming the effectiveness of the developed device. The research was divided into three parts. In the first part, the efficiency of machining with the use of an active holder and machining without clamping was examined. The next part is a proposal for three-stage processing with the use of an active holder. The last part presents the influence of technological heritage on the final effect of surface treatment.

Keywords: vibration treatment, rotary smoothing machine, active holder, stream finishing, rotary treatment, surface treatment, deburring

Wykaz symboli i akronimów

Ważniejsze symbole

F	- siła odśrodkowa
F_n	- składowa normalna
F_t	- siły bezwładności
m	- masa
ω	- prędkość kątowna
g	- przyspieszenie ziemskie
Z	- zużywalność kształtek ściernych
S_k	- skrawalność
Sa	- chropowatość powierzchni
h	- wysokość
Sdr	- rozwinięcie powierzchni
Ssc	- Średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków
Sdq	- Średniokwadratowe nachylenie nierówności
Spc	- liczba wzniesień

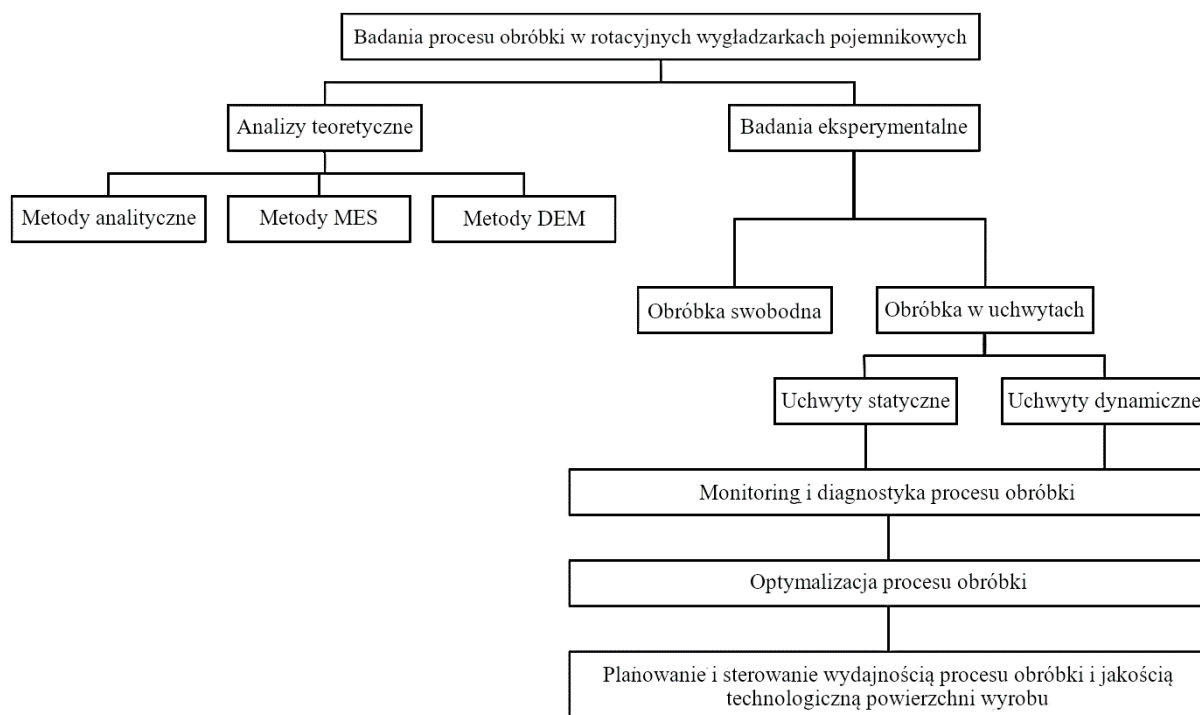
Akronimy

AE	- emisja akustyczna
CAD	- komputerowe wspomaganie projektowania
DEM	- metoda elementów dyskretnych
DMLS	- metoda punktowego spiekania laserowego
MES	- metoda elementów skończonych
MR	- ubytek obróbki
SEM	- Skaningowy mikroskop elektronowy
SGP	- Struktura geometryczna powierzchni

1. WPROWADZENIE

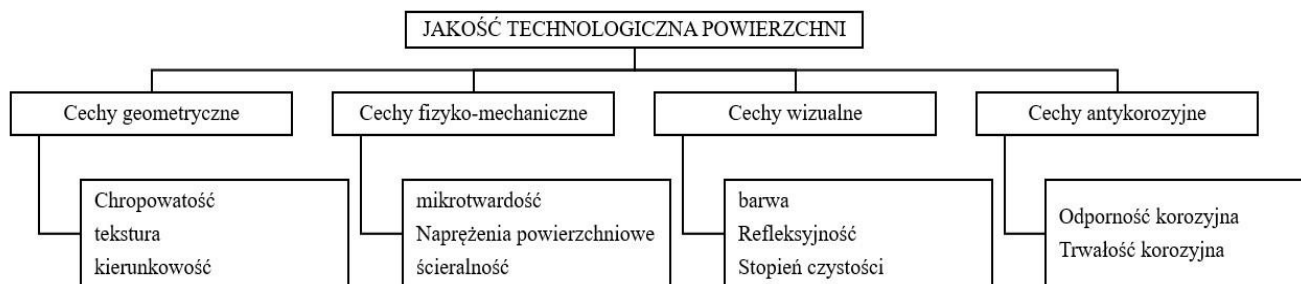
Procesy obróbki w rotacyjnych wygładzarkach pojemnikowych, są efektywnym sposobem wygładzania powierzchni przedmiotów o różnorodnych kształtach, wykonanych z różnych gatunków materiałów. Obróbka ta należy do grupy wykończeniowych obróbek powierzchniowych, z zastosowaniem kształtek ściernych i polerskich. Obróbka ścierna charakteryzuje się usuwaniem warstw o małej grubości na całej powierzchni przedmiotu obrabianego, ukształtowanej w obróbkach poprzedzających. Celem tego procesu jest ukształtowanie chropowatości powierzchni o określonych cechach topograficznych, spełniających określone właściwości użytkowe, dotyczące np. refleksyjności, adhezyjności, dekoracyjności i czystości higienicznej.

W nowoczesnych pracach rozwojowych procesów wygładzania pojemnikowego, znaczące miejsce zajmują badania dotyczące monitoringu i diagnostyki. Monitoring ten obejmuje pomiary energii kinetycznej strumienia kształtek ściernych, min. w odniesieniu do stanu naprężeń powierzchniowych, ukształtowanych na powierzchni poddanej działaniu tych kształtek. Wielkości tych naprężeń są mierzone za pomocą płytek kontrolnych ALMEN, poprzez pomiar strzałki ugięcia obrabianej płytki pomiarowej [19,48,49]. Inny sposób monitorowania stanu energetycznego strumienia kształtek ściernych, bazuje na pomiarze wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej AE, odbieranego z próbki zanurzonej w określonym miejscu strugi wsadu roboczego [8,45,25,42]. W podobny sposób mierzy się wielkości siły oddziaływania kształtek roboczych na powierzchnie obrabiane w odniesieniu do parametrów i warunków obróbki [44,39,47,14]. Metody te służą do wyznaczenia stref największego poziomu energetycznego wsadu roboczego, w celu orientacji w nich przedmiotów obrabianych, by zapewnić możliwie największą wydajność procesu obróbki. Jest to kierunek wprowadzający postęp jakościowy w procesach rotacyjnego wygładzania, zwłaszcza w przypadku wspomagania nowoczesnymi metodami analitycznego modelowania [5] oraz metodami elementów skończonych MES [46] i elementów dyskretnych DEM [8,45,27]. W systemowym ujęciu podstawowe metody badania i optymalizacji procesów wygładzania pojemnikowego przedstawiono na (rys.1).



Rys.1. Metody i urządzenia wykorzystywane w badaniach procesów rotacyjnego wygładzania pojemnikowego (opracowanie własne)

Jak wykazują wyniki badań, szczególne korzyści może zapewniać obróbka przedmiotów w uchwytach, które umożliwiają indywidualizację procesów wygładzania przedmiotów o zróżnicowanych kształtach i wymiarach. Zamocowane i odpowiednio zorientowane przedmioty, mogą także otrzymywać dodatkowe ruchy pomocnicze oraz mogą być oddzielane od innych, co zabezpiecza przed ich wzajemnym uszkodzaniem. W tym celu stosuje się specjalne oprzyrządowanie w uchwytach przedmiotowych, które umożliwia nadawanie przedmiotowi obrabianemu dodatkowych ruchów. Są to ruchy ustawcze, obrotowe i ich różnego rodzaju ich wzajemne skojarzenia. To umożliwia sterowanie mechanizmem kształtowania struktury geometrycznej powierzchni obrabianej w wyniku zmiany udziału elementarnych zjawisk obróbkowych, takich jak: mikroskrawanie, kraterowanie, zarysowywanie i obtaczanie. Ponadto, możliwe jest określone kształtowanie topografii powierzchni, przez ukierunkowanie śladów obróbkowych, ich zagęszczenie i zagłębianie. Ten rodzaj obróbki zapewnia również zwiększenie jej efektywności oraz powtarzalności jakości technologicznej powierzchni obrabianej[53]. Prace te zmierzają do sterowanego kształtowania określonych cech strukturalnych powierzchni elementów obrabianych (rys.2).



Rys.2. Podstawowe cechy jakościowe powierzchni elementów metalowych obrabianych w wygładzarkach pojemnikowych (opracowanie własne)

Właściwości powierzchni przedmiotów, zapewniają odpowiednie ich zachowanie w środowisku użytkowania. I tak:

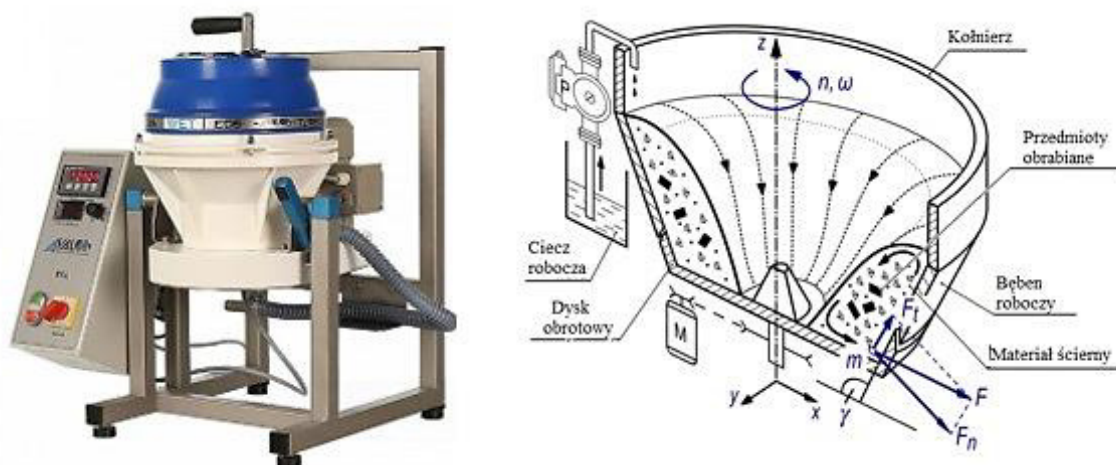
- właściwości fizyczne zapewniają wyższą twardość w stosunku do rdzenia materiału, zwiększoną odporność na zużycie trybologiczne, zwiększoną przewodność elektryczną lub cieplną, odporność na działanie wysokiej temperatury,
- właściwości antykorozyjne przeciwdziałają korozji elektrochemicznej i stanowią barierę dla korozji gazowej,
- właściwości dekoracyjne (wizualne) zapewniają wyrobom pożądany wygląd, o czym decyduje barwa, połysk, faktura, stopień matowości, odporność na pokrywanie się różnego rodzaju nalotami, trwałość dekoracyjna.

Na jakość technologiczną powierzchni elementów obrabianych w procesie wygładzania pojemnikowego, istotne znaczenie ma dziedzictwo technologiczne. Jest ono rozumiane, jako spuścizna cech odziedziczonych przez powierzchnię przedmiotu po każdej poprzedzającej operacji obróbkowej [7,5,6,11]. Ma to nie tylko istotne znaczenie poznawcze, ale duże znaczenie dla praktyki przemysłowej. Odnosi się to zwłaszcza do procesów wielooperacyjnych, w których jakość wygładzanych powierzchni w istotnym stopniu będzie zależna od cech odziedziczonych szczególnie, jeśli poszczególne operacje technologiczne bazują na odmiennych procesach kształtowania, np. obróbce bezubytkowej (obróbka plastyczna, odlewnictwo) i ubytkowej (obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna, skoncentrowanymi strumieniami energii).

2. ANALIZA STANU WIEDZY W ZAKRESIE PROCESÓW OBRÓBKI W WYGŁADZARKACH POJEMNIKOWYCH Z ZASTOSOWANIEM UCHWYTÓW PRZEDMIOTOWYCH

2.1. Charakterystyka rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej

Proces obróbki powierzchniowej w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, polega na oddziaływaniu swobodnymi kształtkami obróbkowymi znajdującymi się w ruchu wirowym na powierzchnię elementów obrabianych, przy udziale płynów i środków wspomagających obróbkę. Charakterystyczny dla tego sposobu obróbki, jest nieskrępowany wzajemny ruch obrabianych elementów i kształtek roboczych. Kształtki mogą charakteryzować się zróżnicowaną charakterystyką w zależności od ich przeznaczenia. Mogą to być np. kształtki ściernie (żywiczne, ceramiczne), kształtki polerujące (metalowe, roślinne, z tworzyw sztucznych) oraz kształtki specjalne (aluminiowe). W procesach obróbki realizowanej za pomocą tych narzędzi, mogą występować różnego rodzaju elementarne podstawowe zjawiska obróbkowe, w postaci mikroskrawania, bruzdowania, ścierania i odkształceń plastycznych. Wsad roboczy składający się z kształtek ściernych i środków wspomagających wykonuje ruch rotacyjny, generowany zabierakami wirnika usadowionego na dnie pojemnika roboczego. Kształtki wraz z elementami obrabianymi są przemieszczane na stożkową ścianę komory roboczej wygładzarki. Na skutek tarcia w ruchu względnym na ścianie obudowy, następuje znaczny spadek prędkości kształtek, co powoduje ich opadanie w kierunku dna pojemnika roboczego pod wpływem siły grawitacji [53,33] (rys.3).



Rys.3. Rotacyjno – kaskadowa wygładzarka pojemnikowa EC6: a) widok ogólny, b) schemat komory roboczej (AVALON) [33,45]

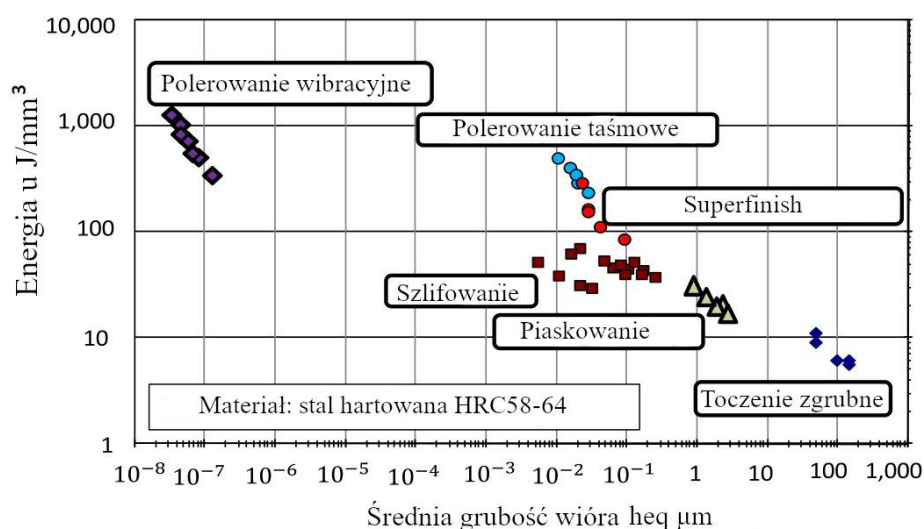
Pełny cykl obiegu każdego elementu składowego wsadu roboczego, składa się z trzech faz ruchu: ruchu wirowego, ruchu unoszenia w części stożkowej komory roboczej i ruchu opadania. Wsad roboczy znajduje się w ciągłej cyrkulacji. W takich warunkach, proces

obróbki jest słabo sterowalny i charakteryzuje się niską efektywnością, ponieważ przedmioty obrabiane zajmując losowe położenia, a chwilowa energia wsadu roboczego, jest również lokalnie zmienna w przestrzeni wsadu roboczego. Przestrzenny rozkład struktury wsadu roboczego jest zróżnicowany zarówno w kierunku wzdłużnym, jak i poprzecznym oraz zmienny w czasie pracy. Zmiany te są spowodowane złożonym ruchem kształtek ściernych i ich wzajemnymi interakcjami [33]. Wobec tego, potencjał energetyczny wsadu roboczego podczas obróbki jest wykorzystywany jedynie w ograniczonym stopniu. To powoduje, że czas obróbki jest relatywnie długi i dochodzi często do kilku godzin (tab.1).

Tab.1. Przeciętne czasy różnych operacji obróbki wygładzającej w rotacyjno-kaskadowych obrabiarkach pojemnikowych [24,33]

Lp.	Materiał obrabiany	Czas obróbki
1	Stal węglowa	1,5-2 h
2	Stal hartowana	3 h
3	Stal nierdzewna	2,5 h
4	Odlewy i odkuwki żeliwne i staliwne	4 h
5	Odlewy ze stopu AK	45 min
6	Części metalowe po obróbce wiórowej	45 min

Tego rodzaju procesy, klasyfikuje się jako procesy mikroobróbki z bardzo małymi głębokościami skrawania rzędu $10^{-8} - 10^{-5} \mu\text{m}$ *heq* i jednocześnie dużą energią jednostkową dochodzącą do 10000 J/mm^3 [30] (rys.4).



Rys.4. Cechy charakterystyczne wygładzania pojemnikowego [32]

W procesach tych może jednocześnie występować szereg zjawisk elementarnych, do których można zaliczyć [53,33]:

- mikroskrawanie ziarnami ściernymi znajdującymi się w strukturze kształtek ściernych,
- ścieranie mechaniczne nierówności powierzchni obrabianych,
- bruzdowanie przez ostrza kształtek o niewielkim zagłębieniu,
- docieranie powierzchni obrabianych przedmiotów przez ziarna i mikroziarna ściernie, oraz produkty ich zużycia,
- wygładzanie nierówności powierzchni drogą odkształceń plastycznych,
- reakcje chemiczne i procesy anodowe, zachodzące na powierzchniach przedmiotów obrabianych w obecności aktywnych środków chemicznych wspomagających obróbkę.

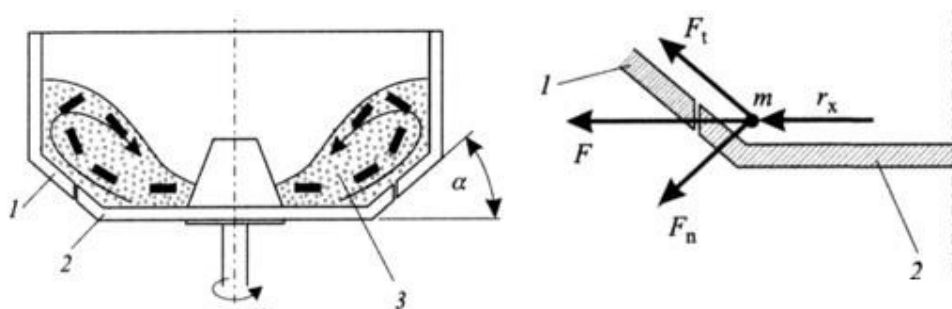
2.2. Kinematyka i warunki procesu wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej

Obróbka wygładzająca powierzchni w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, postępuje głównie w wyniku oddziaływania kształtek na powierzchnię obrabianą i aktywnych środków wspomagających obróbkę, w wyniku czego generowane są zjawiska mikroskrawania i bruzdowania ziarnami ściernymi oraz procesy tarcia spoiwa i obtaczania. Wsad roboczy składający się z kształtek ściernych i środków wspomagających wykonuje ruch rotacyjny, generowany ruchem obrotowym wirnika znajdującego się na dnie pojemnika roboczego wygładzarki. W wirującym wsadzie roboczym, kształtki wykonują dodatkowy ruch wirowy [33] (rys.5).



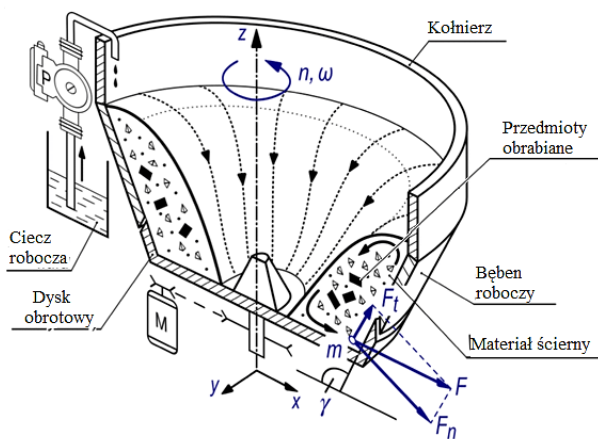
Rys.5. Wirujący strumień kształtek w komorze roboczej rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej: a) widok ogólny, b) tory ruchu kształtek (opracowanie własne)

Ruch obrotowy wirnika, wywołuje siłę odśrodkową kształtek i przedmiotów obrabianych siłami bezwładności. Wskutek tego elementy te są kierowane na wewnętrzną ścianę nieruchomej obudowy komory wygładzarki [53,33] (rys.6).



Rys.6. Schemat pracy rotacyjno-kaskadowej wyłazarki pojemnikowej:
a) schemat budowy: 1 - nieruchoma część pojemnika, 2 - wirnik roboczy, 3- wsad roboczy ,
b) schemat działania sił na element o masie m : F - siła odśrodkowa, F_n - składowa normalna

Składowe tych sił działających stycznie do ruchomej powierzchni dolnej części pojemnika o kształcie stożkowym, przemieszczają odśrodkowo kształtki robocze w kierunku promieniowym, a następnie do nieruchomej górnej części obudowy. Na skutek tarcia w ruchu względnym, na ścianie obudowy następuje znaczny spadek prędkości kształtek, co powoduje ich opadanie w kierunku dna pojemnika roboczego pod wpływem siły grawitacji. W wyniku powyższych zjawisk, w procesie obróbki następuje ciągły cykl zamiany energii kinetycznej w potencjalną i odwrotnie (rys.7).



Rys.7. Tor ruchu kształtek roboczych w komorze rotacyjno-kaskadowej wyłazarki pojemnikowej [33.45]

Na podstawie zasad kinematyki można określić, że elementy o masie m znajdujące się we wsadzie roboczym na powierzchni stożkowej pojemnika roboczego, są obciążane składową styczną F_t siły bezwładności F , której wartość jest opisana zależnością [8,33]:

$$F_t = m\omega^2 r \sin \gamma \quad (\text{N} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}), \quad (1)$$

gdzie: m — masa elementu znajdującego się we wsadzie roboczym, $\omega = 2\pi \cdot n$ — prędkość kątowna części stożkowej wygładzarki, r — promień działania, γ — kąt pochylenia części stożkowej wygładzarki.

Po uwzględnieniu warunków tarcia na tej powierzchni i siły grawitacyjnej, można określić graniczną wartość prędkości kątowej ω_{min} , która jest konieczna do wywołania ruchu elementów znajdujących się we wsadzie roboczym, względem powierzchni komory roboczej. Opisuje ją zależność [8,33]:

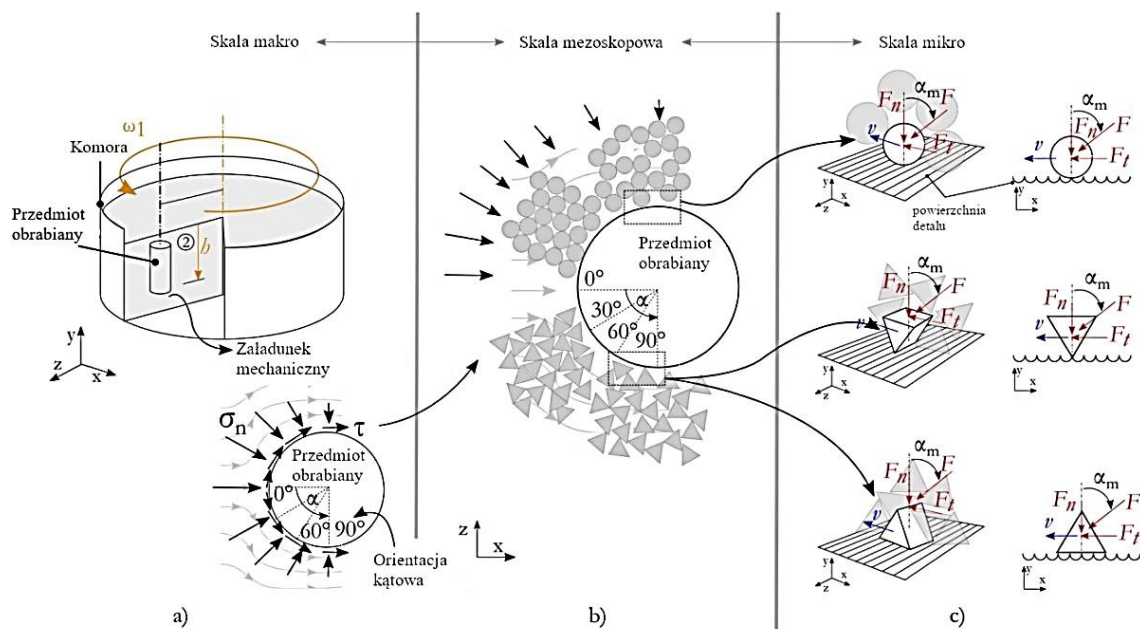
$$\omega_{min} = \sqrt{\frac{g}{r} \sqrt{\frac{1 + \mu \tan \gamma}{\tan \gamma - \mu}}} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} = \text{s}^{-2})^{1/2} = \text{s}^{-1}, \quad (2)$$

gdzie: g — przyspieszenie ziemskie, μ — współczynnik tarcia na powierzchni stożkowej pojemnika wygładzarki.

Przy $\omega > \omega_{min}$ elementy wsadu opuszczają dno pojemnika i przechodzą na górną nieruchomą część pojemnika wygładzarki, zmniejszając swoją prędkość liniową i pod wpływem sił grawitacyjnych przemieszczają się do wnętrza pojemnika.

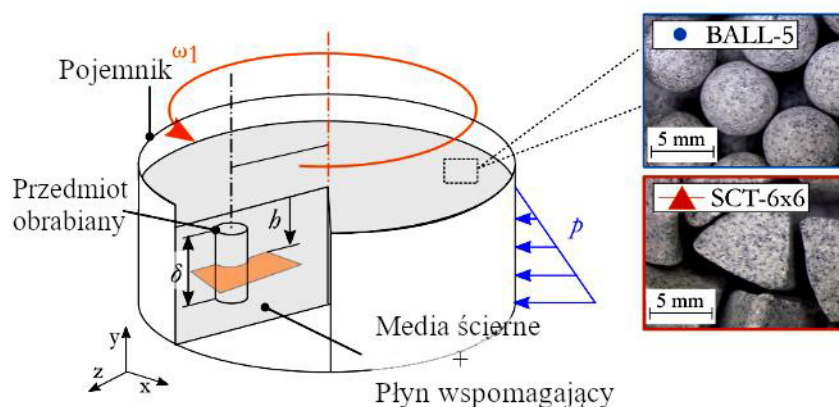
Podczas ruchu ustalonego wsadu, następuje ciągła obróbka przedmiotów znajdujących się w komorze roboczej. Jest to jednak proces długotrwały, gdyż chwilowa wartość energii roboczej działającej na powierzchnię tych przedmiotów jest zmienna. Wartość tej energii jest zależna od chwilowego położenia i orientacji przedmiotów we wsadzie roboczym. Rozkład energii jest silnie zróżnicowany i zmienny w czasie. Efekty obróbki w postaci zmniejszenia chropowatości powierzchni obrabianej, są wynikiem uśrednionych oddziaływań energetycznych w określonym czasie. W takim przypadku nie jest zapewniona maksymalna efektywność procesu wygładzania. Przedmioty są intensywnie obrabiane jedynie w relatywnie krótkim czasie, gdy przebywają w obszarze największej energii działania wsadu roboczego.

W zależności od interakcji między stykającymi się z powierzchnią obrabianą kształtkami roboczymi o określonej chwilowej orientacji α_m , wielkości siły kontaktowej F i prędkości v , będą indukowane różne mechanizmy interakcji [46] (rys.8).



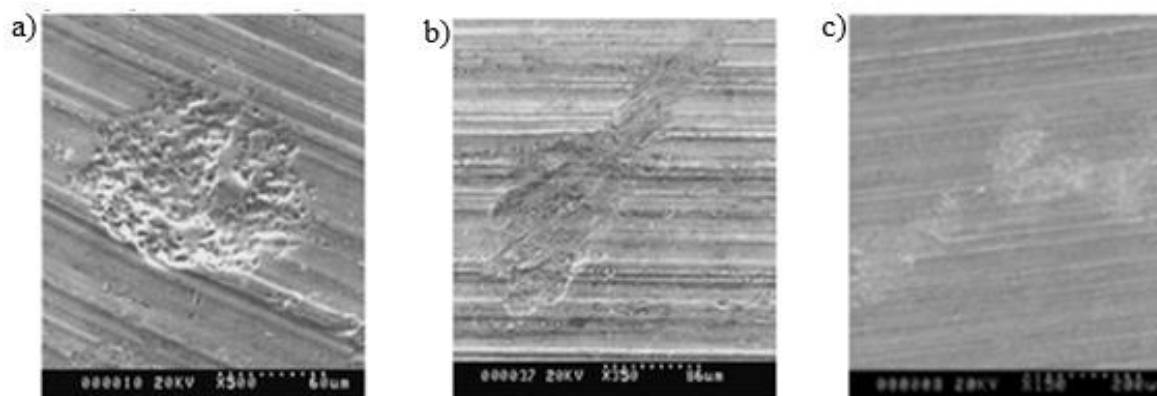
Rys.8. Proces rotacyjnego pojemnikowego wygładzania: a) skala makroskopowa - kształtki ścierne z płynem wspomagającym generują obciążenie mechaniczne (naprężenia normalne σ_n i τ), b) skala mezoskopowa - mieszanina środków ściernych (dyskretnych cząstek) działająca na powierzchnię pod wpływem sił kontaktowych (F_n , F_t , F) z prędkością (v) i przy kątach orientacji (α_m) [27]

Wielkości obciążenia wywieranego przez kształtki ściernie na powierzchnię obrabianą, zależą od ich rodzaju, kształtu, masy i prędkości w ruchu rotacyjnym. Zależą też od miejsca zanurzenia powierzchni we wsadzie roboczym, tj. umiejscowienia w kierunku wysokościowym h i promieniowym R (rys.9). Od tego położenia zależy wielkość energii kinetycznej wsadu roboczego, a w konsekwencji intensywność obróbki. Na efektywność obróbki wpływa także orientacja fragmentów powierzchni obrabianej względem kierunku ruchu kształtek ściernych. Wykazano także, że intensywność obróbki i zmiany chropowatości powierzchni, są zróżnicowane wokół części o kształcie cylindrycznym. W kierunku prostopadłym ruchu kształtek do obrabianej powierzchni, naprężenie normalne osiąga największe wartości, a prędkość poślizgu jest ograniczona. W przypadku ich ruchu w kierunku stycznym, normalne naprężenie jest relatywnie mniejsze, a prędkość poślizgu jest maksymalna. To wpływa na intensywność naprężeń normalnych i ścinających [46,29].



Rys.9. Schemat proces rotacyjnego wygładzania pojemnikowego [27]

W przypadku normalnego kierunku działania kształtek na powierzchnię obrabianą, mogą być wywoływane duże lokalne odkształcenia plastyczne, których skutkiem jest powstawanie mikrowgłębień (mikrokraterów). Natomiast styczny ruch kształtek względem tej powierzchni, sprzyja powstawaniu procesów mikroskrawania i zarysowywania, ponieważ prędkość tego ruchu jest relatywnie wysoka, w stosunku do prędkości w kierunku normalnym. W stanach pośrednich orientacji fragmentów obrabianych powierzchni, skumulowane oddziaływanie kształtek ściernych ma odmienny charakter, czego skutkiem są zróżnicowane udziały mechanizmów odkształceń plastycznych, mikroskrawania, bruzdowania, zarysowywania (rys.10).



Rys.10. Podstawowe rodzaje śladów obróbkowych powstałych na powierzchniach obrabianych w procesie obróbki w wygładzarkach pojemnikowych będące wynikiem: a) mikrowgłębienia (kraterowania), b) mikroskrawania, c) obtaczania i tarcia [8]

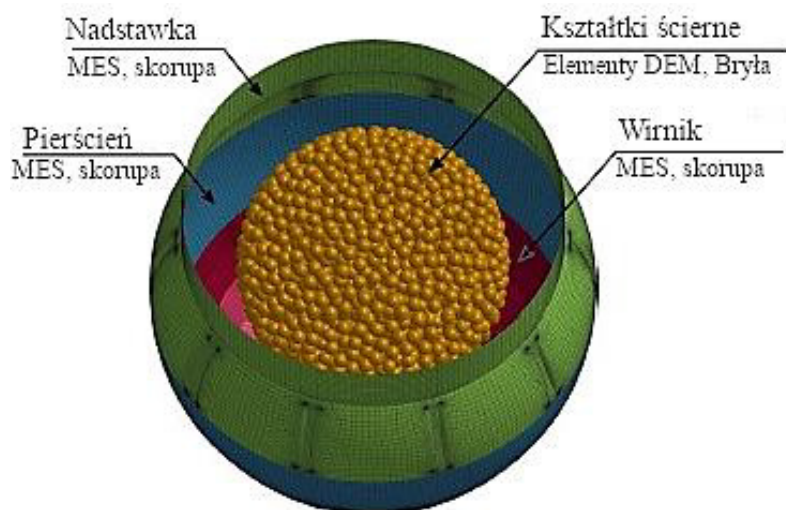
W przypadku normalnego kierunku działania kształtek na powierzchnię obrabianą, mogą być wywoływane duże lokalne odkształcenia plastyczne, których skutkiem jest powstawanie mikrokraterów. Natomiast styczny ruch kształtek względem tej powierzchni sprzyja generowaniu procesów mikroskrawania i zarysowywania, ponieważ prędkość tego ruchu jest relatywnie wysoka, w stosunku do prędkości w kierunku normalnym. W stanach pośrednich

orientacji fragmentów obrabianych powierzchni, skumulowane oddziaływanie kształtek ściernych ma odmienny charakter, czego skutkiem są zróżnicowane udziały mechanizmów odkształceń plastycznych i mikroskrawania i zarysowywania.

2.3. Rozkład energii kinetycznej wsadu roboczego w przestrzeni roboczej rotacyjno - kaskadowej wygładzarki pojemnikowej

Pomimo szerokiej wiedzy o ruchu i rozkładzie kształtek ściernych w komorze roboczej wygładzarek, głównym problemem dotyczącym optymalizacji procesie wygładzania, jest brak wiedzy o bieżącym rozkładzie energii kształtek roboczych w strumieniu wsadu roboczego. Wobec powyższego, w ostatnim okresie czasu prowadzi się badania eksperymentalne i numeryczne w celu wyznaczenia obszaru, w którym energia kinetyczna kształtek roboczych jest na tyle wysoka, że umiejscowienie zamocowanego w uchwycie przedmiotu obrabianego w tym obszarze, może zapewnić zwiększenie efektywności obróbki [9,40,35].

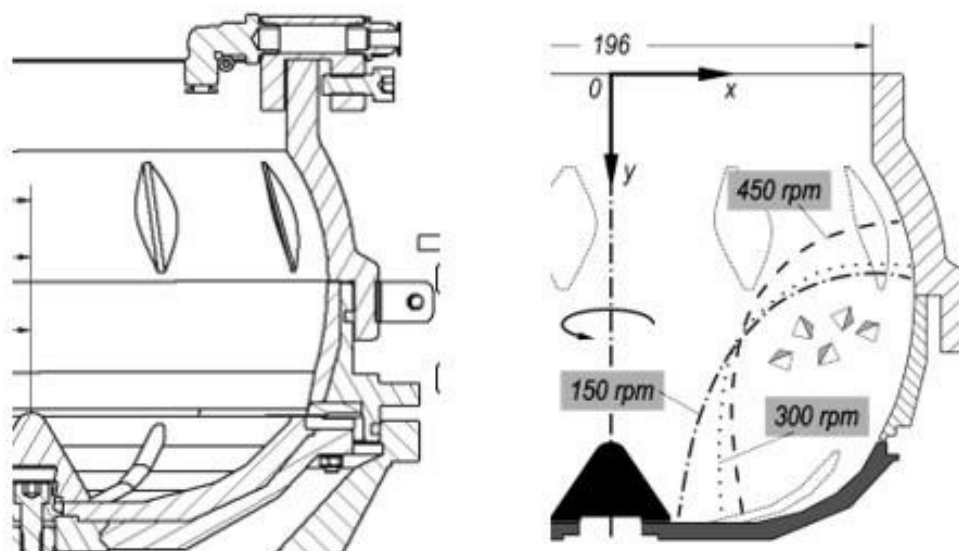
W tym zakresie w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej, zostały przeprowadzone numeryczne i eksperymentalne badania rozkładu energii kinetycznej wsadu w przekroju osiowym rotacyjno-kaskadowej wygładzarki EC6 [45,46]. Analizy numeryczne przeprowadzono z zastosowaniem metody elementów dyskretnych DEM w programie Ansys/Ls-Dyna (rys.11).



Rys.11. Dyskretny model DEM obróbki w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej

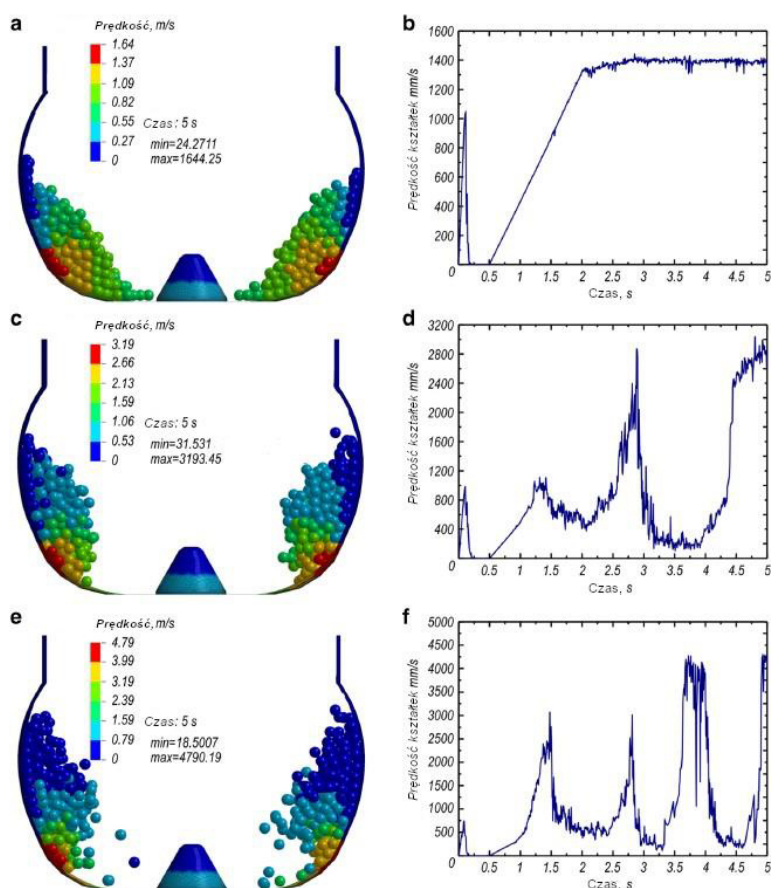
Programy komputerowe wykorzystujące metodę DEM pozwalają na symulację skończonych przemieszczeń i obrotów ciał o cechach dyskretnych oraz automatycznie wykrywanie występujących interakcji pomiędzy elementami składowymi wsadu roboczego.

Zdefiniowano geometrię przestrzeni roboczej wyłazarki EC6 oraz rozmieszczenie w tej przestrzeni kształtek ściernych (rys.12).



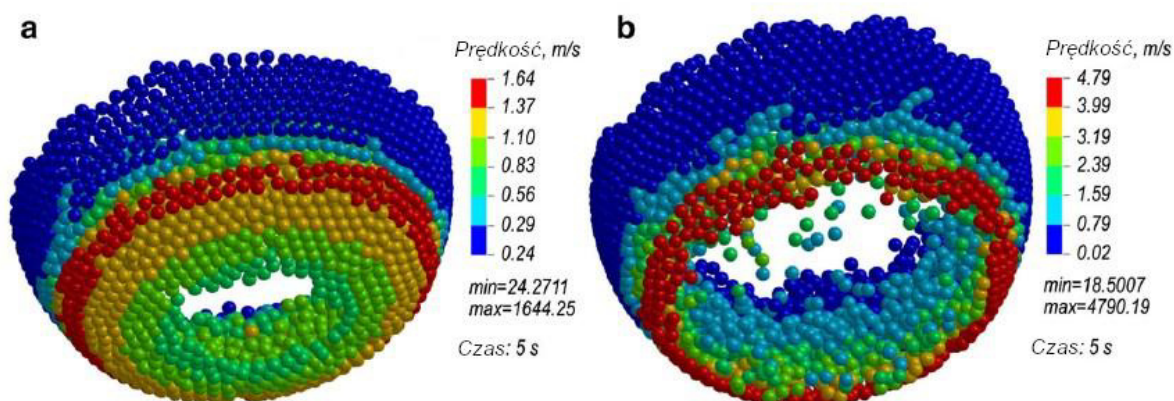
Rys. 12. Przekrój komory roboczej wyłazarki EC6 a) i przekrój osiowy wsadu roboczego dla zmiennych prędkości obrotowych wirnika napędowego b) [45,46]

Na podstawie dynamiki elementów dyskretnych za pomocą metody DEM, określono rozkład prędkości pojedynczych elementów (rys.13).



Rys.13. Rozkład położenia i prędkości elementów w komorze roboczej wyłazarki rotacyjnej oraz wykres zmian prędkości losowo wybranego elementu w funkcji czasu dla różnych prędkości obrotowych wirnika: a-b) $n = 150$ obr/min, c-d) $n = 30$ [45,46]

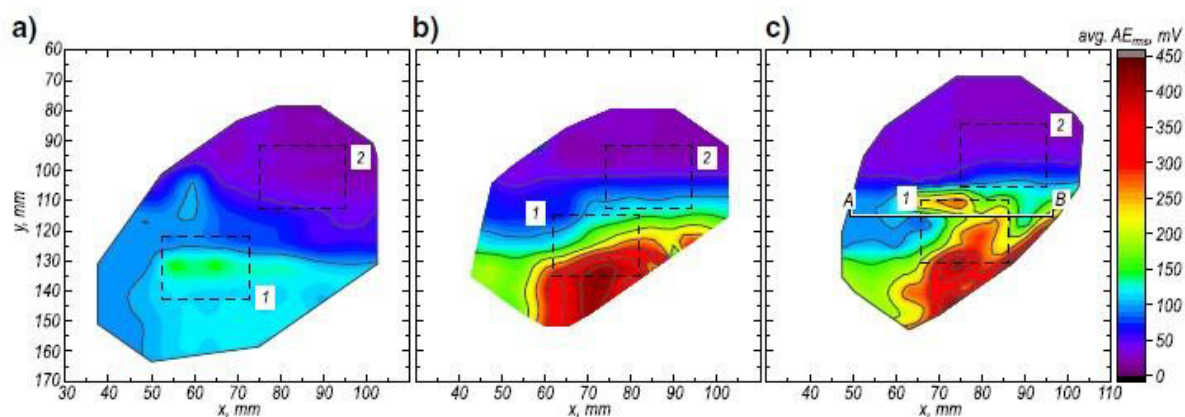
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz określono, że prędkości maksymalne są osiągane w strumieniu tylko przez małą liczbę elementów, które w danym momencie znajdują się po zewnętrznej stronie strumienia i nie uległy znacznemu przemieszaniu w kierunku pionowym. Częstki te oznaczono kolorem czerwonym (rys.14).



Rys. 14. Widok rozkładu prędkości swobodnych cząstek w strumieniu dla dwóch skrajnych prędkości obrotowych wirnika: $n = 150$ obr/min (a) i $n = 450$ obr/min (b [45,46])

Wyniki tych analiz wskazują na to, że proces obróbki przy danej prędkości obrotowej wirnika wygładzarki, będzie przebiegać we względnie stabilnych warunkach. Umożliwia to wybór miejsca strumienia o statystycznie największej energii kinetycznej i potencjale obróbkowym, w którym powinien być zorientowany element obrabiany w celu zapewnienia największej intensywności obróbki.

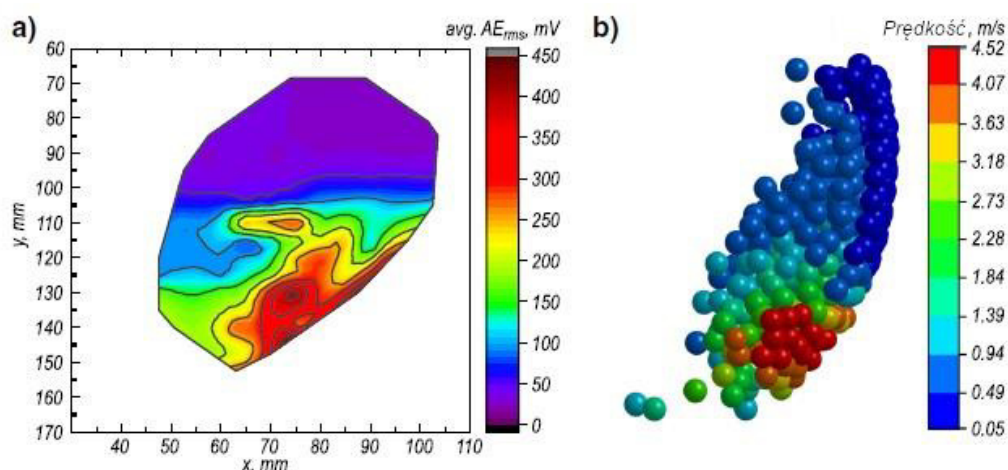
W celu wyznaczenia rozkładu energii wirującego wsadu roboczego w jego przekroju poprzecznym w komorze roboczej wygładzarki EC6, próbkę pomiarową przemieszczano w polu tego przekroju, rejestrując energię oddziaływania na nią wsadu roboczego za pomocą sygnału emisji akustycznej *AE* [45]. Badania przeprowadzono za zastosowaniem 3500 kształtek ściernych ze spoiwem żywicznym, które cechowały się gęstością 1.6 g/cm^3 . Kształtki miały postać piramidek o długości krawędzi 10 mm. Objętość pojedynczej kształtki ścierniej to około 220 mm^3 . Oznaczenie kształtek przez producenta (MARBAD-Polska): T10PP, oznaczenie przez dystrybutora (AVALON-Polska): 02PP10. Na podstawie poszczególnych wartości energii sygnału *AE* zarejestrowanych w określonych punktach pomiarowych, utworzono mapy rozkładu energii wsadu (rys.15).



Rys.15. Rozkład średnich wartości energii sygnału emisji akustycznej (AE_{rms}) w przekroju wsadu dla różnych prędkości obrotowych: a) 150 obr/min, b) 300 obr/min, c) 450 obr/min.[45,46]

Na mapach tych zaznaczono kolorem czerwonym obszary o największym potencjale energetycznym, w których przewiduje się największą efektywność obróbki powierzchniowej. Obszary te charakteryzują się zróżnicowanym kształtem i położeniem przestrzennym, przy czym wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wsadu roboczego, pole ich powierzchni powiększa się i stają się coraz bardziej zróżnicowane. W tych obszarach, orientacja przestrzenna przedmiotów obrabianych powinna być odpowiednio wymuszana za pomocą uchwytów, realizujących ruch ustawczy w układzie współrzędnych promieniowych i osiowych wyłazarki.

Porównanie wyników obliczeń numerycznych i wyników badań doświadczalnych przedstawia rys.16.



Rys.16 Porównanie wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych.:

- a) średnia wartość sygnału emisji akustycznej AE mierzona w przekroju poprzecznym strumienia b) wypadkowa prędkość w przekroju strumienia wsadu określona metodą DEM (prędkość obrotowa wirnika komory roboczej 450 obr/min, czas symulacji 4,69 s) [45,46]

2.4. Narzędzia robocze w postaci kształtek ściernych i polerskich

W masowej obróbce powierzchni ważną rolę pełni wsad roboczy. Wsadem nazywana jest mieszanina kształtek roboczych i płynu wspomagającego obróbkę, które tworzą elementy czynne podczas obróbki powierzchni. Kształtki oprócz podstawowej funkcji narzędzia roboczego, spełniają także funkcje dodatkowe. Do najważniejszych z nich zalicza się [53,33]:

- przekazywanie energii kinetycznej przenoszonej z wirnika komory wygładzarki na obrabiane przedmioty,
- utrzymywanie obrabianych przedmiotów w strukturze aktywnego wsadu roboczego,
- separację obrabianych przedmiotów w celu zapobiegania ich wzajemnych interakcjom,
- spełnianie roli nośnika płynów wspomagających obróbkę.

Istotny wpływ na skuteczność tych czynności, ma rodzaj, wielkość i kształt kształtek roboczych. Przy określonej kinematyce obróbki, przedmioty obrabiane i kształtki robocze mogą wywierać następujące interakcje w procesie obróbki [53,33]:

- przedmioty obrabiane – media ścierne,
- media ścierne – media ścierne,
- media ścierne – ścianki wygładzarki,
- przedmioty obrabiane – ścianki wygładzarki,
- przedmioty obrabiane – przedmioty obrabiane.

Z powyższych form kontaktów wynika, że w zasadzie tylko pierwszy z nich wpływa na proces obróbki przedmiotów. Kolejne generują obicia elementów obrabianych, co wpływa niekorzystnie na gładkość ich powierzchni oraz znacząco zmniejszają żywotność mediów ściernych. Ze względu na ww. interakcje, postępuje ścieranie kształtek w wyniku czego, zmieniają się ich wymiary i masa. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do kształtek ściernych, gdyż na skutek wykruszania się ziaren ściernych zlokalizowanych na ich narożach i krawędziach, obniża się ich właściwości obróbkowe.

Podstawowymi wskaźnikami cech użytkowych kształtek roboczych, mającymi istotny wpływ na efektywność i wyniki obróbki, są wskaźniki zużywalności i skrawalności [53,33].

Zużywalność mediów ściernych, określa się stosunkiem procentowego ubytku masy narzędzi obróbkowych w określonym czasie obróbki, zazwyczaj jednej godziny. Wskaźnik ten wyrażany jest za pomocą następującej zależności:

$$Z = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \cdot 100 [\%/godz.] \quad (3)$$

gdzie: z – zużywalność kształtek, [%/godz], m_0 – masa kształtek poddanych badaniom, m_t – masa suchych kształtek po godzinie pracy w wygładzarce

Wyniki uzyskane w takim badaniu, odnoszą się tylko do określonej wygładzarki, w której było przeprowadzane badanie oraz identycznych parametrów obróbkowych. Nawet niewielka odchyłka w prędkości obrotowej lub ilości dozowanego płynu wspomagającego obróbkę, może mieć znaczący wpływ na zakłócenia wyników badania.

Skrawalność jest oceniana objętością usuniętego materiału z obrabianych przedmiotów w jednostce czasu. Wyraża się ją następującą zależnością:

$$S_k = 10^3 \cdot \frac{m_0 - m_t}{\gamma} [mm^3] \quad (4)$$

gdzie: S – skrawalność [mm^3], m_0 – masa próbek przed obróbką [g], m_t – masa tych samych próbek po obróbce [g], γ – gęstość materiału próbek [g/cm^3]

Skrawalność kształtek ściernych można określać również procentowym uśrednionym ubytkiem masy. W tym wypadku stosuje się poniższy wzór:

$$S_k = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

Skrawalność tak jak i żywotność medium ściernego, określa się tylko w odniesieniu do badanej wygładzarki i określonych parametrów obróbki.

Jako dwa podstawowe typy kształtek roboczych, wyróżnia się kształtki ze spoiwem ceramicznym i kształtki ze spoiwem żywicznym [53,33].

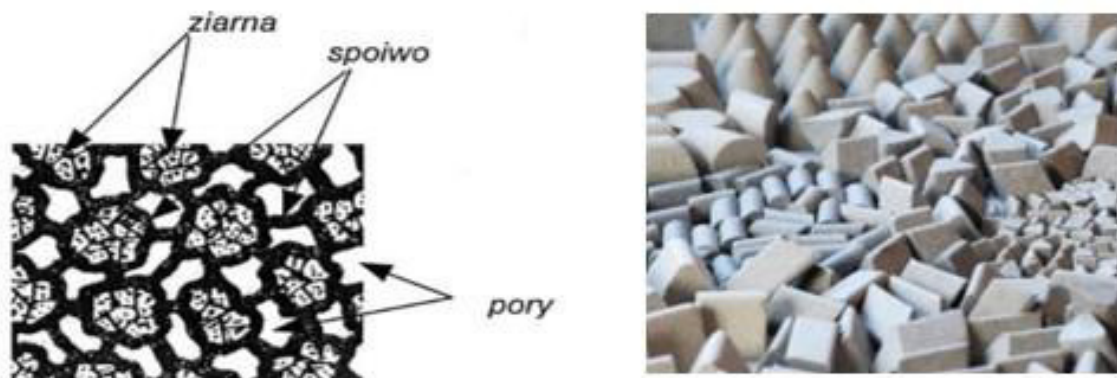
Kształtki ze spoiwem ceramicznym

Kształtki ze spoiwem ceramicznym, zwane kształtkami ceramicznymi, dzieli się na dwa podstawowe rodzaje:

- ceramiczne kształtki ściernie,
- porcelanowe kształtki polerskie.

Kształtki ściernie są przeznaczone do obróbki ubytkowej powierzchni, w której usuwanie nierówności następuje w procesach mikroskrawania i ścierania wierzchołków. Natomiast porcelanowe kształtki polerskie są stosowane w obróbce bezubytkowej, w której wygładzanie powierzchni następuje poprzez odkształcenie plastyczne wierzchołków nierówności [53].

Ceramiczne kształtki ściernie zbudowane są z ziaren ściernych połączonych spoiwem oraz mikro porów, które występują między nimi. W procesie obróbki, ziarna wykonują procesy mikroskrawania powierzchni obrabianego materiału, natomiast w porach gromadzą się cząstki materiału obrabianego i produktów zużycia (rys.17).



Rys.17. Struktura przestrzenna kształtek ściernych a) oraz ich przykładowe kształty b) [33]

W zależności od przeznaczenia, stosuje się kształtki z różną zawartością ziaren ściernych (do 45%), a także ziarna o zróżnicowanej wielkości. Im większe naddatki do usunięcia i im twardszy jest materiał obrabiany, stosuje się wyższą zawartość ziaren ściernych (30-45%) i o większych wymiarach. W pewnych przypadkach, kształtki ceramiczne produkowane są też bez ziaren ściernych i używane są wówczas, jako nośniki proszków lub past wspomagających dodawanych niezależnie [53,33].

W doborze odpowiedniej charakterystyki technicznej kształtek ściernych, jednym z najważniejszych parametrów jest wytrzymałość spoiwa. Wytrzymałość powinna być tak dobrana, aby stępione ziarno skrawające mogło zostać wykruszone. Przedwczesne wykruszenie się ziarna, wpływa na nadmierne zużycie kształtek, natomiast zbyt duża wytrzymałość spoiwa, powoduje najpierw stępienie krawędzi skrawających, a następnie ich wygładzenie, co wpływa na utratę skrawalności. Do oczyszczania powierzchni kształtek, stosuje się odpowiednie płyny wspomagające obróbkę na bazie kwasów, które rozpuszczają spoiwo i dodatkowo obmywają powierzchnie ziaren w celu oczyszczenia krawędzi skrawającej z pozostałości materiału obrabianego [53].

Ceramiczne kształtki ściernie przeznaczone są dla szerokiego zakresu obróbki różnego rodzaju produktów. Zakres zastosowania ceramicznych kształtek ściernych jest bardzo szeroki, zaczynając od obróbki tworzyw sztucznych, do bardziej agresywnej obróbki powierzchniowej metali, np. odlewów, elementów po drukowaniu 3D, po cięciu laserem.

Najczęściej występujące ich kształty to: graniastosłup pochyły, graniastosłup prosty, stożek, elipsa, elipsa pochyła, oraz trójramienna gwiazda pochyła (tristar) (rys.18).



Rys.18. Podstawowe rodzaje brył ceramicznych kształtek ściernych (Rösler)

Porcelanowe kształtki polerskie są stosowane jako podstawowe narzędzia do gładkościowych obróbek wykończeniowych przedmiotów ze stali zwykłych i stopowych oraz stopów metali nieżelaznych. Najczęściej stosowane są z dodaniem specjalnych past polerskich, zawsze na „mokro” z dodatkiem płynów wspomagających obróbkę. Zadaniem tych kształtek jest obróbka końcowa wybłyszczająca powierzchnię. Charakteryzują się one bardzo długą żywotnością (kilka lat). Przed ich zastosowaniem w obróbce pojemnikowej, wymagają wstępnego wygładzania. Kształtki porcelanowe najczęściej produkowane są z modyfikowanej twardej porcelany oraz porcelany krystobalitowej [53] (tab.2).

Tab. 2. Podstawowe rodzaje kształtek porcelanowych[1]

Typ kształtek	Rodzaj porcelany	Gęstość	Barwa
P	Modyfikowana Al_2O_3	3,0 g/cm ³	Śnieżno-biała
PP	Krystobalitowa	2,6 g/cm ³	Biała
G	Cyrkonowa	3,5 g/cm ³	Szara

Kształtki z białej porcelany modyfikowane tlenkiem glinu typu P, stanowią podstawowy uniwersalny rodzaj kształtek polerskich, do obróbki wszystkich gatunków materiałów. Produkowane są o kształcie kulistym, w postaci walców i walców ściętych. Krystobalitowe kształtki polerskie typ PP, przeznaczone są głównie do obróbki tworzyw sztucznych i metali lekkich. Występują one najczęściej w formie graniastosłupów o podstawie trójkąta, walców oraz elipsoid prostych i skośnie ściętych. Ceramiczne kształtki cyrkonowe typu G to specjalna odmiana, którą można stosować zarówno do wstępnej, jak i końcowej

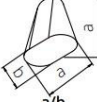
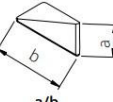
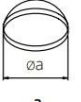
obróbki polerskiej. Ze względu na ich dużą gęstość i masę, możliwe jest usuwanie przez nich większych nierówności powierzchni [53].

Kształtki o spoiwie porcelanowym są produkowane o różnych kształtach i o szerokim zakresie charakterystyk i wymiarów od 3 do 20 mm. Najczęściej stosowanymi kształtami porcelanowymi są różne rozmiary wałków pochyłych oraz kulek (rys.19).



Rys.19. Podstawowe kształty kształtek ceramicznych MARBAD - Polska [30]

Kształtki ze spoiwem żywicznym produkowane są głównie ze spoiwem poliestrowym i spoiwem mocznikowym, służącym do wiązania ziaren ściernych w odpowiednio ukształtowanej bryle. Produkowane są o kilku kształtach i w szerokim zakresie charakterystyk i wymiarów od 10 do 95 mm. Najczęściej stosowane kształty to stożek, piramida, piramida wklęsła i paraboloida [53,33] (rys.20).

K	P	PA	PDZ	DK	QZ	L
						

Rys.20. Podstawowe kształty kształtek żywicznych (Rösler)

Kształtki ściernie żywiczne, są podstawowymi narzędziami obróbkowymi, stosowanymi w pojemnikowej obróbce przedmiotów wykonanych z metali kolorowych i ich stopów, z metali lekkich i ich stopów oraz z tworzyw sztucznych. W szczególnych przypadkach, żywiczne kształtki ściernie można stosować do obróbki przedmiotów ze stali nierdzewnych, kwasoodpornych lub zwykłych niskowęglowych, gdy celem obróbki jest bardzo dobre wygładzenie powierzchni lub uzyskanie wysokiego połysku. Zdolność skrawna żywicznych kształtek ściernych wynosi ok. 60%, w stosunku do wskaźników charakteryzujących ceramiczne kształtki ściernie, przy porównywalnej zużywalności [53,33].

Podstawowe kształty kształtek ze spoiwem żywicznym przedstawia rys.21.



Rys.21. Podstawowe kształty kształtek żywicznych MARBAD – Polska [62]

Do podstawowych zalet kształtek ściernych żywicznych, należy zaliczyć relatywnie niskie wartości sił tarcia o obrabiany materiał (nie występuje rysowanie powierzchni), co umożliwia otrzymywanie wyższej gładkości wynikowej powierzchni obrabianej [53,33].

Kształtki stalowe do polerowania były już stosowane na początku XX wieku. [51,31]. Wówczas dostępne były tylko kulki stalowe. Jeszcze bardzo długo rolę tę pełniły kulki łożyskowe, często z zużytych łożysk tocznych.. Wraz z rozwojem obróbki pojemnikowej, rosło zapotrzebowanie na nowe zakresy zastosowań kształtek stalowych, co wymusiło wprowadzenie ich bardziej zróżnicowanych kształtów [53] (rys.22).



Rys. 22 Kształty stalowych kształtek polerskich [21]

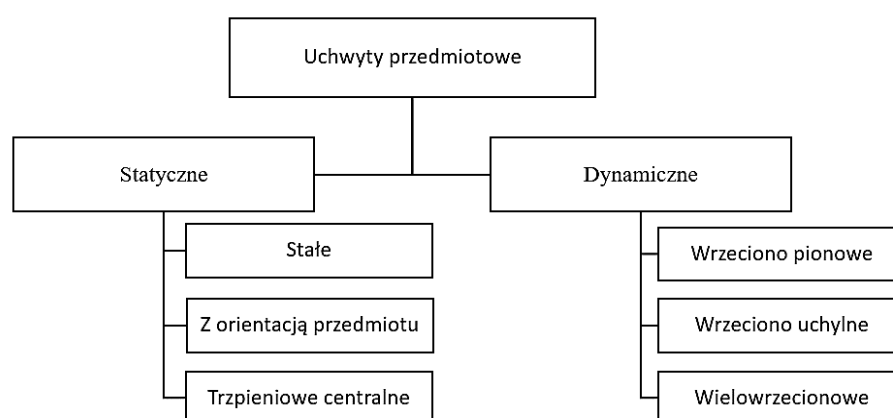
Do produkcji stalowych kształtek do obróbki polerskiej, stosuje się w głównej mierze stale nierdzewne gatunku 304, 316, 420 i 430(AISI). Stosowane są one do obróbek wykończeniowych w polerkach bębnowych, wibracyjnych i rotacyjnych. Zalecane są do lustrzanego polerowania przedmiotów stalowych, srebrnych, a także ze stopów metali kolorowych [53.33].

2.5. Procesy wygładzania pojemnikowego z zastosowaniem pasywnych i aktywnych uchwytów przedmiotowych

Jak przedstawiono powyżej, w standardowych rotacyjnych wygładzarkach pojemnikowych, proces obróbki jest realizowany ze swobodną orientacją przedmiotów obrabianych w strumieniu wirującego wsadu roboczego, złożonego z kształtek ściernych. Proces ten jest długotrwały i słabo sterowalny, ponieważ chwilowa wielkość energii wsadu roboczego jest lokalnie zmienna, gdyż jej rozkład jest zróżnicowany zarówno kierunku wzdłużnym, jak i poprzecznym. Zmiany te są spowodowane złożonym ruchem rotacyjnym i wirowym kształtek ściernych w strumieniu wsadu.

Mając na uwadze powyższe, od pewnego czasu poszukuje się możliwości zwiększenia efektywności obróbki w rotacyjnych wygładzarkach pojemnikowych, poprzez mocowanie i orientację obrabianych przedmiotów w uchwytach. Ze względu na realizowane funkcje, wyróżnia się uchwyty pasywne i aktywne. Uchwyty pasywne umożliwiają separację oraz określone położenie i orientację przedmiotów we wsadzie roboczym, lub centralną orientację w zbiorniku wygładzarki (wygładzanie felg). Natomiast uchwyty aktywne umożliwiają nadanie obrabianym przedmiotom pomocniczego ruchu obrotowego, co zapewnia wzrost efektywności obróbki i obniżenie chropowatości obrabianej powierzchni [53] (rys.23).

Jak wykazują wyniki badań [53,29,30,31,25,50,1,2], szczególne korzyści może



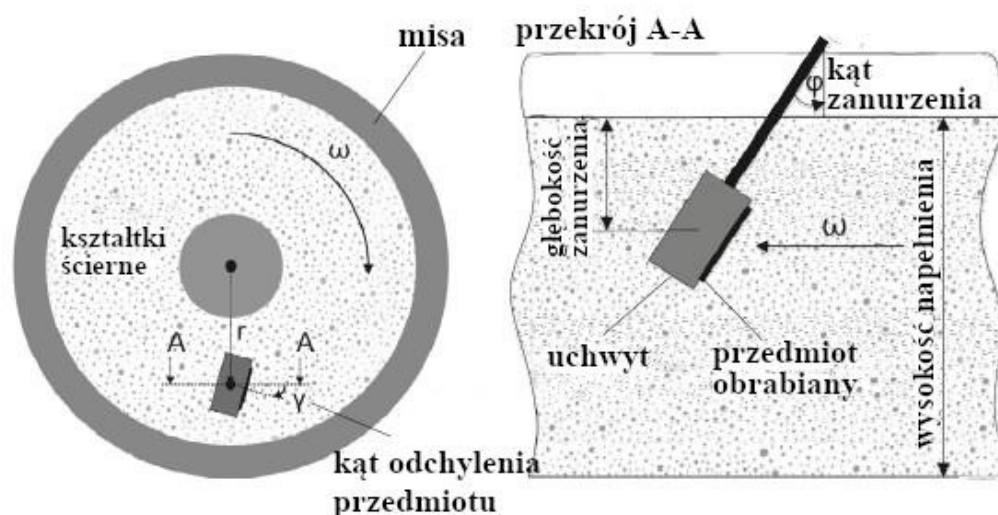
Rys.23. Podział podstawowych rodzajów uchwytów przedmiotowych stosowanych w wygładzarkach pojemnikowych (opracowanie własne)

zapewniać obróbkę w uchwytach, które umożliwiają indywidualizację procesów wygładzania przedmiotów o zróżnicowanych kształtach i gabarytach. Zamocowane i odpowiednio zorientowane przedmioty, mogą także otrzymywać dodatkowy ruch obrotowy i mogą być oddzielane od innych, co zabezpiecza przed ich wzajemnym uszkodzaniem. Ten rodzaj obróbki zapewnia również zwiększenie jej efektywności i powtarzalności jakości powierzchni obrabianej.

2.5.1. Obróbka z zastosowaniem pasywnych uchwytów przedmiotowych

Podstawową funkcją pasywnych uchwytów przedmiotowych, jest określone orientowanie zamocowanego w uchwycie przedmiotu obrabianego we wsadzie roboczym, pozwalające na ciągłe przekazywanie energii kształtek ściernych na określonej jego powierzchni, co prowadzi do zwiększenia efektywności obróbki. Może to być szczególnie korzystne, jeśli umiejscowienie przedmiotu nastąpi w obszarze największego poziomu energetycznego wsadu roboczego [22,43]. Badania procesów obróbki realizowanej z zastosowaniem uchwytów pasywnych mają przede wszystkim na celu określenie, w jaki sposób wpływa przestrzenna orientacja przedmiotu w strefie wysokiego poziomu energetycznego wsadu roboczego, na intensywność i kształtowanie struktury powierzchniowej obrabianych elementów. W tego typu procesach, ślady obróbkowe kształtujące topografię obrabianej powierzchni, są wynikiem chwilowych kontaktów kształtek, wykonujących złożony rotacyjny skumulowany z ruchem wirowym w strukturze wsadu roboczego.

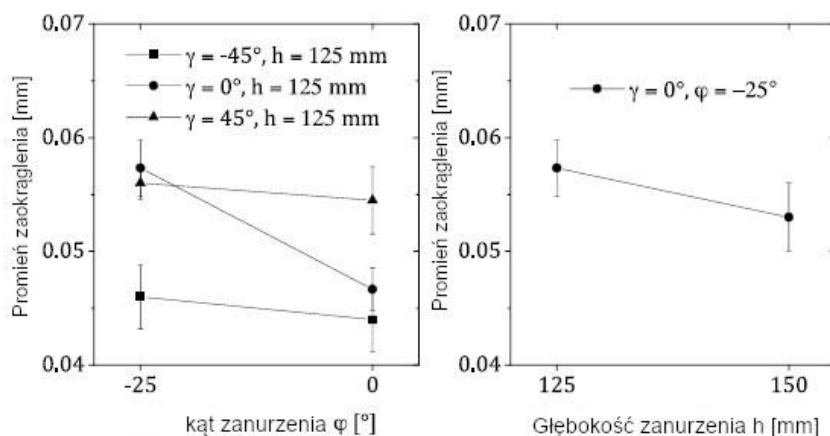
W tym zakresie prowadzone były badania wpływu kąta orientacji i pochylenia przedmiotu obrabianego na kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni obrabianej ceramicznymi kształtkami ściernymi[52] (rys.24).



Rys.24. Sposób przestrzennej orientacji przedmiotu obrabianego w komorze strumieniowej wygładzarki pojemnikowej[52]

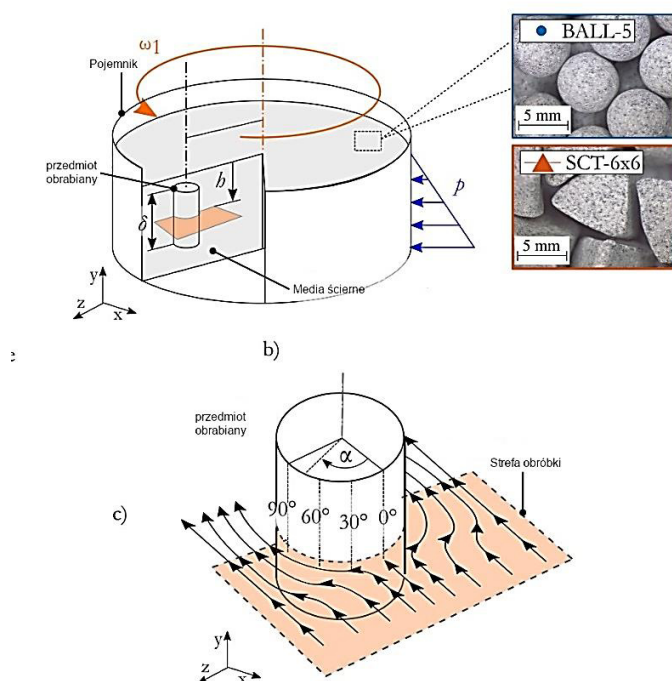
W celu ustalenia odpowiedniej orientacji kątowej φ oraz wysokości zanurzenia przedmiotu obrabianego h prowadzone były badania, na podstawie których został określony ich wpływ na wielkość promienia zaokrąglenia krawędzi (rys.25).

Jak wynika z powyższych zależności, zarówno kąt pochylenia jak i kąt obrotu przedmiotu komorze wygładzarki strumieniowej, ma znaczący wpływ na efekty obróbki.



Rys.25. Porównanie strzałek ugięcia H próbek ALMEN po 16 min. czasu wygładzania w funkcji od kąta pochylenia φ i położenia wysokościowego h badanych próbek ze stali 1.7225 [52]

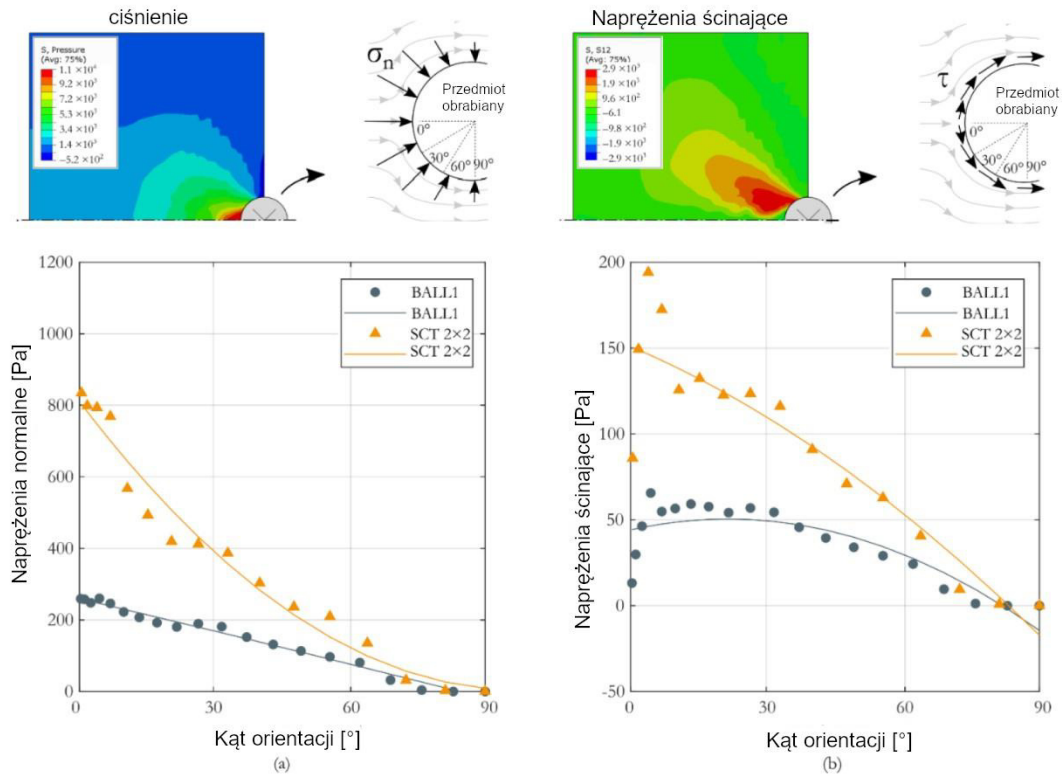
Prowadzone były również badania nad wpływem oddziaływania kształtek ściernych o różnym kształcie na przedmiot w formie walca, zamocowany w uchwycie pasywnym w rotacyjnej wygładzarce pojemnikowej [46,29,32] (rys.26).



Rys.26. Proces rotacyjnego wygładzania pojemnikowego: a) układ kinematyczny procesu obróbki (prędkość obrotowa ω , głębokość zanurzenia h , wysokość części δ , ciśnienie hydrostatyczne p , b) przepływ wsadu roboczego względem walcowej powierzchni elementu obrabianego [46]

Na podstawie badań modelowych [46], wyznaczono wielkości naprężenia normalnego σ_n i naprężenia ścinającego τ , na walcowej powierzchni obrabianego przedmiotu, wywołane

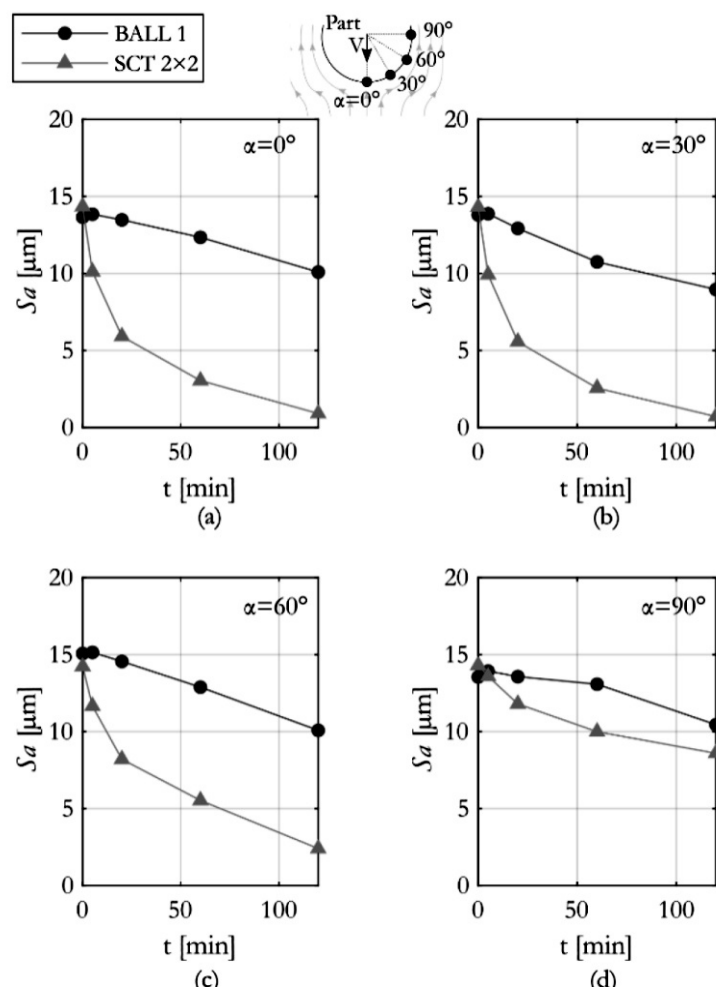
kształtkami o kształcie kulistym i stożkowym oraz ich zmiany w odniesieniu do położenia obrabianego fragmentu (rys.27).



Rys. 27. Wartości naprężeń normalnych i naprężeń stycznych w zależności od kąta orientacji strefy obróbki dla kształtek ściernych w kształcie kulistym i stożkowym [6]

Ze względu na zmienność wartości naprężeń normalnych i stycznych wzdłuż powierzchni przedmiotu obrabianego, sposób kształtowania chropowatości powierzchni w każdym obszarze, również będzie się różnić. W eksperymentalnym teście zaobserwowano zróżnicowaną transformację chropowatości dla każdego kąta orientacji powierzchni α w przypadku kształtek stożkowych [32].

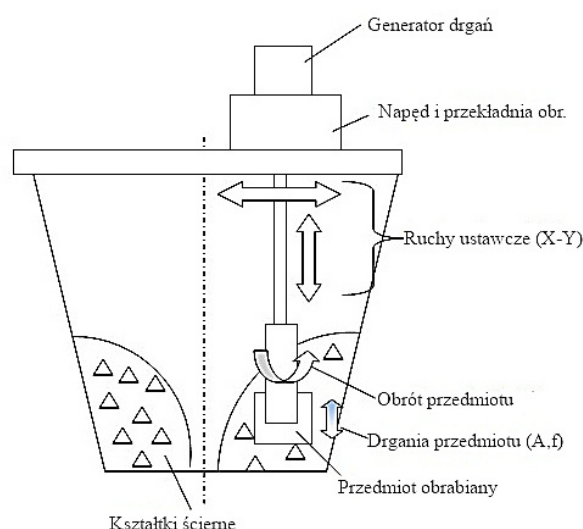
Na rys.28 przedstawiono zmiany wartości parametru chropowatości S_a w czterech fragmentach obrabianej powierzchni, położonych pod różnym kątem α w funkcji czasu obróbki.



Rys.28. Zmiany wartości parametru chropowatości powierzchni obrabianej S_a w zależności od kąta orientacji α strefy obróbki powierzchni i rodzaju kształtek ściernych [32]

Można zaobserwować, że redukcja wartości parametru S_a jest bardziej intensywna w odniesieniu do kształtek stożkowych, niż w odniesieniu do kształtek kulistych. Na przykład dla kąta orientacji miejsca pomiaru $\alpha=0$ po 120 min obróbki, redukcja wartości parametru S_a dla kształtek stożkowych i kulistych wynosi odpowiednio 93% i 26%. Redukcja wartości parametru S_a jest większa przy kącie $\alpha=0$, niż przy $\alpha=90$, w przypadku kształtek stożkowych odpowiednio 93% i 40%. Jednak ewolucja chropowatości charakteryzowana wartościami parametru S_a , jest zbliżona dla całej zmienności kątów i mieści się w przedziale 23–35%. Jeśli chodzi o zmierzone wartości siły kontaktu F_y , to kształtki stożkowe generują wyższy jej poziom, w porównaniu do kształtek kulistych (odpowiednio 71 N i 37 N). Należy jednak zauważyć, że na zmiany chropowatości powierzchni w przypadku kształtek kulistych, nie ma silnego wpływu kąt orientacji powierzchni. Przy $\alpha=30$, redukcja S_a w czasie $t=120$ min jest nieco wyższa, niż dla innych kątów. To koreluje z największą wartością naprężenia stycznego, obliczoną numerycznie przy tym samym kącie orientacji [32].

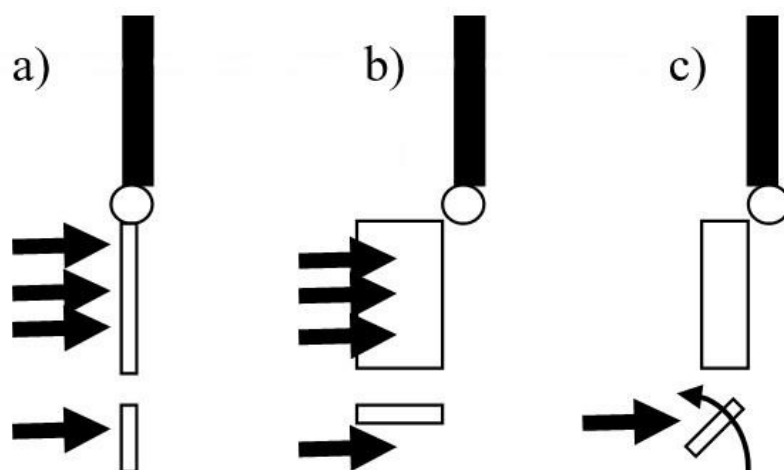
Prace w takim zakresie są prowadzone także w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej, z zastosowaniem uchwytu przedmiotowego zapewniającego określoną orientację przedmiotu obrabianego we wsadzie roboczym [38]. Ich istotą jest określenie wpływu położenia przedmiotu obrabianego na wydajność obróbki oraz chropowatość powierzchni obrabianych. Badania przeprowadzono na rotacyjno - kaskadowej wygładzarce pojemnikowej EC6. Zastosowano próbki o kształcie płasko-równoległym wykonane ze stopu aluminium PA11, mocowane w uchwycie stacjonarnym o 3-stopniach swobody. Uchwyt ten umożliwia orientację kątową przedmiotu względem kierunku ruchu obrotowego kształtek roboczych w układzie wertykalnym α i jego pochylenie kątowe w układzie horyzontalnym β . Możliwe jest również jednoczesne połączenie tych dwóch układów $\alpha+\beta$. Takie rozwiązanie konstrukcyjne uchwytu, umożliwia przemieszczanie przedmiotu obrabianego w przekroju osiowym wsadu roboczego, pozwalając go umieścić w obszarze największej energii oraz nadać mu 2-osiową orientację kątową [41] (rys.29).



Rys.29. Uchwyt umożliwiający wysokościową i kątową orientację przedmiotu obrabianego w przestrzeni wsadu roboczego wygładzarki EC6 [19]

Przeprowadzone badania obejmowały trzy podstawowe warianty orientacji przedmiotu obrabianego względem kierunku ruchu kształtek roboczych (rys.30):

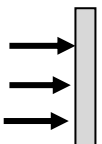
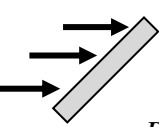
- prostopadłą orientację badanej powierzchni przedmiotu względem kierunku ruchu kształtek roboczych a),
- równoległą orientację badanej powierzchni przedmiotu względem kierunku ruchu kształtek roboczych b),
- skretną orientację badanej powierzchni przedmiotu względem kierunku ruchu kształtek roboczych c).



Rys.30. Sposoby orientacji powierzchni obrabianego przedmiotu w układzie wertykalnym

W poniższych tabelach przedstawiono dominujące zjawiska występujące w poszczególnych przypadkach orientacji przedmiotu obrabianego względem kierunku ruchu kształtek roboczych [41]

Tab.3. Dominujące zjawiska występujące podczas obróbki z prostopadłą orientacją obrabianej powierzchni względem kierunku ruchu kształtek(a)

	$Ra=1,15\mu m$ $Rt=10,8\mu m$ $RSm=0,159mm$	Duża ilość kraterów (zagłębień) o znacznym zagęszczeniu powierzchniowym i zróżnicowanej głębokości. Relatywnie liczba rys będących efektem procesu mikroskrawania. Struktura powierzchni o dużym stopniu izotropowości. Relatywnie wysoka chropowatość powierzchni.
	$Ra=0,76\mu m$ $Rt=10,95\mu m$ $RSm=0,121mm$	Zwiększająca się liczba kraterów, wzrost liczby mikroskrawnień i zarysowań. Postępujące wygładzanie powierzchni. Wzrastający stopień anizotropowości powierzchni. Obniżenie chropowatości powierzchni.
	$Ra=0,54\mu m$ $Rt=7,57\mu m$ $RSm=0,097mm$	Duża liczba rys będących efektem mikroskrawnień oraz wiele śladów będących wynikiem bruzdowania, tarcia i obtaczania kształtek. Wzrost stopnia anizotropowości powierzchni. Wyraźne wygładzenie oraz spadek chropowatości i wygładzenie powierzchni.

Tab.4. Dominujące zjawiska występujące podczas obróbki równoległą orientacją obrabianej powierzchni względem kierunku ruchu kształtek (b)

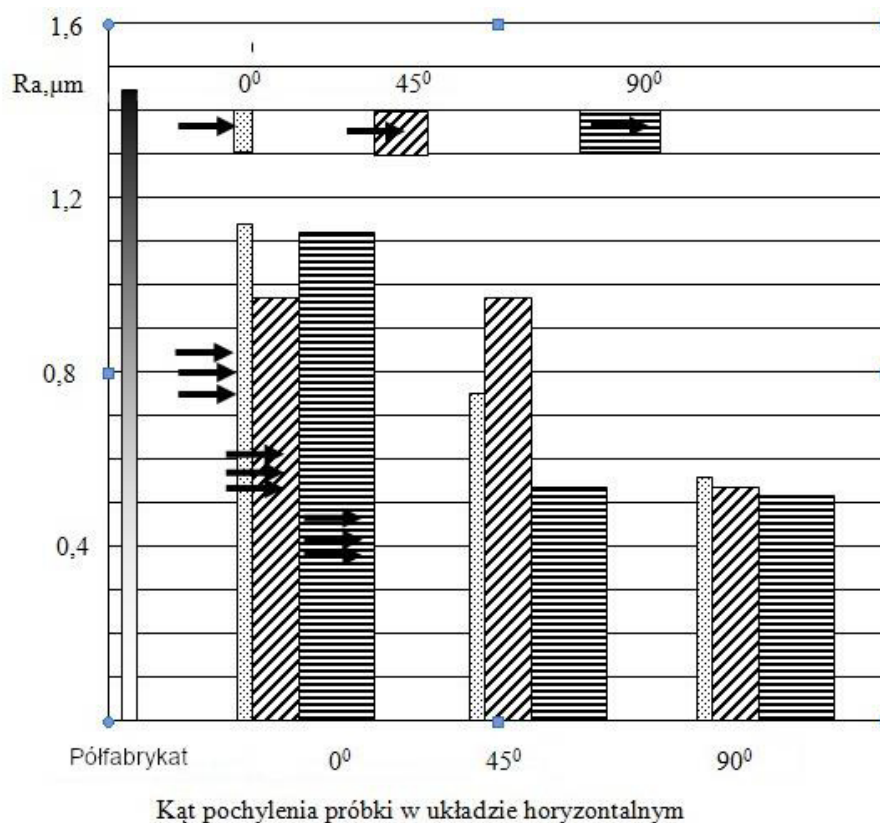
	$Ra=1,15\mu m$ $Rt=10,8\mu m$ $RSm=0,159mm$	Duża liczba zarysowań i śladów mikroskrawnień o znacznym zagęszczeniu powierzchniowym i zróżnicowanej głębokości. Relatywnie mała liczba kraterów i zagłębień. Struktura powierzchni o dużym stopniu anizotropowości. Relatywnie wysoka chropowatość powierzchni.
	$Ra= 0,76\mu m$ $Rt= 10,95\mu m$ $RSm=0,121mm$	Zmniejszająca się liczba kraterów, wzrost liczby mikroskrawnień i zarysowań. Znaczące wygładzanie powierzchni. Wzrost stopnia anizotropowości powierzchni. Lekkie ukierunkowanie struktury.
	$Ra= 0,54\mu m$ $Rt= 7,57\mu m$ $RSm=0,097mm$	Zmniejszająca się liczba kraterów, wzrost liczby mikroskrawnień i zarysowań. Postępujące dalsze wygładzanie powierzchni. Wzrost stopnia anizotropowości powierzchni. Wyraźne ukierunkowanie struktury

Tab.5. Dominujące zjawiska występujące podczas obróbki ze skretną orientacją obrabianej powierzchni względem kierunku ruchu kształtek (c)

	$Ra=1,15\mu m$ $Rt=10,8\mu m$ $RSm=0,159mm$	Relatywnie duża liczba kraterów i zagłębień o znacznym zagęszczeniu powierzchniowym i zróżnicowanej głębokości. Relatywnie mała liczba rys będących efektem procesu mikroskrawiania. Struktura powierzchni o dużym stopniu izotropowości. Wysoka chropowatość powierzchni.
	$Ra= 0,76\mu m$ $Rt= 10,95\mu m$ $RSm=0,121mm$	Zmniejszająca się liczba kraterów, wzrost liczby mikroskrawnień i zarysowań. Postępujące wygładzanie powierzchni. Wzrasta stopień anizotropowości powierzchni. Chropowatość powierzchni ulega minimalnemu obniżeniu.
	$Ra= 0,54\mu m$ $Rt= 7,57\mu m$ $RSm=0,097mm$	Duża liczby rys będących efektem mikroskrawnień oraz wiele śladów będących wynikiem tarcia i obtaczania kształtek. Wzrost stopnia anizotropowości powierzchni i ukierunkowanie struktury. Wyraźne wygładzenie powierzchni.

Na podstawie tych analiz można wnioskować, że zastosowanie odmiennej orientacji przedmiotu obrabianego podczas obróbki w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce

pojemnikowej, ma znaczący wpływ na mechanizmy kształtowania struktury geometrycznej obrabianej powierzchni. Wynika to z kierunku oddziaływania na nią kształtek ściernych i związanych z tym udziałem poszczególnych zjawisk elementarnych występujących w tym procesie. I tak, w przypadku działania kształtkami ściernymi w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni, głównym mechanizmem kształtowania jej struktury chropowatości są lokalne kratery, będące wynikiem punktowych kontaktów wierzchołków kształtek ściernych. Struktura takich powierzchni charakteryzuje się dużą izotropowością, ale też relatywnie najwyższym poziomem chropowatości. Natomiast w przypadku ruchu kształtek ściernych w kierunku równoległym do powierzchni obrabianej, zaczynają dominować ukierunkowane ślady obróbki, będące wynikiem mikroskrawania i bruzdowania, co zapewnia najniższą chropowatość powierzchni dla wszystkich badanych położeń kątowych w układzie horyzontalnym. Występujące ukierunkowanie powierzchni, charakteryzuje się pewnym stopniem losowości, co podwyższa stopień izotropowości powierzchni. Bardziej złożony jest natomiast mechanizm kształtowania SGP w układzie mieszanym, w którym przedmiot przyjmując takie same położenia, jak w dwóch poprzednich układach i jest jeszcze dodatkowo obrocony o kąt 45° . W tym przypadku prawdopodobnie zachodzi korzystna kumulacja ruchu wirowego kształtek i ruchu rotacyjnego. W tym przypadku, wraz ze wzrostem kąta pochylenia chropowatość powierzchni obniża się z najmniejszą intensywnością [41] (rys.31).



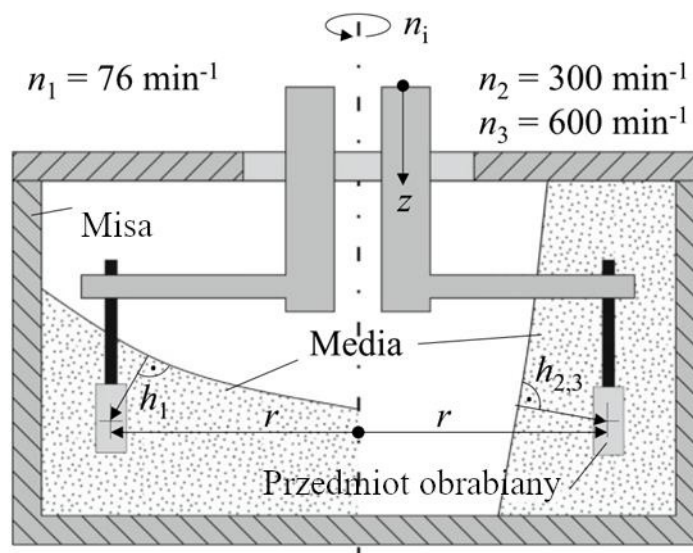
Rys.31. Wpływ kąta pochylenia próbki w układzie horyzontalnym i kąta jej obrotu względem osi, na kształtowanie wartości parametru chropowatości powierzchni Ra w procesie wygładzania [41]

2.5.2. Obróbka z zastosowaniem aktywnych uchwytów przedmiotowych

Badania procesów rotacyjnego wygładzania z zastosowaniem uchwytów aktywnych, umożliwiają przede wszystkim określenie, w jaki sposób wpływają dodatkowe ruchy obrotowe przedmiotu w strefie wysokiego poziomu energetycznego wsadu roboczego, na intensywność i jakość obróbki powierzchniowej. W tych procesach badań, wykorzystywana jest sumaryczna energia wirujących kształtek roboczych i ruchów przedmiotów o określonych kierunkach. Natomiast ślady obróbkowe są wynikiem chwilowych kontaktów kształtek, wykonujących złożony rotacyjny połączony z ruchem wirowym we wsadzie roboczym i określonych ruchów wykonywanych przez uchwyt aktywny.

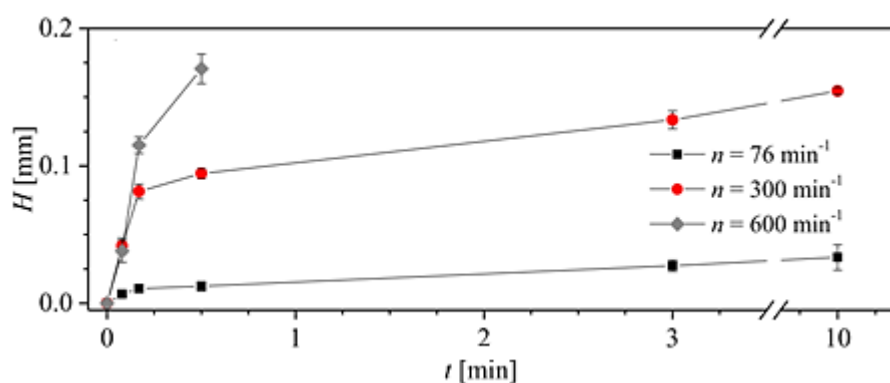
W pracy [31,38] przedstawiono eksperymentalne i symulacyjne analizy procesów obróbki powierzchniowej w wygładzarce strumieniowej z zastosowaniem uchwytu obrotowego, mające na celu określenie wpływu prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego n i wielkości jego zanurzenia we wsadzie roboczym h , na wielkość siły oddziaływania granulatu ściernych oraz chropowatość powierzchni obrabianych. Zastosowano próbkę walcową hartowaną ze stali AISI 4140 (stal EN 1,7225). Do pomiaru wielkości siły

oddziaływania granulatów ściernych na powierzchnię obrabianą zastosowano piezoelektryczny czujnik siły FlexiForce A201[31].- (rys.32).



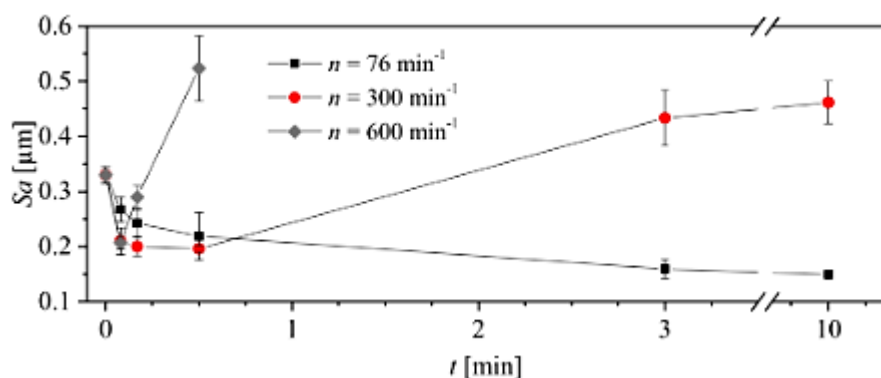
Rys.32. Schemat komory roboczej wyglazarki strumieniowej wyposażonej w obrotowy uchwyt przedmiotu [31]

Uchwyt umożliwiał nadawanie ruchu obrotowego przedmiotowi obrabianemu oraz zmianę jego położenia wysokościowego. Przy zmianie poziomu zanurzenia przedmiotu obrabianego h , otrzymywano zróżnicowane siły oddziaływania wsadu roboczego na powierzchnię obrabianą. Skutki oddziaływania tych sił oceniano za pomocą pomiarów strzałki ugięcia H próbki mierzonej w systemie pomiarowym ALMEN [38] co przedstawia rys.33.



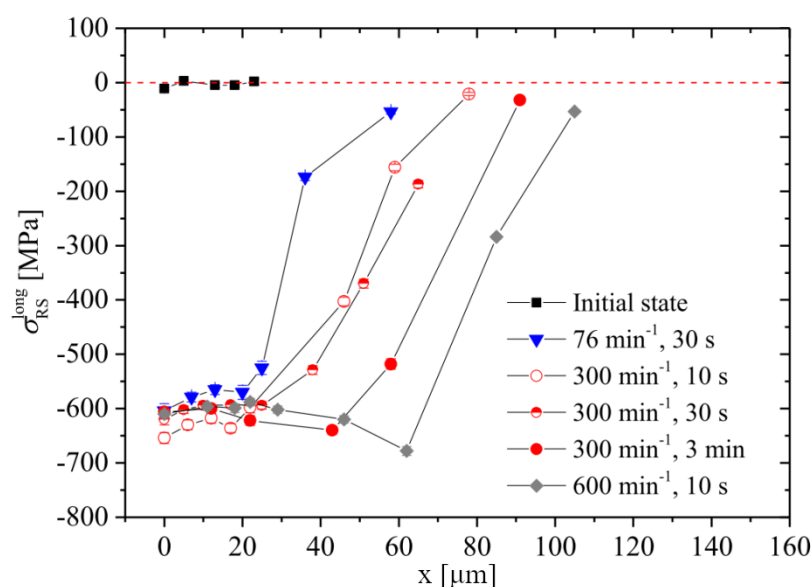
Rys.33. Wykres zmian wartości strzałki ugięcia próbki ALMEN H w funkcji prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego n i czasu obróbki t [31]

Wyniki tych badań korelowano z kształtowaną strukturą geometryczną obrabianych powierzchni z zastosowaniem parametru S_a (rys.34).



Rys.34. Zmiany wartości parametru chropowatości powierzchni Sa w funkcji prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego n i czasu obróbki t [31]

Jest to innowacyjne podejście do opisu procesu strumieniowej obróbki pojemnikowej, wykazujące korelację między parametrami procesu, lokalnymi warunkami kontaktu i chropowatością powierzchni obrabianej powierzchni. Wyniki tych badań zostały dodatkowo uzupełnione o stan naprężeń ściskających, powstałych na powierzchni obrabianej



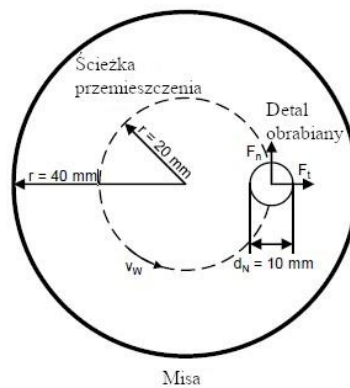
Rys. 35. Rozkład naprężeń ściskających na powierzchni obrabianej δ w funkcji prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego n [31]
w zależności od parametrów obróbki (rys.35).

Interesujący przykład aktywnego uchwytu przedmiotowego z dodatkowym ruchem obrotowym, został przedstawiony w artykule [54], w którym wykorzystano ramię robota spełniające funkcje aktywnego uchwytu przedmiotowego. To rozwiązanie stwarzało możliwość przemieszczania i orientacji przedmiotu obrabianego w całej przestrzeni wsadu roboczego w strumieniowej wyłazdarce pojemnikowej podczas trwania procesu obróbki, łącznie z możliwością nadawania ruchu obrotowego przedmiotowi obrabianemu (rys.36).



Rys.36. Realizacja procesu obróbki w wygładzarce strumieniowej z zastosowaniem robota przemysłowego pełniącego funkcję uchwytu przedmiotowego [54]

Na rys.37 został przedstawiony tor ruchu, po którym robot prowadził przedmiot obrabiany w komorze roboczej wygładzarki.



Rys.37. Tor ruchu planetarnego przedmiotu obrabianego w komorze roboczej wygładzarki wibracyjnej realizowany przez robot przemysłowy [42]

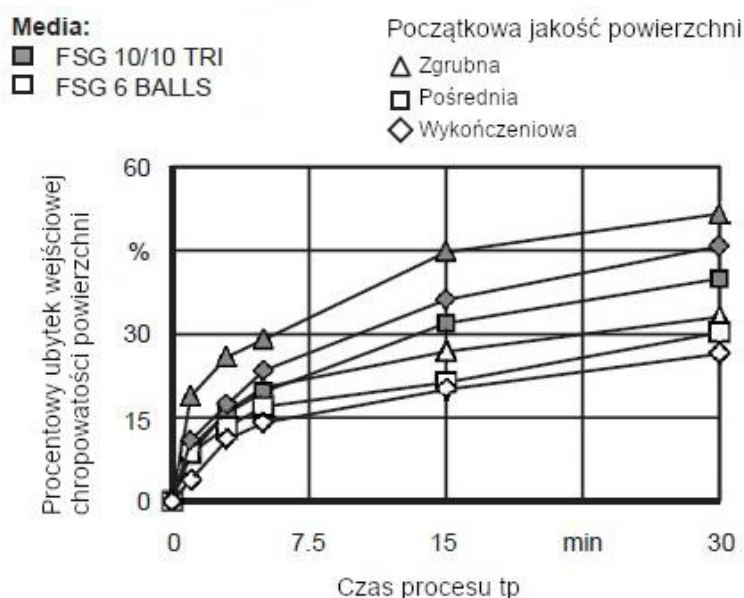
Parametry i warunki realizowanego procesu obróbki przedstawiono w tab.6.

Tab.6. Parametry i warunki procesu badań

Parametr	Wartość
Wyjściowa chropowatość powierzchni Rz_i	$Rz = 7,9; 15,7; 26,7 \mu m$ (wykończeniowa, średnia, zgrubna)
Częstotliwość ruchu wibracyjnego komory roboczej	$F = 0; 30; 50 \text{ Hz}$
Prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego	$n = 0; 10; 30 \text{ m/min}$

Czas obróbki	$t=1; 3; 5; 15; 30$ min
Kształtki ściernie	Walther Trowal FSG 6 BALL Walther Trowal FSG 10x10 TRI

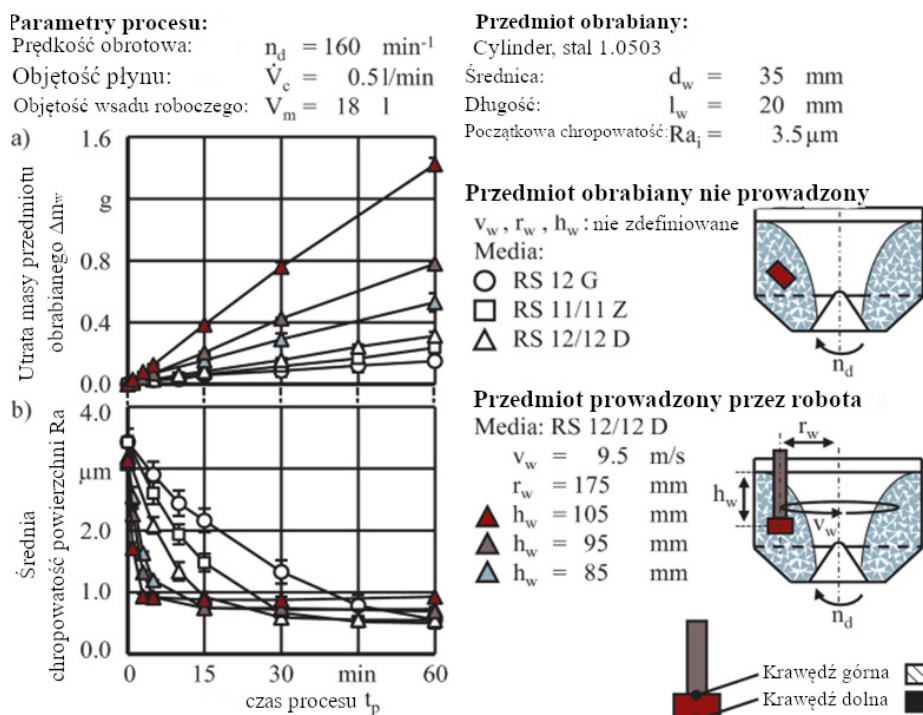
Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem dwóch rodzajów kształtek ściernych, tj. kształtek ze spoiwem ceramicznym o formie kulistej o średnicy 6mm oraz kształtek o formie cylindrycznej o trójkątnej podstawie. Wyniki z badań zostały zaprezentowane na poniższym wykresie (rys.38).



Rys.38. Zmiany wartości parametru chropowatości powierzchni obrabianej R_z , w zależności od rodzaju zastosowanych kształtek oraz czasu obróbki [42]

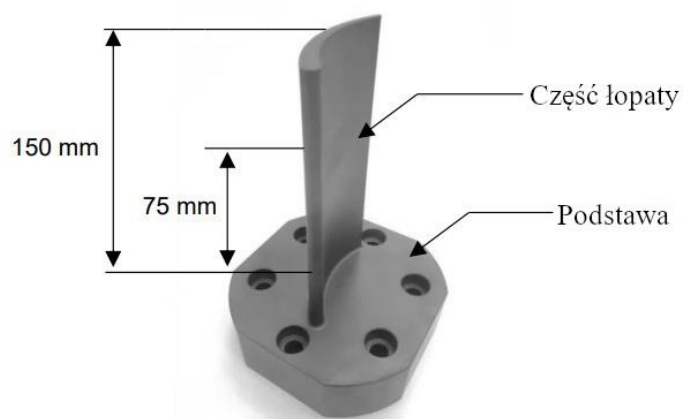
Wykazano, że przy tego rodzaju kinematyce obróbki, znacząco lepsze wyniki zapewniają kształtki graniastosłupowe, szczególnie w przypadku dużych wartości chropowatości powierzchni wyjściowej. Proces wygładzania z zastosowaniem ramienia robota, zapewnia dużą elastyczność kinematyczną w odniesieniu do zmian kąta natarcia, trajektorii i głębokości zanurzenia obrabianego przedmiotu. Dzięki pięciu sterowalnym osiom robota, ten sposób obróbki, może być stosowany do obróbki przedmiotów określonych kształtach.

Ci sami autorzy późniejszym okresie czasu, przedstawili publikację przedstawiającą badania porównawcze procesu wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, dotyczące obróbki swobodnej i z zastosowaniem uchwytu przedmiotowego z uwzględnieniem różnych rodzajów kształtek roboczych [19] (rys.39).



Rys.39. Wpływ rodzaju kształtek ściernych na ubytek masy przedmiotu obrabianego Δm_w oraz chropowatości powierzchni obrabianej Ra w funkcji czasu obróbki [19]

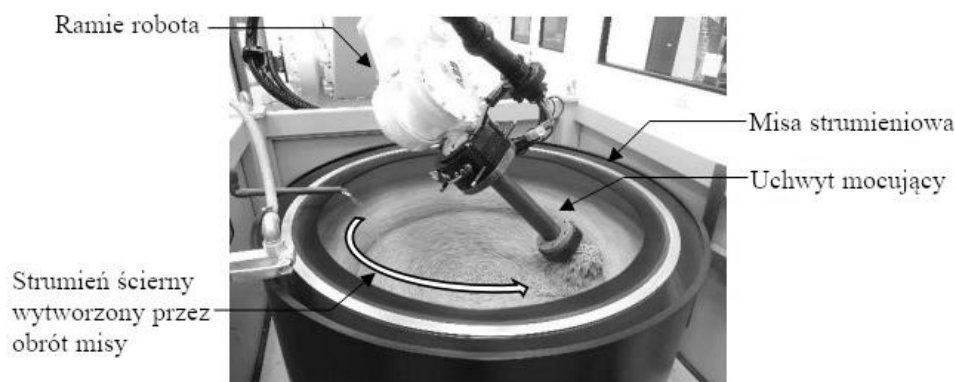
Podobne rozwiązanie zostało opisane publikacji [48], przedstawionej na Międzynarodowym Sympozjum Zaawansowanych Technik Obróbki Ściernej w 2019 roku. W opisywanym przypadku, ramię robota wprowadza obrabiany przedmiot do wirującej komory wygładzarki strumieniowej wypełnionej kształtkami ściernymi. Testy przeprowadzono na elementach w kształcie łopatki turbiny ukształtowanych metodą przyrostową DMLS (direct melting laser sintering) (rys.40).



Rys.40. Widok łopatki turbiny ukształtowanej metodą DMLS [48]

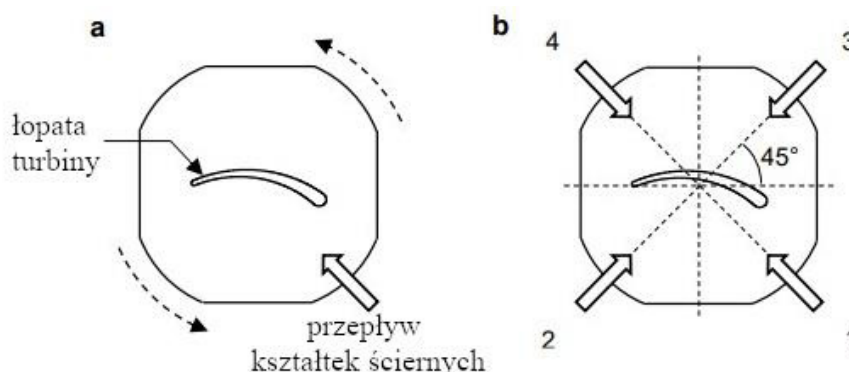
Wydrukowany element został zamocowany do ramienia robota, który zanurzał go w wirującej komorze roboczej wygładzarki do obróbki strumieniowej (rys.41), wykonującej

ruch obrotowy z prędkością 50 obr/min. Przedmiot obrabiany był prowadzony po kilku różnych trajektoriach ruchu przez 80 min, a następnie mierzono ubytek materiału.



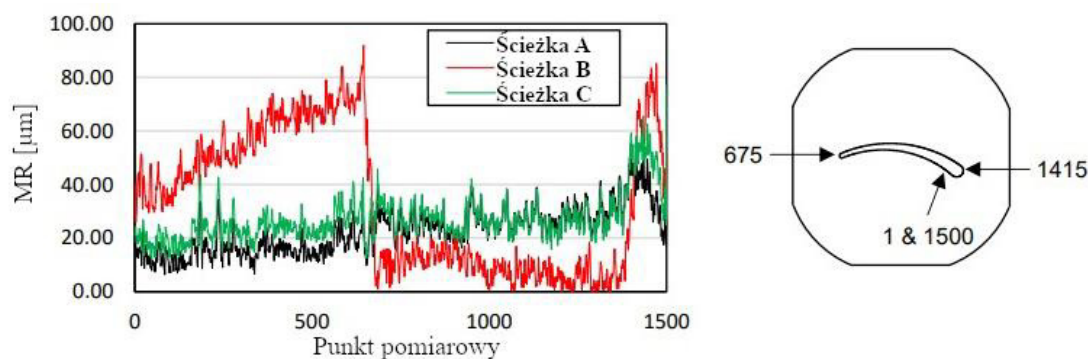
Rys.41. Widok zrobotyzowanego stanowiska obróbkowego na wygładzarce do obróbki strumieniowej [48]

Badania wydajności obróbki MR (material removal) przeprowadzono dla przypadku przedmiotu wykonującego ciągły ruch obrotowy podczas obróbki oraz dla przedmiotu znajdującego się w czterech położeniach kątowych.



Rys.42. Wykonywane ruchy narzędzia podczas realizowanych badań: a) ruch obrotowy 360° (ścieżka narzędzia A), b) cztery stałe orientacje (ścieżka narzędzia B) [48]

Wyniki badań wydajności obróbki MR przedstawione na rys.43. W ruchu obrotowym (ścieżka narzędzia A) większa wydajność obróbki występuje na stronie wypukłej, w odniesieniu do strony wklęsłej zarysu łopatki. Uważa się, że ta różnica jest spowodowana większą prędkością przepływu kształtek roboczych. Z kolei przy stałych orientacjach (ścieżka narzędzia B), strona wklęsła łopatki była wygładzana szybciej, niż strona wypukła. Aby poprawić jednorodność MR na ścieżce narzędzia A, zastosowano dodatkową obróbkę B przez 40 min (ścieżka narzędzia C). W tym przypadku, wartość wskaźnika MR była zwiększona tylko po stronie wklęsłej i utrzymana po stronie wypukłej.



Rys.43. Rozkłady wydajności obróbki MR w różnych wariantach procesu wygładzania [48]

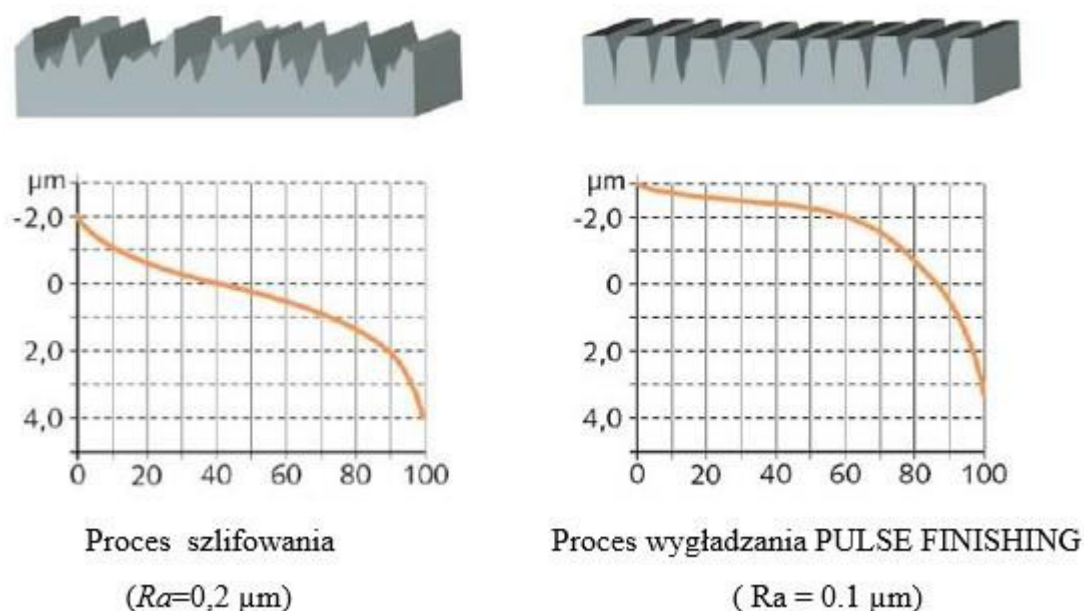
Przeprowadzone badania wykazały, że stosując różne sposoby przemieszczania przedmiotu w strefie wsadu roboczego, uzyskuje się zróżnicowany rozkład ubytku materiału. Dzięki odpowiedniemu ich połączeniu, można uzyskać większą jednorodność ubytku materiałowego.

Innym rodzajem zastosowanego uchwytu aktywnego, jest uchwyt obrotowy zwany PULSE FINISHING produkowany przez firmę OTEC. Rozwiązanie to opiera się na precyzyjnie określonym i szybko zmieniającym się ruchu względnym pomiędzy kształtkami roboczymi a obrabianym przedmiotem w wyniku zmiany kierunku jego obrotów. Ten opatentowany napęd impulsowy, został opracowany specjalnie z myślą o wymaganiach wielkoseryjnej produkcji sektora motoryzacyjnego i nowoczesnego przemysłu narzędziowego.. Na przykład możliwe jest gratowanie, zaokrąglanie i wygładzanie powierzchni od poziomu chropowatości Rpk 0,2 µm do Rpk 0,1 µm w czasie krótszym, niż 1 min. i w jednym etapie obróbki. Uchwyt ten wprowadza przedmiot obrabiany do wirującej komory roboczej wygładzarki pojemnikowej z kształtkami ściernymi i rozpędzana do 2000 obrotów w ciągu 0,5 s, a następnie zmienia kierunek obrotów na przeciwny (rys.44).



Rys.44. Widok wygładzarki do obróbki strumieniowej z zainstalowanym aktywnym uchwytem PULSE FINISHING a) i wykres dynamicznych zmian obrotów wrzeciona przedmiotowego b)

Proces ten generuje przyspieszenia sięgające 30m/s oraz siłę oddziaływującą na obrabiany przedmiot do 40G. Efektywność procesu została przebadana w procesie wygładzania powierzchni kół zębatach. Na przykład w przypadku wałków rozrządu, obróbka impulsowa również zmniejsza o połowę wartości Ra i wartości Rpk . Wyniki testów zobrazowane zostały na rys.45.



Rys.45. Rozkłady materiałowe i profile chropowatości powierzchni obrabianych:
a) metodą szlifowania, b) metodą wygładzania PULSE FINISHING

Przedstawione dane wskazują, że w przypadku zastosowania technologii PULS FINISHING, chropowatość powierzchni zmniejsza się o 30%, w stosunku do powierzchni po obróbce konwencjonalną metodą szlifowania. Wykazano, że najbardziej korzystny wpływ na wydajność trybologiczną mają: prędkość obrotowa, czas impulsu, głębokość zanurzenia we wsadzie obróbkowym oraz rodzaj kształtek roboczych. Jest to innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjno-technologiczne, obecnie stosowane w obróbki wykończeniowej krawędzi ostrzy narzędzi skrawających po operacjach szlifowania.

2.6. Wnioski z analizy literatury

Na podstawie wieloaspektowej analizy literatury, sformułowano następujące wnioski:

1. W standardowym rozwiązaniu, procesy wygładzania pojemnikowego są realizowane ze swobodną losową orientacją przedmiotów obrabianych we wsadzie roboczym składającym się z kształtek ściernych i środków wspomagających obróbkę. Proces ten jest stosunkowo długotrwały, słabo sterowalny i charakteryzuje się niską efektywnością, ponieważ przedmioty obrabiane zajmując losowe położenia, a chwilowa energia wsadu roboczego, jest również lokalnie zmienna w przestrzeni wsadu roboczego.
2. Mając na uwadze powyższe, od pewnego czasu poszukuje się możliwości zwiększenia efektywności obróbki w wygładzarkach pojemnikowych, poprzez mocowanie i orientację obrabianych przedmiotów w uchwytach. Uchwyty te umożliwiają określone położenie i orientację przedmiotów we wsadzie roboczym, co zapewnia większą efektywność ich obróbki. Niektóre rozwiązania uchwytów, umożliwiają nadawanie przedmiotom obrabianym ruchów obrotowych o określonej prędkości, a także o zmiennym kierunku.
3. W dotychczasowych rozwiązaniach, uchwyty przedmiotowe najczęściej są stosowane na wygładzarkach strumieniowych pracujących w systemie strumieniowym *stream finishing*. Uchwyty takie wykorzystują w swoich najnowszych rozwiązaniach czołowi światowi producenci wygładzarek pojemnikowych i strumieniowych, zwłaszcza niemieckie firmy RÖSLER i OTEC. W mniejszym zakresie uchwyty takie są stosowane w wygładzarkach rotacyjno-kaskadowych i wibracyjnych.
4. W wygładzarkach strumieniowych, jako uchwyty przedmiotowe stosuje się roboty przemysłowe, wyposażone we wrzeciona nadające ruch obrotowy przedmiotom obrabianym oraz odpowiednią ich orientację kątową i przestrzenną.
5. W wygładzarkach rotacyjno-kaskadowych wykorzystywane są w zasadzie jedynie uchwyty pasywne, umożliwiające nadawanie przedmiotom obrabianym określone położenie i orientacji kątowej we wsadzie roboczym, coraz częściej z uwzględnieniem rozkładu wysokich stanów energii kinetycznej.
6. Prowadzone w tym zakresie badania eksperymentalne i modelowe, dotyczą głównie oceny intensywności i jakości obróbki powierzchniowej, przy określonej głębokości zanurzenia przedmiotów we wsadzie roboczym i ewentualnie ich orientacji kątowej. W tym zakresie prowadzone są również prace optymalizacyjne z zastosowaniem

różnych gatunków kształtek ściernych i polerskich o zróżnicowanych właściwościach obróbkowych.

7. Dzięki umiejscowieniu przedmiotu obrabianego w obszarze wsadu roboczego charakteryzującym się najwyższym poziomem energii kinetycznej i najwyższym potencjałem obróbkowym, można znacząco skrócić czas trwania obróbki i uzyskać lepszą jakość powierzchni przedmiotu obrabianego.
8. W dotychczasowych rozwiązaniach uchwytów przedmiotowych stosowanych w różnych typach wyłazarek pojemnikowych, nie stosowano uchwytów z ruchem drgającym przedmiotu, ani też uchwytów z połączeniem ruchów obrotowych i wibracyjnych.
9. Nie stosowano też orientacji przedmiotu obrabianego na zróżnicowanych położeniach w kierunku promieniowym w komorach roboczych wyłazarek pojemnikowych w jednym procesie obróbkowym, celem wykorzystania zmieniającej się energii kinetycznej kształtek roboczych do realizacji np. obróbki zgrubnej i wykończeniowej.
10. W badaniach procesów wyłazania pojemnikowego, nie są w zasadzie analizowane wpływy następstw operacji poprzedzających ten proces (tzw. dziedzictwa technologicznego), na kształtowanie chropowatości powierzchni obrabianych i stan ich warstwy wierzchniej. To może utrudniać porównywanie wyników badań obróbki powierzchniowej.
11. W modelowaniu numerycznym procesów wyłazania pojemnikowego coraz częściej stosowana jest metoda elementów dyskretnych DEM, umożliwiająca określenie położenia i prędkości kształtek roboczych, a w konsekwencji ich potencjału energetycznego i obróbkowego.

3. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU I ZAKRESU PRACY ORAZ CELE I HIPOTEZY BADAWCZE

Uchwyty przedmiotowe stosowane w procesach wygładzania pojemnikowego, obecnie są głównie stosowane w wygładzarkach do obróbki strumieniowej. Służą one do obróbki przedmiotów precyzyjnych w przypadku, gdy należy je oddzielać od siebie w komorach roboczych wygładzarek ze względu na możliwość wzajemnych kontaktów prowadzących do ich uszkodzeń. Są to np. implanty ortopedyczne, koła zębate, korbowody, narzędzia skrawające. Uchwyty takie są stosowane w niektórych typach wygładzarek produkowanych przez firmy RÖSLER, OTEC i EBRA, a obróbka z ich zastosowaniem nosi nazwę *drag finishing*. W tych rozwiązaniach pojedyncze uchwyty przedmiotowe są mocowane zespołowo w specjalnych głowicach wygładzarek. Umożliwiają one nadawanie przedmiotom obrabianym ruchów obrotowych z jednoczesnym ruchem obrotowym całej głowicy. Uchwyty przedmiotowe są jednak znacznie rzadziej stosowane w rotacyjno-kaskadowych wygładzarkach pojemnikowych. W tym przypadku głównie wykorzystywane są uchwyty pasywne lub sporadycznie roboty przemysłowe. Niezwykle rzadko służą one do nadawania przedmiotom ruchów obrotowych. Tego typu rozwiązania stosuje się raczej w warunkach laboratoryjnych i pracach badawczych.

Wobec powyższego, w niniejszej pracy podjęto się próby zaprojektowania i weryfikacji pracy aktywnego uchwyty przedmiotowego, przystosowanego do rotacyjno-kaskadowej obrabiarki EC6 produkcji AVALON Machines Sp. Z o.o. Nowa Wieś Lęborska. Uchwyt ten umożliwia nadawanie przedmiotom obrabianym ruchów obrotowo-wibracyjnych, a także ich przestrzenną orientację we wsadzie roboczym. Rozwiązanie to może być również wykorzystywane do wygładzarek innych typów, w tym również wygładzarek wibracyjnych, strumieniowych, korytkowych. Ma ono charakter uniwersalny i stanowi samodzielny zespół pomocniczych ruchów obróbkowych obrabianego przedmiotu, uzupełniający możliwości technologiczne tych wygładzarek.

Wielokierunkowa analiza materiałów źródłowych i wynikające z niej wnioski, umożliwiły sformułowanie następujących celów poznawczych i użytecznych, hipotez naukowych oraz zakresu niniejszej rozprawy:

Cele poznawcze

1. Określenie sposobu kształtowania struktury geometrycznej powierzchni obrabianej w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem aktywnego uchwyty przedmiotowego autorskiego projektu, wykonującego ruchy obrotowo-wibracyjne przedmiotu.

2. Analiza i ocena porównawcza efektywności obróbki w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem stacjonarnego oraz aktywnego uchwytu przedmiotowego.
3. Analiza wpływu technologicznych operacji poprzedzających (tzw. dziedzictwa technologicznego), na sposób i efektywność kształtowania struktury geometrycznej powierzchni w procesie wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej.

Cele użyteczne

1. Zaprojektowanie, budowa i weryfikacja aktywnego uchwytu przedmiotowego, umożliwiającego nadawanie ruchów obrotowych i obrotowo-wibracyjnych przedmiotowi obrabianemu w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, umożliwiającego modyfikację procesu obróbki powierzchniowej.
2. Określenie, w jakim zakresie występuje wpływ operacji poprzedzających elementów obrabianych, na jakość i efektywność kształtowania struktury geometrycznej powierzchni w wieloetapowym procesie wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej.

Na podstawie wytyczonych celów pracy oraz dotychczasowych badań własnych, sformułowano następujące hipotezy naukowe o następującym brzmieniu:

1. Kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni elementów obrabianych w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, w dużej mierze zależy od liczby i czasu kontaktów kształtek roboczych oraz siły i kierunku ich oddziaływania.

Nadanie dodatkowych ruchów obrotowych i wibracyjnych przedmiotowi obrabianemu za pomocą aktywnego uchwytu mocującego w procesie obróbki w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, wpłynie na zmiany sposobu oddziaływania kształtek roboczych na powierzchnię obrabianą, poprzez skrócenie czasów ich kontaktu oraz zmiany kształtów i rozkładów śladów obróbkowych, co będzie miało wpływ na kształtowanie chropowatości powierzchni obrabianej w odniesieniu do jej cech wysokościowych, horyzontalnych i kształtów wierzchołków nierówności.

2. Struktura geometryczna powierzchni metalowych kształtowana w procesach wygładzania pojemnikowego, jest w istotny sposób uzależniona od oddziaływań mechanicznych, termicznych i chemicznych występujących w operacjach poprzedzających. W przypadku, kiedy operacjami poprzedzającymi są operacje

toczenia i szlifowania, obciążenia te w dużym stopniu zależą nie tylko od parametrów i warunków obróbki, ale także od stanu zużycia zastosowanych w nich narzędzi.

Stępienie narzędzi obróbkowych stosowanych w procesach toczenia i szlifowania poprzedzających proces pojemnikowego wygładzania elementów ze stali AISI 304, może w znaczący sposób wpływać na efektywność obróbki ($\Delta Ra = \frac{Ra(0) - Ra(45)}{Ra(0)}$) i szybkość transformacji chropowatości obrabianych powierzchni w postępujących po sobie procesach obróbki ($T = Ra_i / Ra_{i+1}$) oraz na chropowatość powierzchni kształtowaną w procesie wygładzania pojemnikowego.

W celu osiągnięcia postawionych celów pracy oraz potwierdzenia przyjętych hipotez badawczych, wytyczono następujący zakres pracy:

1. Analizę literatury przedmiotowej.
2. Zaprojektowanie i budowę specjalnego uchwytu do mocowania przedmiotów, obrabianych umożliwiające nadawanie im sterowanych ruchów obrotowych i obrotowo-wibracyjnych, podczas obróbki w rotacyjno-kaskadowej.
3. Przeprowadzenie badań rozpoznawczych w zakresie wpływu poszczególnych form ruchu na kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni obrabianej, w porównaniu z swobodną orientacją przedmiotu obrabianego w procesie obróbki w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej.
4. Przeprowadzenie badań zasadniczych w zakresie wpływu prędkości obrotowej i drgań przedmiotu obrabianego na sposób kształtowania struktury geometrycznej ich powierzchni w procesie obróbki wygładzającej w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej.
5. Ocena funkcjonalności uchwytu opracowanego aktywnego uchwytu przedmiotowego i analiza jego stosowalności w procesie wygładzania pojemnikowego wygładzarce rotacyjno-kaskadowej.
6. Badania wpływu stanu stępienia narzędzi obróbkowych w operacjach poprzedzających obejmujących toczenie i szlifowanie, na sposób kształtowania struktury geometrycznej powierzchni wygładzanych i czasy tych operacji.
7. Opracowanie wniosków poznawczych, użytkowych i dotyczących kierunków dalszych prac badawczych.

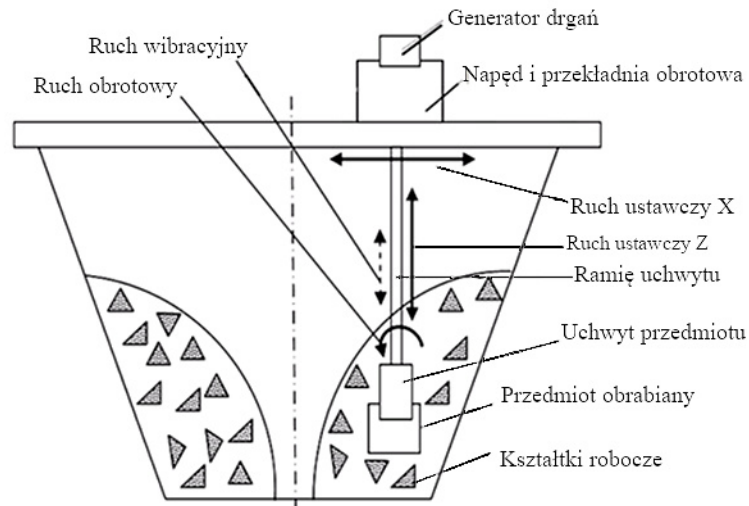
4. PROJEKT I BUDOWA AKTYWNEGO UCHWYTU DO MOCOWANIA PRZDMIOTU OBRABIANEGO W ROTACYJNO - KASKADOWEJ WYGŁADZARCE POJEMNIKOWEJ EC6

Badania prowadzone w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej, analiza szerokiego zbioru literatury, jak i własne doświadczenia, posłużyły do przyjęcia następujących głównych założeń konstrukcyjnych projektowanego uchwytu przedmiotowego:

- uchwyt przedmiotu jest urządzeniem niezależnym i posiada własną konstrukcję nośną,
- konstrukcja uchwytu powinna umożliwiać jego mocowanie na górnej części komory rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej EC6,
- konstrukcja uchwytu powinna zapewniać możliwości przemieszczania przedmiotu obrabianego w kierunku promieniowym i wysokościowym w przestrzeni komory roboczej wygładzarki, w celu jego orientacji w strefie wsadu roboczego o określonej wielkości energii kinetycznej i potencjału obróbkowego.
- konstrukcja uchwytu powinna umożliwiać nadawanie przedmiotowi obrabianemu ruchu obrotowego wokół własnej osi o prędkości obrotowej $n_p = 0-50$ obr/min, umożliwiając równomierną obróbkę całej jego powierzchni,
- konstrukcja uchwytu powinna umożliwiać nadawanie przedmiotowi obrabianemu dodatkowego ruchu drgającego o częstotliwościach $f = 0-100$ Hz, w celu sterowania elementarnymi zjawiskami obróbkowymi, wpływającymi na kształtowanie struktury geometryczną obrabianej powierzchni.
- konstrukcja uchwytu powinna umożliwiać obróbkę przedmiotów o zróżnicowanych kształtach i wymiarach, w wyniku zastosowania wymiennych chwytaków je mocujących.

Przedstawione rozwiązanie rozszerza możliwości technologiczne wygładzarek pojemnikowych. Dodatkowe nadawanie i sterowanie ruchem obrotowym i wibracyjnym przedmiotu obrabianego, w połączeniu z ruchem wsadu roboczego w komorze wygładzarki, rozszerza możliwości sterowania procesem wygładzania. Ze względu na łatwość sterowania charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową uchwytu, istnieją szerokie możliwości wieloparametrycznego sterowania przebiegiem procesu obróbki i jakością technologiczną powierzchni obrabianej, z uwzględnieniem właściwości materiału obrabianego, kształtu i wielkości obrabianego przedmiotu.

Na podstawie powyższych założeń, została opracowana koncepcja konstrukcyjna uchwytu, którą przedstawia rys.46.

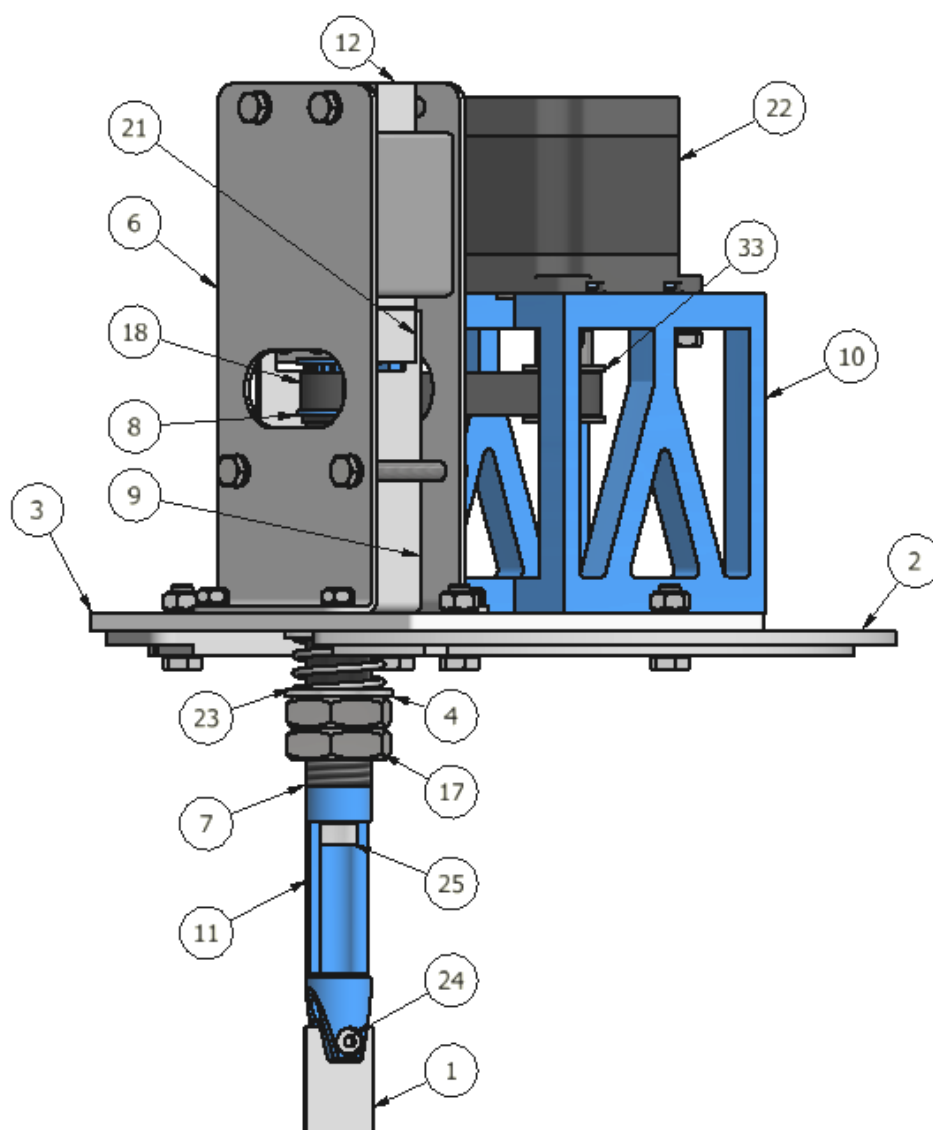


Rys.46. Szkic konstrukcyjny projektowanego aktywnego uchwytu przedmiotowego do rotacyjno-kaskadowej wygładzarki EC6

Uchwyt ten umożliwia nadanie przedmiotowi obrabianemu pionowego i poprzecznego ruchu ustawczego (X-Y) we wsadzie roboczym wygładzarki pojemnikowej będącym w ciągłym w ruchu rotacyjnym.. Umożliwia to nadanie przedmiotowi określonego położenia we wsadzie roboczym z uwzględnieniem rozkładu wielkości energii kinetycznej tego wsadu w przekroju prostopadłym do ruchu kształtek roboczych. Dodatkowo, ramię uchwytu wraz z uchwytem przedmiotu obrabianego, może wykonywać ruch obrotowy o określonej prędkości oraz ruch wirowy o określonej i regulowanej amplitudzie i częstotliwości. Ruchy te mogą być wykonywane jednocześnie i są generowane przez zespół napędowy ruchu obrotowego i generator drgań, które łącznie tworzą zintegrowany układ ruchu przedmiotu obrabianego. Parametry robocze obu tych ruchów są sterowane, co umożliwia dostosowanie ich wartości do określonych warunków i wymagań technologicznych, np. stanu wyjściowego powierzchni przedmiotów obrabianych, ich wielkości i kształtu oraz rodzaju materiału obrabianego.

4.1. Projekt konstrukcyjny uchwytu

Projekt konstrukcyjny aktywnego uchwytu został opracowany z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Inventor Professional. Rysunek złożeniowy uchwytu wraz z oznaczeniami części składowych przedstawia rys.47.



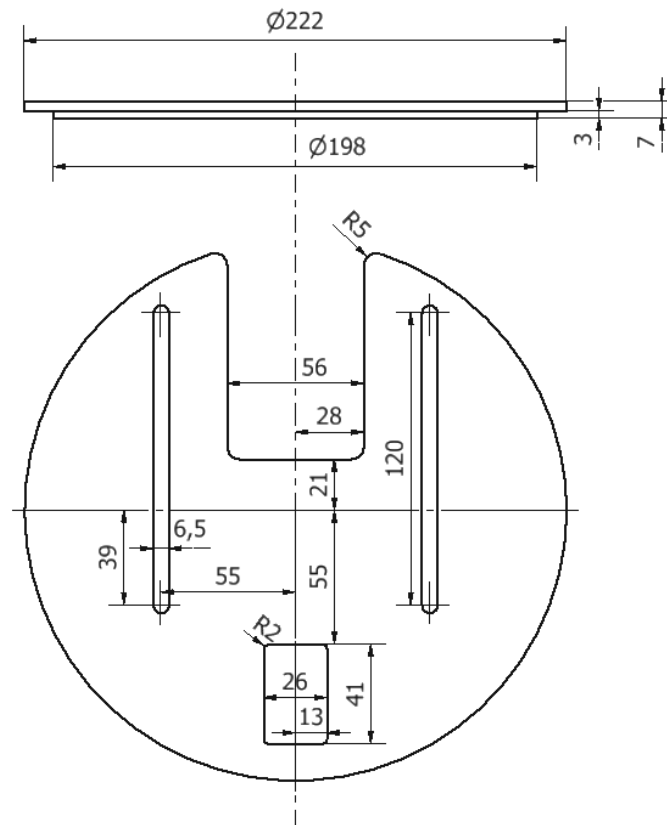
Rys.47. Model CAD 3D aktywnego uchwytu przedmiotowego

Uchwyt składa się z 33 części, których listę przedstawiono w tab.7

Tab.7. Części składowe uchwytu przedmiotowego

LP	ILOŚĆ	NUMER CZĘŚCI
1	1	EC6-UA-001 Płytk testowa
2	1	EC6-UA-101 Pokrywa uchwytu
3	1	EC6-UA-102 Płyta przesuwna
4	2	EC6-UA-103 Podkładka Ø18,5
5	1	EC6-UA-104 Gniazdo łożyska
6	2	EC6-UA-105 Mocowanie elektromagnesu
7	1	EC6-UA-106 Oś uchwytu
8	1	EC6-UA-107 Zębatka uchwytu
9	1	EC6-UA-108 Kosz mocujący
10	2	EC6-UA-109 Wspornik silnika
11	1	EC6-UA-110 Chwytnak
12	1	elektromagnes
13	2	H1FM-1820-22
14	1	Nakrętka DIN 934 M4 A2
15	8	Nakrętka DIN 934 M25 A2
16	4	Nakrętka DIN 934 M6 A2
17	4	Nakrętka niska DIN 439 M18x1 ocynk
18	1	Pas zębaty
19	12	Podkładka Schnorr 5
20	9	Podkładka Schnorr 6
21	1	rdzeń elektromagnesu
22	1	Silnik krokowy NEMA 23
23	1	sprężyna
24	1	Śruba imbus DIN 912 ISO 4762 M4x16 A2
25	1	Śruba imbus DIN 912 ISO 4762 M6x20 A2
26	4	Śruba maszynowa DIN 933 M5x45 ocynk
27	4	Śruba maszynowa DIN 933 M6x16 A2
28	4	Śruba maszynowa DIN 933 M6x20 A2
29	2	Wkr. doc. z końcem płaskim DIN 913 M3x4 A2
30	4	Wkręt z łbem stożkowym DIN 7991 M5x10 A2
31	2	Wkręt z łbem stożkowym DIN 7991 M5x30 A2
32	4	Wkręt z łbem stożkowym DIN 7991 M6x12 A2
33	1	zębatka silnika

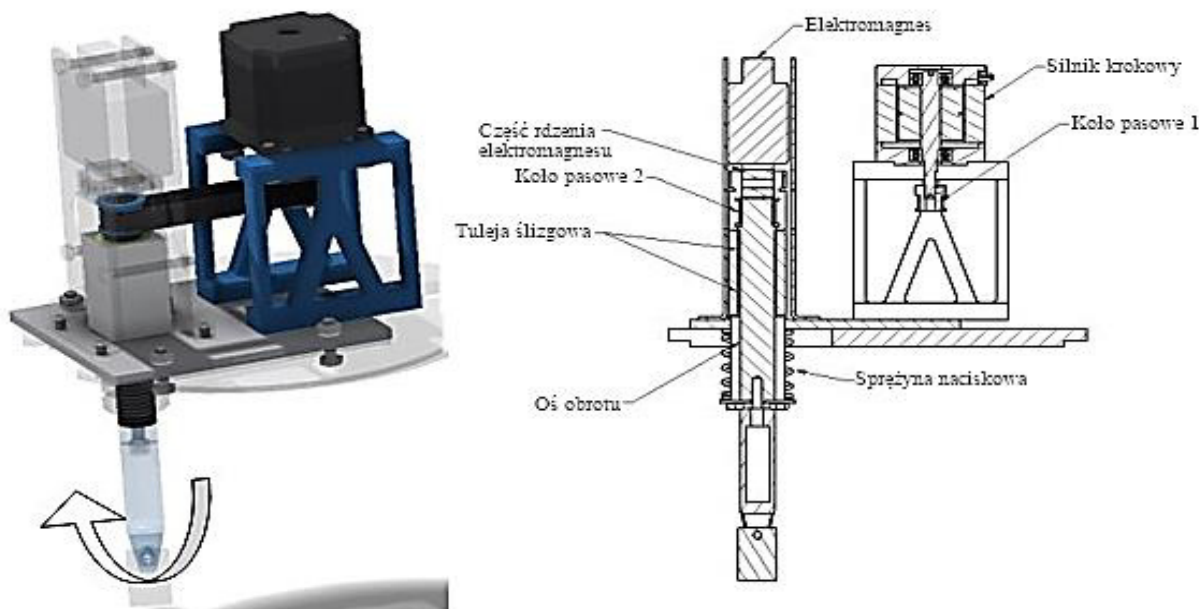
Budowę aktywnego uchwytu można podzielić na cztery główne zespoły. Pierwszy z nich to podstawa (pokrywa), którą umieszcza się i mocuje na komorze roboczej wygładzarki pojemnikowej EC6. Podstawa ta pełni funkcję adaptera. Jej rozmiar zależy od wielkości komory roboczej wygładzarki (rys.48).



Rys.48. Rysunek podstawy uchwytu przystosowany do wygładzarki pojemnikowej typu EC6

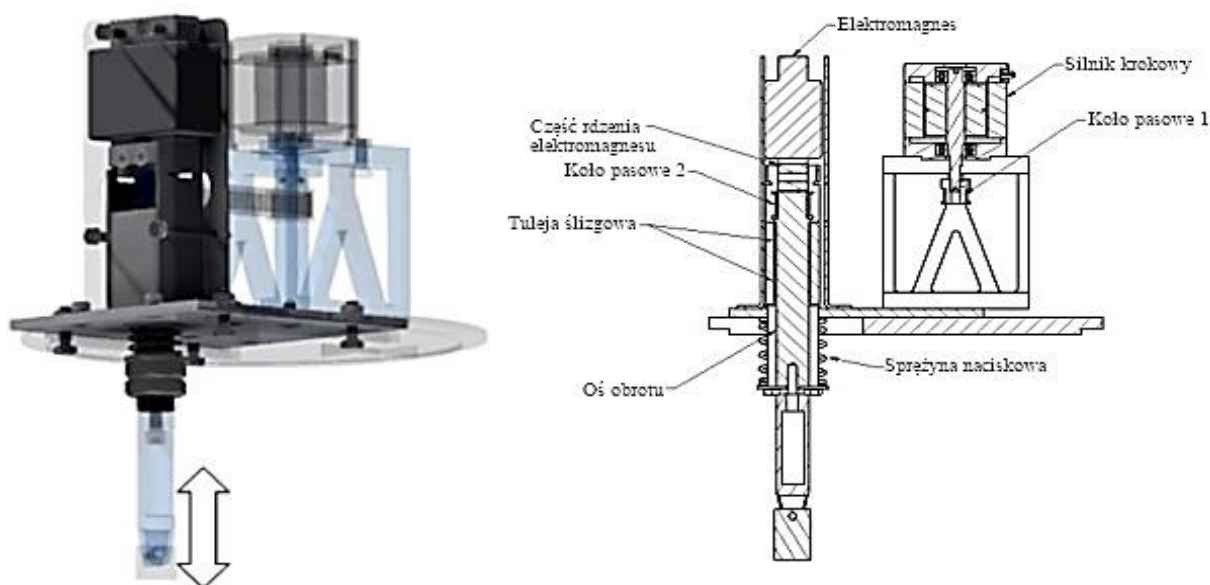
Pokrywa posiada kołnierz ustalający, dzięki któremu połączenie pomiędzy pokrywą, a górną częścią komory roboczej jest realizowane na wcisk. Poprzez zastosowanie otworów podłużnych do mocowania płyty przesuwnej, na której umiejscowiony jest uchwyt, możliwa jest regulacja miejsca położenia przedmiotu obrabianego. Dodatkowe wycięcie o zarysie prostokątnym, jest przeznaczone do mocowania układu służącego do dozowania płynu wspomagającego obróbkę.

Drugim ważnym zespołem składowym uchwytu jest zespół obrotu realizowany za pomocą silnika krokowego. Silnik krokowy posadowiony jest na wspornikach zamocowanych do płyty przesuwnej. Ruch obrotowy przekazywany jest poprzez przekładnię z paskiem zębatym o przełożeniu 1:1 (rys.49).



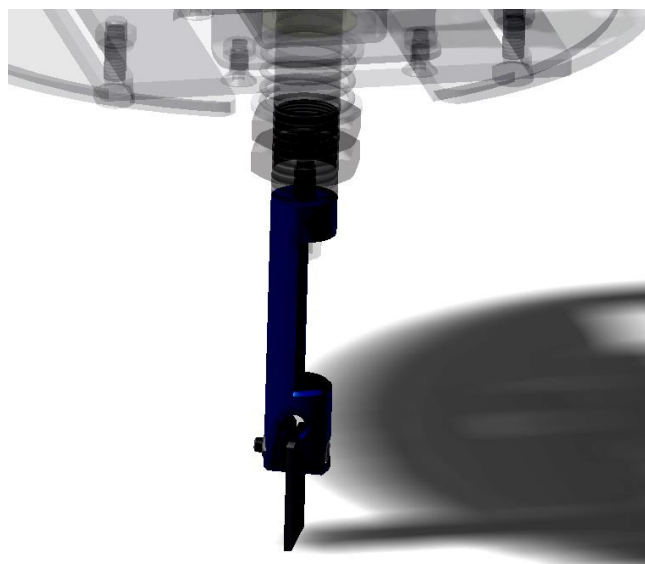
Rys.49. Zespół napędu ruchu obrotowego uchwytu przedmiotu obrabianego

Kolejny zespół odpowiada za generowanie ruchu drgającego przedmiotu obrabianego. Ruch ten uzyskiwany jest poprzez generator elektromagnetyczny, który z określoną częstotliwością przyciąga rdzeń przymocowany pośrednio do uchwytu przedmiotu. W celu realizacji ruchu powrotnego, została zastosowana sprężyna ruchu powrotnego. Charakterystyka sprężyny została w taki sposób dobrana, żeby siła przyciągania elektromagnesu była większa od siły nacisku sprężyny. Dzięki temu, elektromagnes podczas fazy przyciągania unosi przedmiot obrabiany o 1mm, po czym sprężyna powoduje jego powrót do stanu poprzedniego. Ruch ten powtarzany jest z częstotliwością 35-95 Hz, co powoduje efekt drgań przedmiotu (rys.50).



Rys.50. Zespół ruchu vibracyjnego przedmiotu obrabianego

Ostatnim komponentem urządzenia jest zespół uchwytu, do którego poprzez zacisk śrubowy przymocowany jest przedmiot obrabiany. Długość uchwytu jest zmienna i tak dobierana, aby przedmiot obrabiany po wprowadzeniu do komory wygładzarki, mógł zagłębiać się w strumieniu wsadu roboczego w strefie największego potencjału energetycznego. W rozpatrywanym przypadku wygładzarki pojemnikowej EC6, długość ta wynosi 77 mm (rys.51).



Rys.51. Uchwyt mocujący uchwytu przedmiotu obrabianego

Widok uchwytu przedmiotowego po zamocowaniu na komorze wygładzarki EC6 przedstawia poniższy rysunek (rys.52).



Rys. 52. Widok aktywnego uchwytu przedmiotowego po zamontowaniu na wygładzarce EC6 a i widok kompletnego stanowiska badawczego b)

4.2. Weryfikacja działania aktywnego uchwytu przedmiotowego na podstawie symulacji komputerowej

Ocena funkcjonalności projektowanego uchwytu została przeprowadzona z zastosowaniem modelu cyfrowego urządzenia, na podstawie dwudziesto-sekundowej animacji komputerowej w środowisku Inventor Studio w programie Autodesk Inventor Professional. Animacja przedstawia usytuowanie urządzenia w rotacyjno-kaskadowej wyładowarce pojemnikowej EC6 wraz z ruchem wsadu roboczego, generowanego wirnikiem obrotowym znajdującym się w dolnej części komory roboczej oraz zintegrowanym ruchem obrotowo- wibracyjnym przedmiotu obrabianego (rys.53).

Poprawność pracy uchwytu w warunkach badawczych, zweryfikowano w procesie rotacyjnego wyładowania na próbki o kształcie płasko - równoległym i próbki kształtowych, wykonanych z różnych materiałów PA11, 0H18N9, MO58.



Rys.53. Animacja pracy systemu obróbkowego na wyładowarce EC6: a) model 3D układu roboczego, b) symulacja ruchów wsadu roboczego i uchwytu przedmiotowego

Na podstawie wyników badań weryfikacyjnych sformułowano następujące wnioski:
Zastosowany układ sterowania ruchem obrotowo-wibracyjny przedmiotu obrabianego, zapewnia kształtowanie jednorodnej struktury powierzchniowej wszystkim obrabianym powierzchniom przedmiotów obrabianych.

1. Za pomocą ruchów stosowanych w sposób rozdzielny lub zintegrowany, można sterować czasem kontaktu kształtek roboczych z powierzchnią obrabianą, w wyniku czego można wpływać na strukturę i wielkość śladów obróbkowych oraz strukturę geometryczną powierzchni obrabianej.

2. Układ roboczy uchwytu umożliwia długotrwałą pracę, zarówno w warunkach typowych dla obróbki wstępnej z relatywnie dużą intensywnością usuwania powierzchni obrabianej, jak i mało intensywnej obróbki wygładzającej.

Opracowane rozwiązanie konstrukcyjno-funkcjonalne uchwytu, zostało zgłoszone jako wynalazek do Polskiego Urzędu Patentowego pt. **Urządzenie do obrabiania wstępnie uformowanych elementów w medium roboczym**. (P.436384 z dnia 17.12.2020 r.)

AI (71) 436384 (72) 2020 12 17

(51) B24B 31/12 (2006.01)

B24B 47/10 (2006.01)

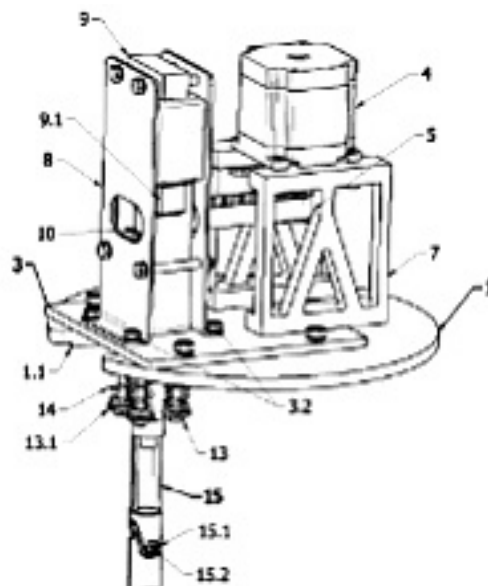
(71) POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, Koszalin

(72) PUCHTA JAROSŁAW; JUNIEWICZ MATEUSZ

(54) **Urządzenie do obrabiania wstępnie uformowanych detali w medium roboczym**

(5/7) **Urządzenie do obrabiania wstępnie uformowanych detali w medium roboczym, w szczególności w urządzeniach do wygładzania strumieniowego (zanurzeniowego), takich jak wygładzarki pojemnikowe, zaopatrzone w uchwyt obracający się wokół własnej osi oraz poruszający się w kierunku osiowym, za pomocą oddzielnych napędów, charakteryzujące się tym, że zaopatrzone jest w posadowioną na pokrywie roboczej (1) urządzenia do wygładzania strumieniowego, dodatkową pokrywę (3), na której zewnętrznej powierzchni, zamocowany jest zespół ruchu obrotowego z silnikiem elektrycznym zasilanym impulsowo zaopatrzonym w środki do ruchu obrotowego uchwytu zaciskowego (15) oraz zespół ruchu wibracyjnego z urządzeniem wytwarzającym pole magnetyczne zaopatrzonym w środki do przekazywania napięcia, zaopatrzony w środki do wibrowania uchwytu zaciskowego (15) oraz środki do ruchu obrotowego uchwytu zaciskowego (15).**

(6 zastrzeżeń)



Pat. 243716 pod tytułem **Urządzenie do obrabiania wstępnie uformowanych detali w medium roboczym** został udzielony **14-07-2023**

5. BADANIA EKSPERYMENTALNE PROCESU OBRÓBK W ROTACYJNO-KASKADOWEJ WYGŁADZARCE POJEMNIKOWEJ EC6 Z ZASTOSOWANIEM AKTYWNEGO UCHWYTU PRZEDMIOTOWEGO

5.1.Cel i zakres prowadzonych badań

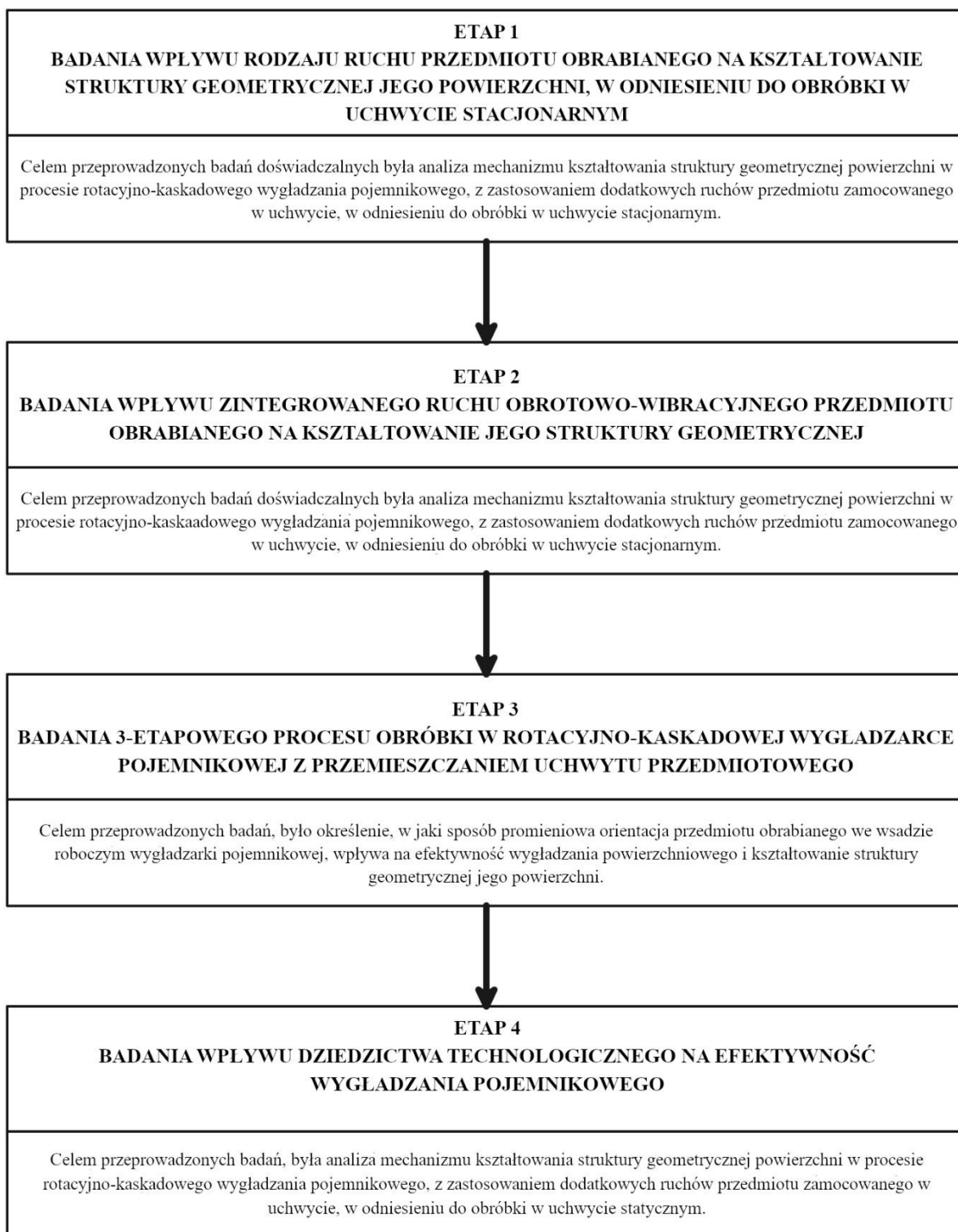
Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych, była analiza procesu kształtowania struktury geometrycznej powierzchni w procesie wygładzania pojemnikowego w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce EC6, z zastosowaniem dodatkowych ruchów przedmiotu zamocowanego w aktywnym uchwycie oraz ocena intensywności i efektywności obróbki, w odniesieniu do obróbki realizowanej z zastosowaniem uchwytu stacjonarnego.

Program tych badań, został podzielony na następujące cztery etapy:

1. Badania i ocena wpływu ruchu obrotowego i obrotowo-drgającego przedmiotu obrabianego, na efektywność obróbki powierzchniowej w odniesieniu do obróbki zrealizowanej w uchwycie stacjonarnym.
2. Badania i ocena wpływu zintegrowanego ruchu obrotowo-wibracyjnego przedmiotu obrabianego na kształtowanie struktury geometrycznej jego powierzchni.
3. Badania 3-etapowego procesu obróbki z okresowym przemieszczaniem uchwytu przedmiotowego w kierunku promieniowym komory wygładzarki.
4. Badania wpływu dziedzictwa technologicznego na efektywność procesu wygładzania pojemnikowego i kształtowanie struktury geometrycznej jego powierzchni.

Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej EC6, której producentem jest AVALON Machines Sp. z o.o Nowa Wieś Lęborska. Uchwyt aktywny o ruchach obrotowo-wibracyjnych został zaprojektowany i w całości wykonany przez autora pracy we współpracy z Katedrą Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej. Jako materiał do badań efektywności procesu wygładzania powierzchniowego zastosowano próbki z walcowanej stali nierdzewnej AISI 304. Narzędzia obróbkowe stanowiły kształtki ściernie ze spoiwem żywicznym i ceramicznym.

Cele i zakres poszczególnych etapów prac badawczych oraz ich wzajemne powiązania przedstawiono na rys.54.

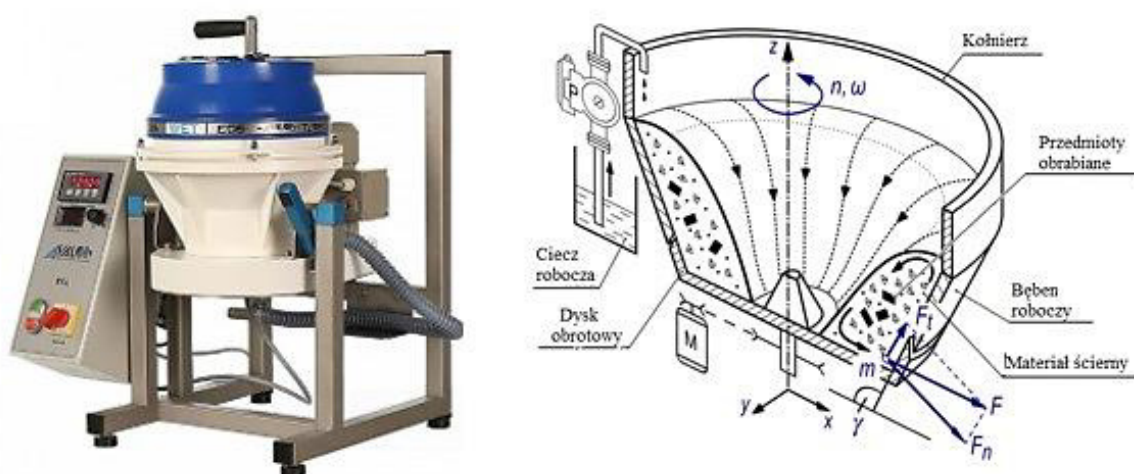


Rys.54. Sekwencyjny układ głównych etapów realizowanego programu badawczego

5.2. Podstawowe stanowiska badawcze i pomiarowe

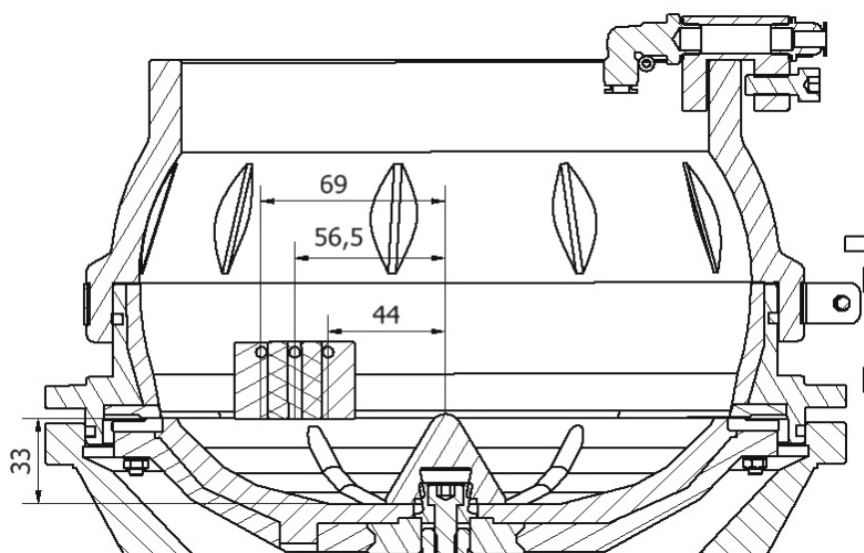
5.2.1. Rotacyjno kaskadowa wygładzarka pojemnikowa

Wygładzarka odśrodkowa EC6 (rys.55) jest wyposażona w komorę roboczą o wymiarach 525x486x702 mm o objętości 6 dcm³. Zalecana masa wsadu roboczego: kształtki żywiczne 4kg, kształtki ceramiczne 5kg, kształtki porcelanowe 6,5kg, wsad nierdzewny 18kg. Jest to urządzenie przeznaczone do jednoczesnej obróbki przedmiotów o masie ok.0,5kg. Umożliwia realizację procesów gratowania, zaokrąglania krawędzi, oczyszczania, gładzenia, matowienia, szlifowania zgrubnego i wykończeniowego oraz polerowania.



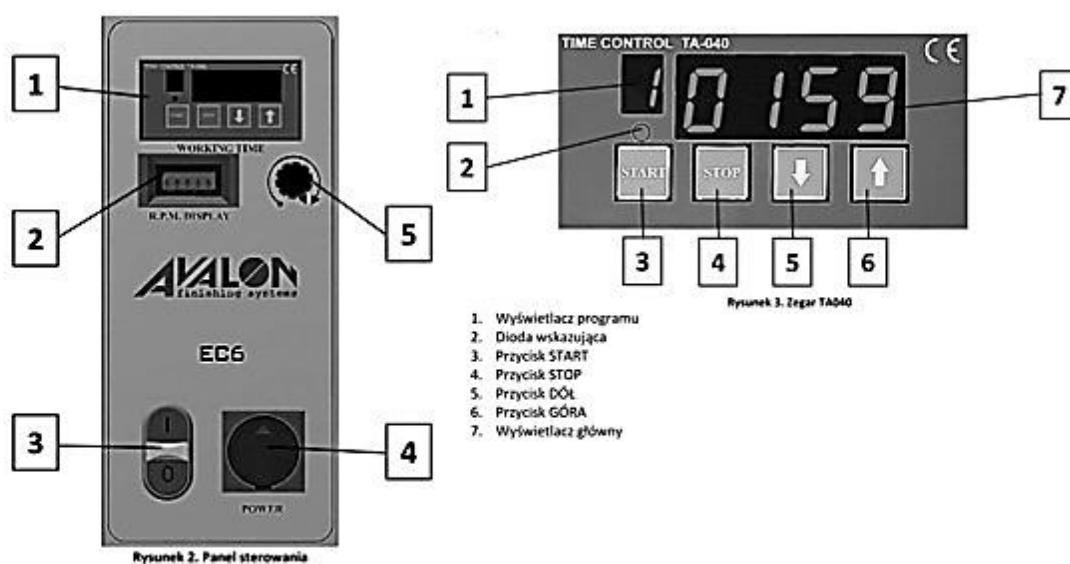
Rys. 55. Rotacyjno – kaskadowa wygładzarka pojemnikowa EC6): a) widok ogólny, b) schemat komory roboczej wraz z kinematyką ruchu kształtek roboczych

Komora robocza wygładzarki (rys.56) składa się z wirnika generującego ruch wirowy wsadu roboczego oraz stałego pierścienia wraz z nasadką. Wnętrze komory pokryte jest warstwą poliuretanu o dużej odporności na zużycie ściernie. Dzięki specjalnemu kształtowi komory roboczej, wsad wprowadzany jest w spiralny ruch, co znacząco przyspiesza obróbkę przedmiotów. Wygładzarka wyposażona jest w regulowany system szczeliny roboczej. Podczas pracy na mokro, wielkość szczeliny powinna wynosić 0,15-0,20 mm, co umożliwia usuwanie pozostałości obróbkowych w postaci szlamu. Podczas pracy na sucho, wielkość szczeliny powinna zawierać się w zakresie 0,05-0,10 mm. Przez nią wtłaczane jest powietrze z pompy membranowej, co ma na celu zabezpieczenie wirnika i pierścienia przed ich zniszczeniem przez łupiny kształtek roślinnych (np. łupiny orzecha). System przepłukiwania oraz szybkie opróżnianie komory roboczej, umożliwiają szybkie zmiany długości cyklu pracy.



Rys.56. Schemat komory roboczej wyłazdzarki EC6

Wyłazdzarka EC6 wyposaona jest w układ sterowania, który umoaliwia programowanie prędkości obrotowej wirnika napędowego wsadu roboczego, programowanie czasu pracy i cykli obróbkowych oraz sterowanie częstotliwością podawania płynów wspomagających obróbkę (rys.57).



1. Zegar TA-040
2. Wyświetlacz obrotów
3. Przyciski START/STOP
4. Wylacznik główny
5. Pokrętko regulacji prędkości

1. Wyświetlacz programu
2. Dioda wskazująca
3. Przycisk START
4. Przycisk STOP
5. Przycisk DÓŁ
6. Przycisk GÓRA
7. Wyświetlacz główny

Rys.57. Widok układu sterowania wyłazdzarki EC6 a) i widok panelu sterowania b)

5.2.2. Aktywny uchwyt przedmiotowy

Zaprojektowany uchwyt (rys.58) realizuje następujące funkcje w procesie badawczym:

- umożliwia orientację zamocowanego przedmiotu obrabianego w określonym miejscu wirującego wsadu roboczego w komorze rotacyjno – kaskadowej wygładzarki pojemnikowej EC6 ,
- nadaje przedmiotowi obrabianemu dodatkowe ruchy obrotowe, wibracyjne, lub zintegrowane ruchy obrotowo-wibracyjne o określonych parametrach technologicznych, tj. prędkości obrotowej przedmiotu n_p , obr/min i drgań w układzie wertykalnym f , Hz.

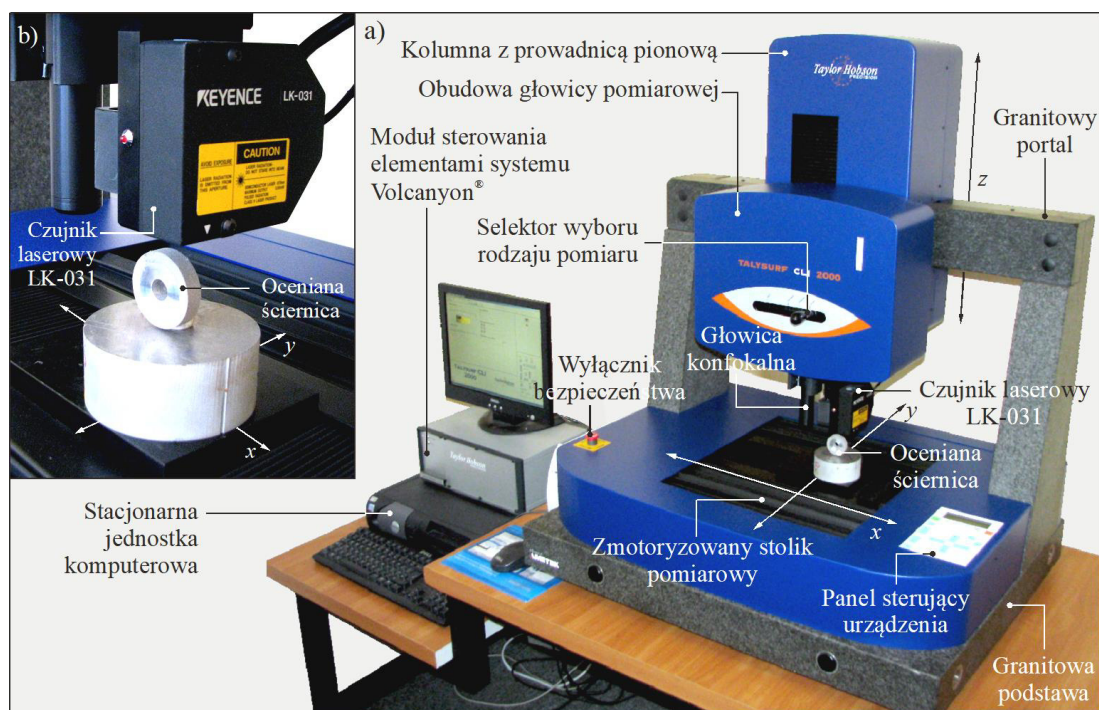


Rys. 58. Widok uchwytu zamocowanego na komorze roboczej wygładzarki EC6 w układzie roboczym a) i widok w przekroju komory roboczej wraz z lokalizacją przedmiotu obrabianego b)

Funkcje te umożliwiają sterowanie mechanizmem kształtowania struktury geometrycznej obrabianych powierzchni, w wyniku sterowanych intensywności oddziaływań oraz relatywnego udziału elementarnych zjawisk obróbkowych.

5.2.3. Profilometr optyczny TalySurf CLI 2000 Taylor-Hobson

Profilometr optyczny Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson o budowie modułowej (rys.59), został zastosowany do pomiaru i oceny struktury geometrycznej wygładzanych powierzchni. Profilometr ten znajduje się na wyposażeniu Centrum Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej



Rys.59. Profilometr optyczny TalySurf CLI 2000

Profilometr jest wyposażony w specjalistyczne oprogramowanie TalyMap Platinum Universal, które umożliwia wykonywanie licznych analiz i wizualizacji istotnych cech chropowatości powierzchni 3D. Głowica pomiarowa jest wyposażona w gniazda do mocowania trzech specjalistycznych sond pomiarowych, pracujących z wykorzystaniem następujących metod:

- metodą stykową czujnikiem indukcyjnym,
- metodą optyczno-konfokalną wykorzystującą zjawisko aberracji chromatycznej CLA800 confocal gauge,
- metodą optyczną z zastosowaniem triangulacji laserowej.

Charakterystyka metod systemu pomiarowego profilometru przedstawia tab.8.

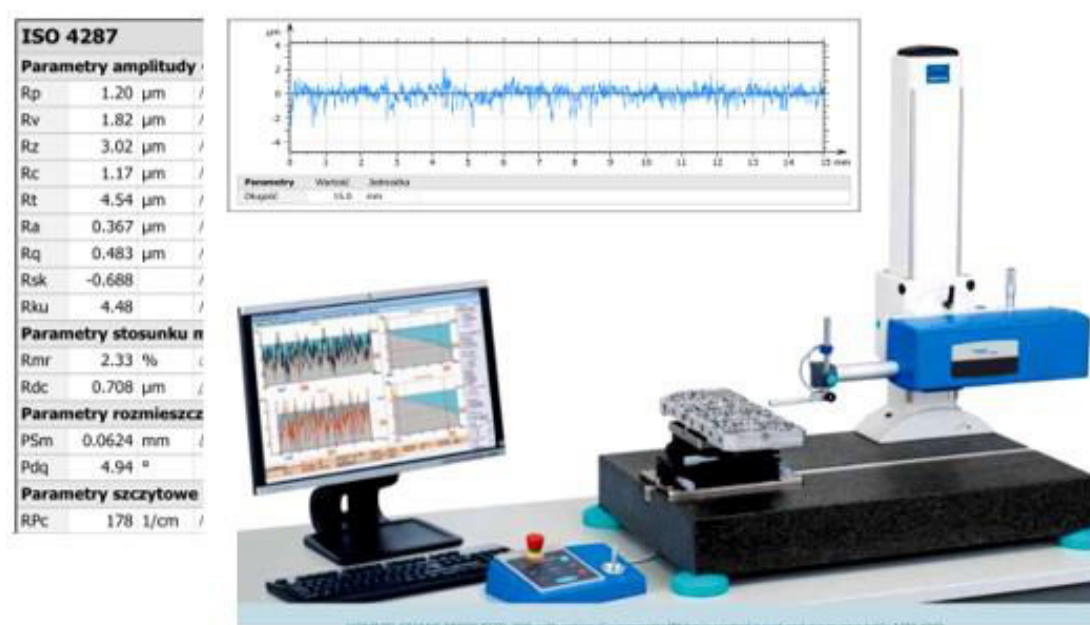
Tab.8. Charakterystyka metod wykorzystywanych w systemie pomiarowym Talysurf CLI 2000

Metoda pomiaru	Zakres pomiarowy	Rozdzielczość pomiaru	Zalety metody
Stykowa	0,1 mm	2 nm	Duża rozdzielczość i dokładność pomiarów
	2,5 mm	40 nm	
Optyczna konfokalna	3 mm	100 nm	Duża rozdzielczość i dokładność pomiarów, relatywnie krótki czas oceny
	1 mm	30 nm	
	300 μm	10 nm	
Optyczna triangulacja laserowa	10 mm	1 μm	Szeroki zakres pomiarowy, duża efektywność
	30 mm	3 μm	

Do pomiarów struktury geometrycznej powierzchni badanych próbek, zastosowano czujnik laserowy LK-031 firmy Keyence, współpracujący z kontrolerem LK-2001, z rozdzielczością rzędu 1 μm .

5.2.4. Profilometr stykowy Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke

Profilometr stykowy Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke (rys.60) umożliwia pomiar standardowych parametrów profili chropowatości powierzchni [36].



Rys. 60. Profilometru stykowy Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke

Urządzenie zostało wyposażone w indukcyjny czujnik pomiarowy KTL 100 pozwalający na pomiar w zakresie $\pm 100 \mu\text{m}$ o nominalnym promieniu zaokrąglenia wierzchołka $5 \mu\text{m}$ oraz kącie wierzchołkowym ostrza 90° . Urządzenie sterowane jest za pomocą programu Turbo Roughness 3.1 oraz Hommel Map Basic. Jego parametry techniczne przedstawiono w tab.9.

Tab.9. Parametry techniczne profilometru stykowego Hommel Tester T8000

Czujnik pomiarowy	TKL 100
Zakres pomiarowy	$\pm 100 \mu\text{m}$
Nominalny promień zaokrąglenia wierzchołka	$5 \mu\text{m}$
Kąt nachylenia końcówek ramion pomiarowych	90°
Jednostka napędowa	Waveline 60 Basic
Kolumna pomiarowa	Wavelift 400M
Podstawa	Stół granitowy Wavesystem 780
Maksymalna długość pomiaru	120mm
Prędkość przesuwu	0,05-0,5 mm/s
Długość ramion pomiarowych	33-78mm
Oprogramowanie	Turbo Roughness 3.1, Hommel Map Basic

5.3. Materiał obrabiany stal nierdzewna AISI 304

W badaniach zastosowano podstawowy gatunek stali z grupy austenitycznych stali chromowo – niklowych AISI 304, której obróbka w wygładzarkach pojemnikowych jest realizowana zazwyczaj „na gotowo”. Wygładzanie pojemnikowe nie jest stosowane do przygotowywania powierzchni pod powłoki ochronne, czy ozdobne. Stal AISI 304 jest najbardziej rozpowszechnioną stalą nierdzewną z grupy austenitycznych stali chromowo – niklowych, stosowanej na całym świecie pod różnymi oznaczeniami według norm międzynarodowych (tab.10).

Tab.10. Oznaczenia stali AISI 304 według międzynarodowych norm

EN 10088	PN	AISI	DIN	GOST
1.4301	0H18N9	304	X5CrNi18-10	08Ch18N10

EN 10088 – Norma europejska (Europejska Norma 10088)

PN – Norma polska (Polska Norma)

AISI – Norma amerykańska (American Iron and Steel Institute)

DIN – Norma niemiecka (Deutsches Institut für Normung)

GOST – Norma rosyjska (Gosudarstwiennyj standard)

Stal nierdzewna AISI 304 jest stalą zawierającą co najmniej 18% chromu i 8% niklu, w połączeniu z maksymalnie 0,08 % węgla (tab.11). Jest to niemagnetyczna stal, która nie może być utwardzana przez obróbkę cieplną w celu uzyskania podwyższonej wytrzymałości na rozciąganie i powinna być obrabiana na zimno. Minimalna zawartość chromu wynosząca 18%, zapewnia odporność na korozję i utlenianie. Ten gatunek stali jest odporny na działanie większości kwasów utleniających, odporny na środki spożywcze, roztwory do sterylizacji, większość organicznych substancji chemicznych i barwników oraz szeroką gamę nieorganicznych substancji chemicznych.

Tab.11. Skład chemiczny stali nierdzewnej AISI 304

C	Cr	Ni	Mn	Si	N
≤ 0,008	18,0 – 20,0	8,0 – 11,0	≤ 2,00	≤ 0,75	≤ 0,10

Właściwości mechaniczne tej stali zamieszczono w tab.12.

Tab.12. Właściwości mechaniczne stali AISI 304

Własności	Wartość w jednostce metrycznej	
Gęstość	$7,9 \cdot 10^3$	kg / m ³
Moduł sprężystości	193	GPa
Rozszerzalność termiczna (20 °C)	$17,2 \cdot 10^{-6}$	°C ⁻¹
Specyficzna pojemność cieplna	502	J / (kg * K)
Przewodność cieplna	16.2	W / (m * K)
Oporność elektryczna	$7.2 \cdot 10^{-7}$	Ohm * m
Wytrzymałość na rozciąganie	520	MPa
Granica plastyczności	210	MPa
Wydłużenie	45	%
Twardość	92	HB
Temperatura topnienia	1400-1450	

Wśród mechanicznych metod obróbki wykończeniowej stali AISI 304, najczęściej stosowanymi są:

- szlifowanie za pomocą elastycznych tarcz ściernych, krążków ściernych, taśm ściernych, włókniny ścierniej, ściernic listkowych,
- polerowanie za pomocą past i zawiesin ściernych,
- wygładzanie i polerowanie w wygładzarkach pojemnikowych.

W wyniku tych operacji zwiększają się jej właściwości techniczne, ochronne oraz estetyczne. Stal nierdzewna w następstwie procesu szlifowania, wykazuje większą odporność na warunki atmosferyczne. Kolejnym pozytywnym aspektem szlifowania i polerowania stali, jest zwiększona odporność wygładzonej powierzchni na korozję. Poza właściwościami zabezpieczającymi, szlifowanie i polerowanie stali nierdzewnej zapewnia również efekt wizualny. Stal poddana polerowaniu charakteryzuje się dużym wskaźnikiem refleksyjności. Austenityczne stale nierdzewne wykazują wysoki stopień umocnienia przez gniot, a w stanie po odkształceniu plastycznym na zimno, ich wysoka wytrzymałość przyczynia się do szybkiego zużycia narzędzi skrawających. Jednak nawet w stanie silnie umocnionym przez zgniot; dzięki wysokiej ciągliwości tworzą długie wióry, które mają tendencje do szepiania się z narzędziem. Ponadto, przewodność cieplna stali austenitycznych jest około trzy razy niższa w porównaniu do zwykłej stali węglowej, co powoduje wytworzenie wysokiej temperatury na styku narzędzie - przedmiot obrabiany i zmniejszą trwałość narzędzi obróbkowych. Z powodu wymienionych przyczyn, stale austenityczne przeznaczone do obróbki skrawaniem zawierają siarkę o stężeniu 0,15- 0,35%.

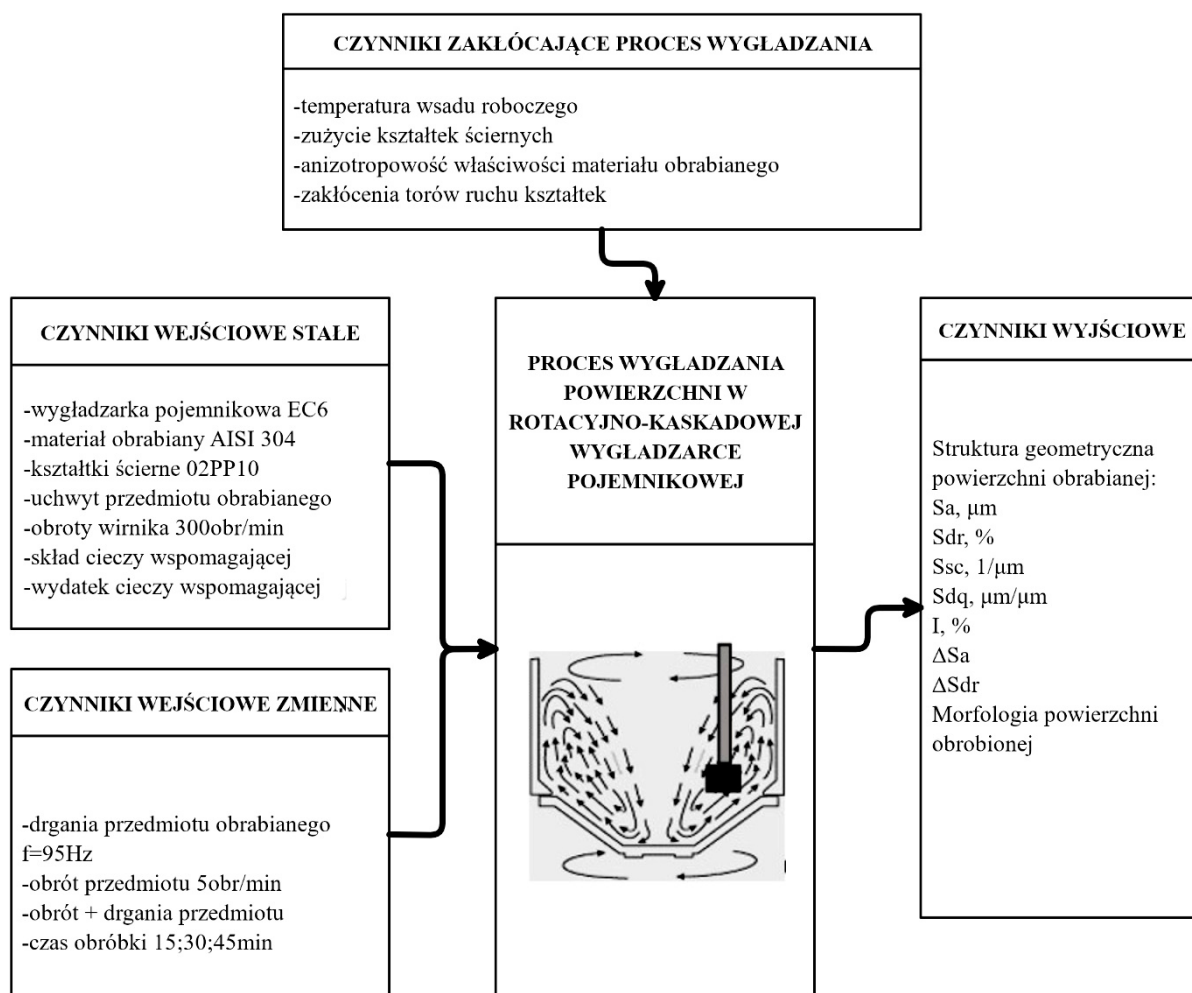
5.4.Badania rozpoznawcze wpływu rodzaju ruchu przedmiotu obrabianego na kształtowanie struktury geometrycznej jego powierzchni

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych, była analiza kształtowania chropowatości powierzchni w procesie wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej EC6, z zastosowaniem dodatkowych ruchów przedmiotu zamocowanego generowanych w uchwycie mocującym.

W programie badań zastosowano następujące warianty obróbki:

- obróbka z mocowaniem przedmiotu w uchwycie bez dodatkowych ruchów,
- obróbka z mocowaniem przedmiotu w uchwycie z ruchem obrotowym,
- obróbka z mocowaniem przedmiotu w uchwycie ze zintegrowanym ruchem obrotowo-wibracyjnym.

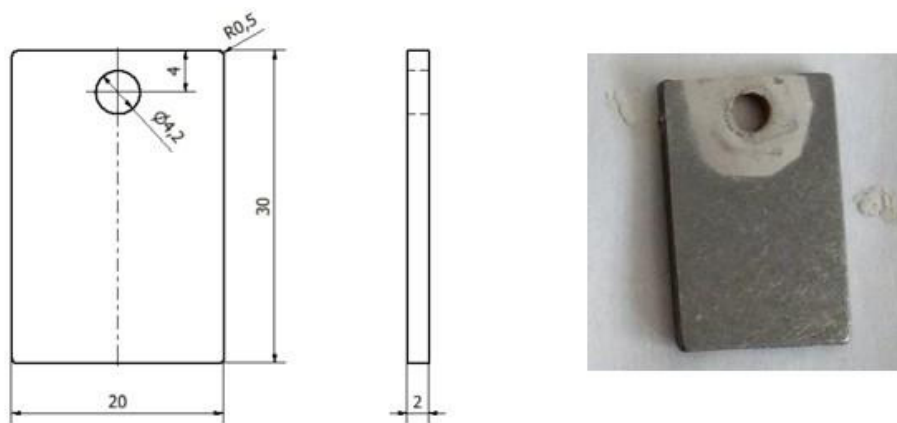
Schemat obiektu badań obejmujące czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia. Program tego etapu badań przedstawia rys.61



Rys.61. Schemat obiektu badań w etapie pierwszym

Taki zakres badań eksperymentalnych, umożliwia analizę przebiegu procesu powierzchniowego wygladzania w przyjętych wariantach technicznych i pozwala określić wpływ rodzaju ruchu przedmiotu obrabianego i sposobu oddziaływania kształtek ściernych na kształtowanie chropowatości powierzchni obrabianej.

Badano przedmioty o kształcie płasko-równoległym o wymiarach 30x20x3mm wykonane ze stali nierdzewnej AISI 304 o chropowatości wyjściowej $S_a = 2,52 \mu\text{m}$ i $S_{dr} = 7,74\%$ (rys.62).



Rys. 62. Rysunek próbki badawczej ze stali AISI 304 a) oraz jej widok ze śladem powierzchni maskowanej przez zacisk mocujący b)

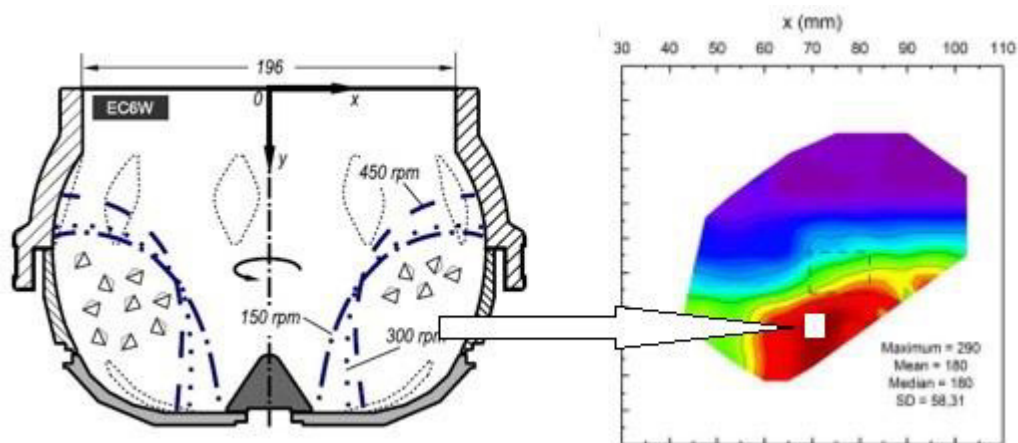
Jako narzędzia robocze zastosowano kształtki ścierne ze spoiwem żywicznym o łącznej masie wsadu roboczego 4 kg, oznaczone przez dystrybutora AVALON symbolem 02PP10 (rys.63).



Rys.63. Żywiczne kształtki ścierne 02PP10

Obróbkę prowadzono przy prędkości obrotowej wirnika wyłazarki $n=300$ obr/min w czasie $t=45$ min, przy prędkości obrotowej przedmiotu $n_p=5$ obr/min i częstotliwości jego drgań $f=95$ Hz. Proces przerywano po każdych 15 min i dokonywano pomiar parametrów struktury geometrycznej obrabianych powierzchni. Do pomiarów zastosowano optyczny profilometr TalySurf CLI 2000 prod. Taylor-Hobson z oprogramowaniem TalyMap.

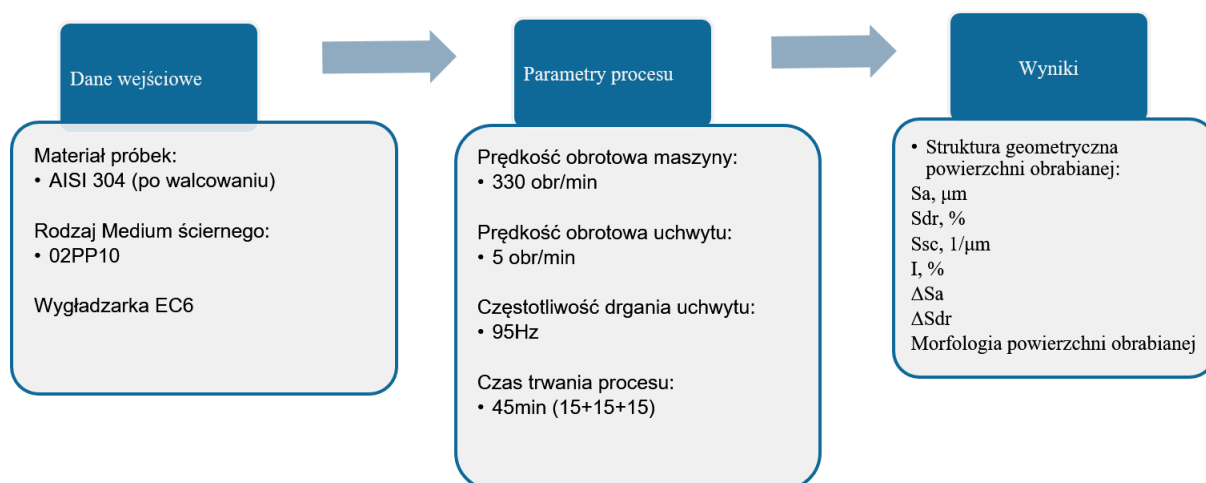
Dla wszystkich analizowanych przypadków, badana próbka po zamocowaniu w obrotowo-wibracyjnym uchwycie, była umieszczana w obszarze największego poziomu energetycznego wsadu roboczego, występującego przy prędkości obrotowej wirnika napędowego wsadu roboczego wyłazarki EC6 $n=300$ obr/min (rys.64).



Rys.64. Poprzeczne rozkłady wsadu roboczego w wyładowarce EC6 przy różnej prędkości obrotowej a) i rozkład energii wsadu przy prędkości obrotowej $n=300$ obr/min

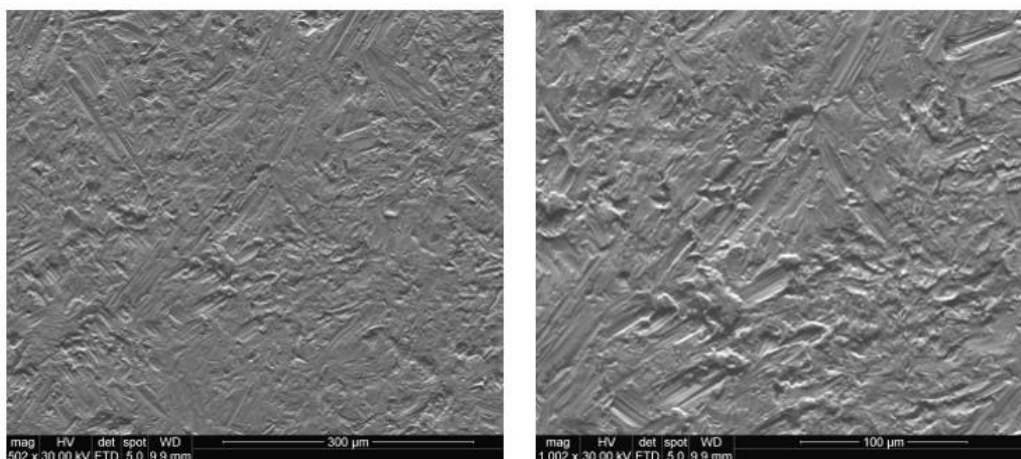
Mapy te zostały wyznaczone na drodze rejestracji wartości sygnału emisji akustycznej AE w określonych punktach pomiarowych w przekroju poprzecznym wsadu roboczego. Wartość energetyczna sygnału AE, została określona przez pomiar wartości skutecznej sygnału napięciowego zarejestrowanego przez czujnik piezoelektryczny [45,46].

Program badań przedstawiono na rys.65.

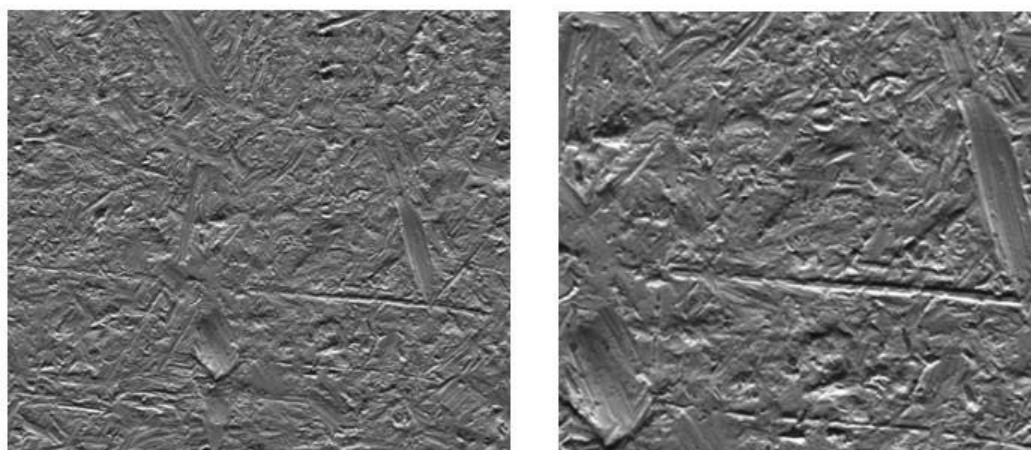


Rys. 65. Parametry i warunki badań

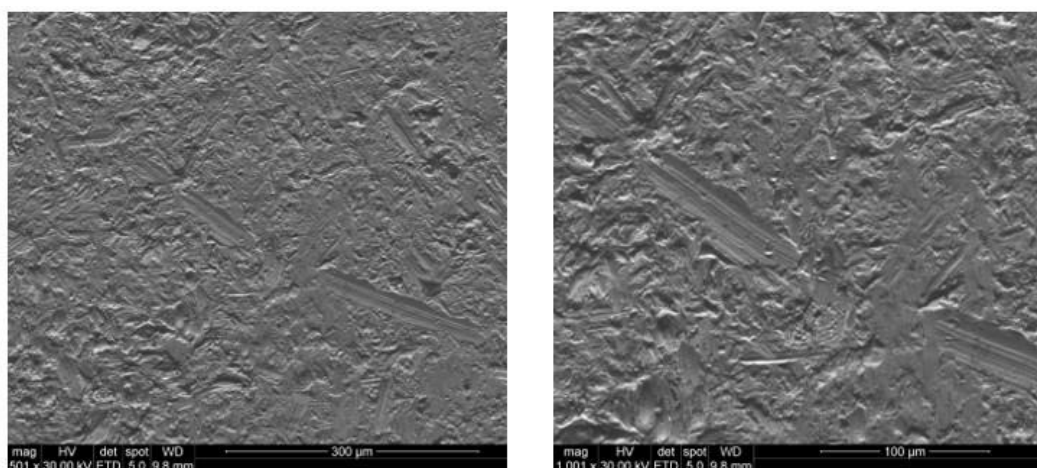
Analizy obrazów SEM ukształtowanych powierzchni w takim programie badań wskazują, że zarówno realizacja obróbki w pasywnym uchwycie przedmiotowym, jak i uchwycie aktywnym, wpływa znacząco na proces kształtowania struktury geometrycznej obrabianych powierzchni. Potwierdzają to obrazy SEM powierzchni po 45 min ich obróbki w przyjętych odmianach i warunkach technologicznych (rys.66-68).



Rys.66. Morfologia powierzchni po procesie obróbki przedmiotu w uchwycie stacjonarnym:
a) powiększenie x500, b) powiększenie x1000



Rys.67. Morfologia powierzchni po procesie obróbki z ruchem obrotowym przedmiotu:
a) powiększenie x500, b) powiększenie x1000

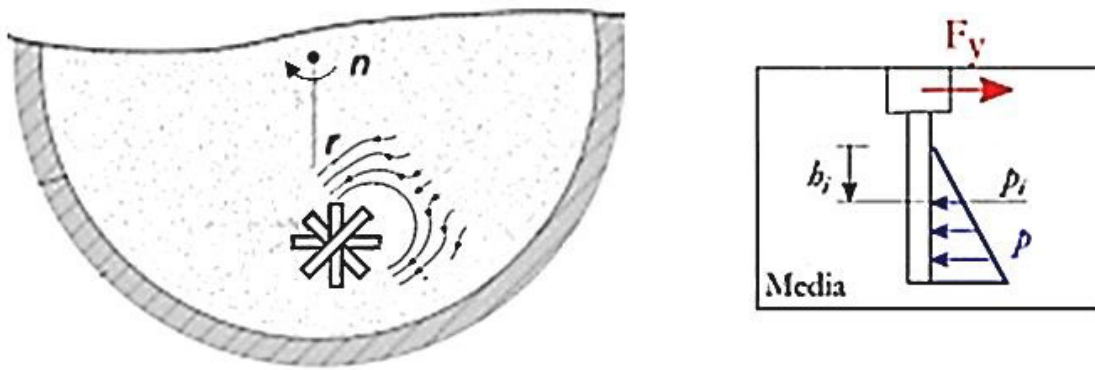


Rys.68. Morfologia powierzchni po procesie obróbki z ruchem obrotowo-wibracyjnym przedmiotu: a) powiększenie x500, b) powiększenie x1000

I tak, w przypadku obróbki w uchwycie stacjonarnym, na ukształtowanej powierzchni można wyróżnić pewne charakterystyczne elementarne zjawiska obróbkowe. Dominujący udział

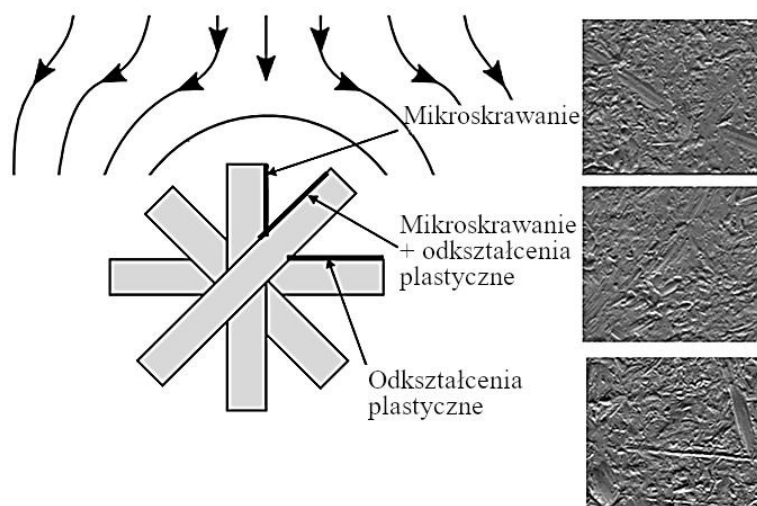
mają tu mikrozagłębienia, będące wynikiem dynamicznych kontaktów wierzchołków kształtek ściernych. Na tą strukturę podstawową, nakładają się lokalne ślady mikroskrawania i bruzdowania z nielicznymi wypływkami oraz ślady pochodzące od zarysowywania i obtaczania kształtek po powierzchni obrabianej. Dynamika tych oddziaływań jest relatywnie duża i wynika z długiego sumarycznego czasu kontaktu kształtek ściernych z powierzchnią obrabianą. W przypadku obróbki z obrotami przedmiotu obrabianego, znacząco skraca się czas chwilowych kontaktów kształtek ściernych i następuje lokalna zmiana kierunku ich działania w wyniku wzajemnie złożonego ruchu. Wynikiem tego jest lokalny wzrost głębokości śladów obróbkowych i odkształceń o charakterze plastycznym. Obrobiona powierzchnia charakteryzuje się większym stopniem rozwinięcia i relatywnie wyższą chropowatością. Natomiast w przypadku obróbki z ruchem rotacyjno - drgającym, następuje kumulacyjne oddziaływanie tych ruchów z ruchem wirowym kształtek ściernych. Skraca się czas ich chwilowych kontaktów i następuje zmiana kierunków działania. Proces kształtowania struktury powierzchniowej jest wówczas wieloczynnikowy i wysoce stochastyczny. Wynikiem tego jest zmniejszenie głębokości śladów obróbkowych i mniejsza energia odkształceń o charakterze plastycznym. Powierzchnia charakteryzuje się relatywnie najmniejszym poziomem chropowatości.

Wy tłumaczeniem tych wyników jest to, iż w przyjętym układzie kinematycznym z pionową osią obrotu przedmiotu obrabianego w uchwycie, w wyniku dynamicznych oddziaływań kształtek ściernych, na powierzchni obrabianej występują okresowo zmienne naprężenia normalne i styczne [29]. Rozkłady wartości tych naprężeń zależą od chwilowego położenia obrabianej powierzchni w ruchu obrotowym względem kierunku ruchu kształtek roboczych, a także położenia w kierunku wysokościowym (rys.69).



Rys.69. Zmiany orientacji powierzchni elementu obrabianego względem kierunku ruchu kształtek roboczych a) i rozkład ciśnienia hydrostatycznego wsadu roboczego w kierunku wysokościowym obrabianej powierzchni b)

Na powierzchni zorientowanej w kierunku normalnym do kierunku ruchu kształtek, dominującymi będą naprężenia normalne. Natomiast na powierzchni zorientowanej pod kątem np. 45° , obok naprężeń normalnych występują również naprężenia styczne. Z kolei na powierzchni zorientowanej pod kątem 90° , dominować będą naprężenia styczne. Podczas ciągłych obrotów obrabianej powierzchni, wzajemne udziały tych naprężeń ulegają ciągłym zmianom. Takie zmienne rozkłady naprężeń stycznych i normalnych na powierzchni obrabianej, wpływają na odkształcenia powierzchniowe i elementarne zjawiska obróbkowe. Ich skutkiem są określone formy i wielkości śladów obróbkowych oraz ich rozkłady powierzchniowe. Zależnie od kąta orientacji powierzchni obrabianej, generowane są zróżnicowane zjawiska obróbkowe o różnej intensywności. Wykazano, że dominujące mikroskrawanie zachodzi przy orientacji powierzchni pod kątem $\alpha=0^\circ$, gdy występują naprężenia ścinające. Stan taki ulega zmianie przy orientacji powierzchni pod kątem $\alpha=45^\circ$, przy której integracja naprężenia stycznego i normalnego, prowadzi do jednoczesnego występowania mikroskrawania i odkształceń plastycznych. Natomiast podczas prostopadłej orientacji powierzchni względem kierunku ruchu kształtek, dominują odkształcenia plastyczne wywołane naprężeniami normalnymi. Podczas postępującej orientacji kątowej, ten przebieg zmian elementarnych zjawisk obróbkowych, przebiega z uwzględnieniem podobnych zależności, jednak o odmiennej intensywności i wzajemnych relacjach (rys.70).



Rys.70. Dominujące zjawiska obróbkowe generowane przez kształtki robocze w zależności od orientacji powierzchni obrabianej względem kierunku ich ruchu

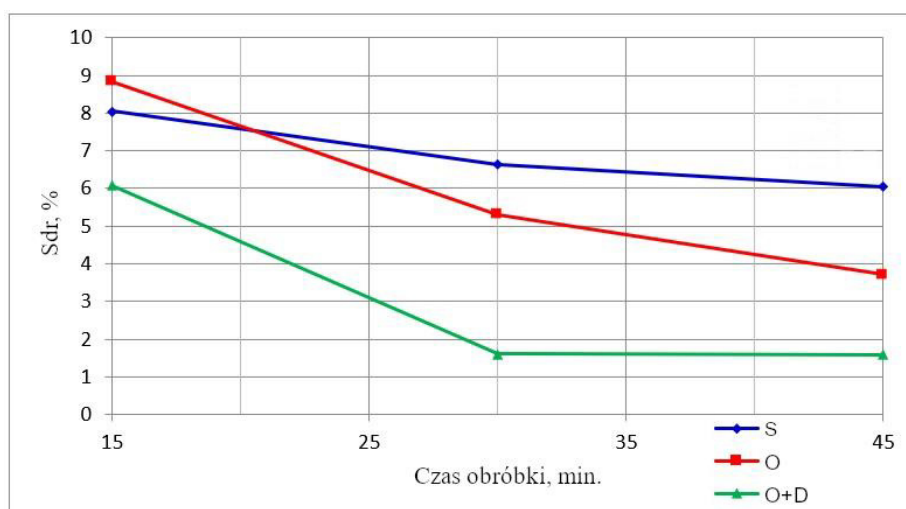
Jak wynika z powyższego, proces kształtowania chropowatości powierzchni podczas wygładzania pojemnikowego z obrotowym ruchem przedmiotu obrabianego, jest wieloczynnikowy i wysoce stochastyczny. Wynikiem tego jest zmniejszenie głębokości śladów obróbkowych i mniejsza energia odkształceń o charakterze plastycznym. Powierzchnia charakteryzuje się relatywnie najmniejszą chropowatością, w stosunku do obrabianej w uchwycie stacjonarnym. W przypadku dodania do ruchu obrotowego ruchu drgającego, następuje zmienność kontaktowych kierunków ruchu przedmiotu obrabianego i kontaktujących się z nią kształtek ściernych. To przede wszystkim wpływa na powierzchniowy rozkład śladów obróbkowych [36], stopień izotropowości powierzchni i stan odkształceń plastycznych.

Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych (tab.13).

Tab.13. Wyniki przeprowadzonych wariantów badań

Czas obróbki, minuty	Parametry SGP				
	Sa , μm	Sdr , %	I , %	Ssc , $1/\mu\text{m}$	Sdq , $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
Obróbka nieruchomego przedmiotu					
15	2,24	8,06	61,5	0,075	0,412
30	2,22	6,93	57,5	0,073	0,380
45	1,96	6,05	55,5	0,067	0,355
Obróbka z ruchem obrotowym przedmiotu					
15	2,31	8,82	60,4	0,084	0,432
30	1,98	5,30	57,1	0,061	0,331
45	1,67	3,72	44,4	0,057	0,276
Obróbka z ruchem obrotowo-wibracyjnym przedmiotu					
15	1,82	6,08	53,3	0,067	0,357
30	0,93	1,61	48,8	0,045	0,181
45	0,95	1,58	47,4	0,046	0,179

Te skumulowane oddziaływania w znaczący sposób wpływają na poszczególne cechy struktury geometrycznej powierzchni, o czym świadczy analiza zmian wartości parametru *Sdr*, charakteryzującego zmiany stopnia rozwinięcia powierzchni w czasie trwania procesu obróbkowego (rys.71).



Rys.71. Zmiany wartości parametru *Sdr* określającego rozwinięcie powierzchni w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu: S- bez ruchu, O- z ruchem obrotowym, O+D- z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki

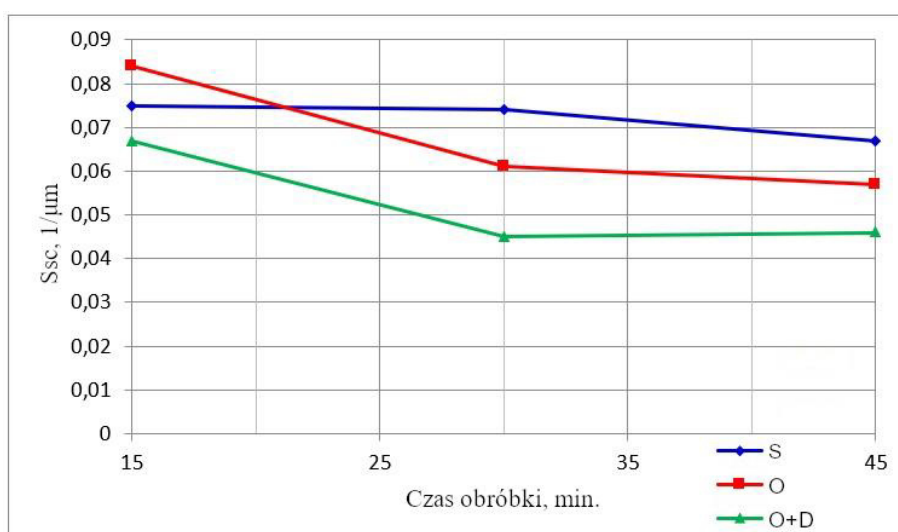
Dla wszystkich rozpatrywanych sposobów obróbki, widoczny jest tu spadek wartości parametru *Sdr* wraz ze wzrostem czasu obróbki. Stopień rozwinięcia powierzchni zmniejsza się w wyniku nakładania się kolejnych śladów obróbkowych o zróżnicowanych głębokościach, co prowadzi do sukcesywnego wygładzania powierzchni. Najniższą intensywność zmian stopnia rozwinięcia powierzchni obserwuje się dla przedmiotu obrabianego w uchwycie stacjonarnym (S) ($Sdr=8,06-6,05\%$). Znacznie większa intensywność obróbki występuje w odniesieniu do przedmiotu wykonującego ruch obrotowy (O) ($Sdr=8,82-3,72\%$). Zdecydowanie największą intensywnością charakteryzuje się tu sposób obróbki ze skumulowanym obrotowo-wibracyjnym ruchem przedmiotu obrabianego (O+D) ($Sdr=6,08-1,58\%$). Zmiany stopnia rozwinięcia powierzchni wynikają z ilości, energii i czasów kontaktów kształtek z powierzchnią obrabianą oraz zmienności kierunków ich działania.

Dodatkową istotną wiedzę o zjawiskach wpływających na transformację struktury geometrycznej powierzchni w rozpatrywanych sposobach obróbki, umożliwia analiza

charakterystycznych cech wierzchołków nierówności z wykorzystaniem następujących parametrów:

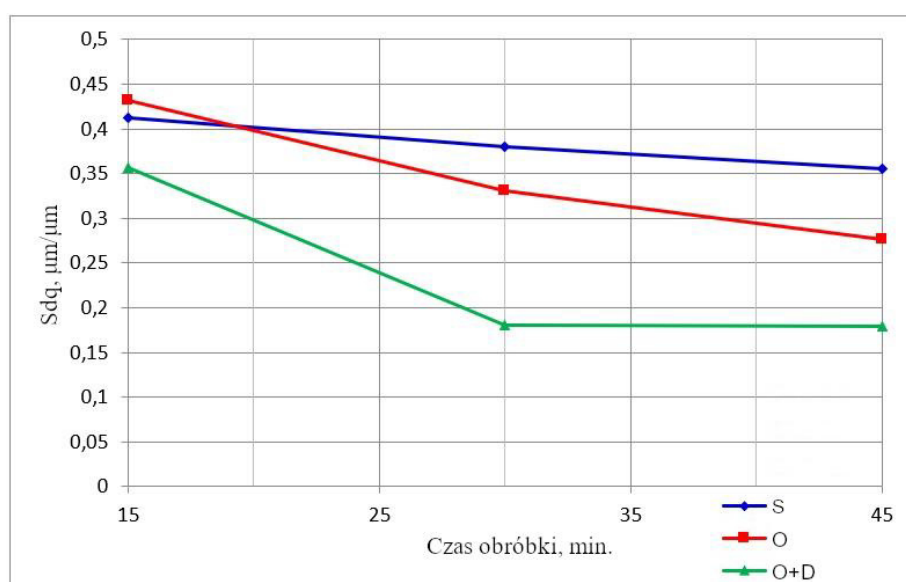
- Ssc - średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków nierówności,
- Sdq - średniokwadratowe nachylenie nierówności.

Analiza zmian wartości parametru Ssc w funkcji czasu obróbki (rys.72), wskazuje na ciągły wzrost wartości krzywizn wierzchołków, które są opisywane zależnością $1/Ssc$, $1/\mu\text{m}$, co jest wynikiem postępującego procesu wygładzania zwłaszcza wierzchołków nierówności. Wzrost ten jest zróżnicowany w odniesieniu do badanych sposobów obróbki. W przypadku obróbki przedmiotu w uchwycie stacjonarnym (S), wzrost ten jest relatywnie najmniejszy ($Ssc=0,075-0,067$ $1/\mu\text{m}$). Natomiast w przypadku przedmiotów wykonujących dodatkowe ruchy pomocnicze, wzrost promieni krzywizn nierówności charakteryzuje się większą intensywnością. I tak, w przypadku ruchów obrotowych przedmiotu (O), spadek wartości tego parametru wynosi ($Ssc=0,084-0,57$ $1/\mu\text{m}$). Natomiast zdecydowanie największy wzrost wielkości krzywizn wierzchołków nierówności, występuje w przypadku zintegrowanych ruchów obrotowo - wibracyjnych przedmiotu (O+D) ($Ssc=0,067-0,046$ $1/\mu\text{m}$). Zarazem są to największe wartości krzywizn wierzchołków nierówności w zakresie prowadzonych badań. W obu ostatnich przypadkach, jest to wynikiem zmian form oddziaływań kontaktowych kształtek roboczych z powierzchnią przedmiotu obrabianego oraz zmian skutków ich oddziaływań, w postaci śladów obróbkowych.



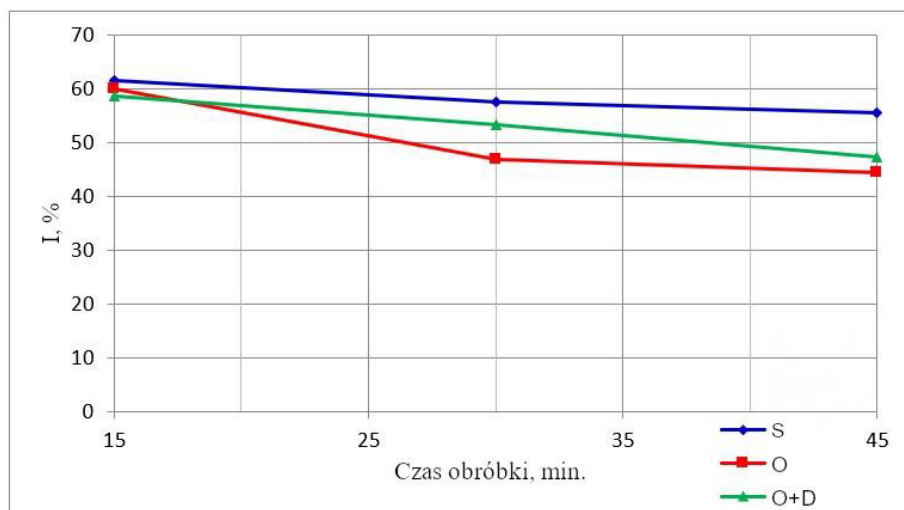
Rys.72. Zmiany wartości parametru Ssc charakteryzującego średniokwadratowe nachylenie nierówności w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu: S- bez ruchu, O -z ruchem obrotowym, O+D z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki

Zmiany sposobu kształtowania chropowatości powierzchni obrabianych, w istotny sposób wpływają też na wartości parametru Sdq charakteryzującego średniokwadratowe nachylenie nierówności w funkcji czasu obróbki, czyli kąty wierzchołkowe (rys.73). Jest to przede wszystkim wynikiem postępującego wygładzania powierzchni i zmieniających się kształtów wierzchołków nierówności. W rozpatrywanych przypadkach, ponownie najmniejsze wartości kątów wierzchołkowych nierówności występują podczas obróbki ze zintegrowanym obrotowo-wibracyjnym ruchem przedmiotu (O+D) ($Sdq=0,357-0,179 \mu\text{m}/\mu\text{m}$), przy nieco większych ich wartościach przy ruchu obrotowym przedmiotu (O) ($Sdq=0,432-0,276 \mu\text{m}/\mu\text{m}$). Największe wartości kątów nierówności, występują w przypadku obróbki przedmiotu w uchwycie stacijnarnym (S) ($Sdq=0,412-0,355 \mu\text{m}/\mu\text{m}$).



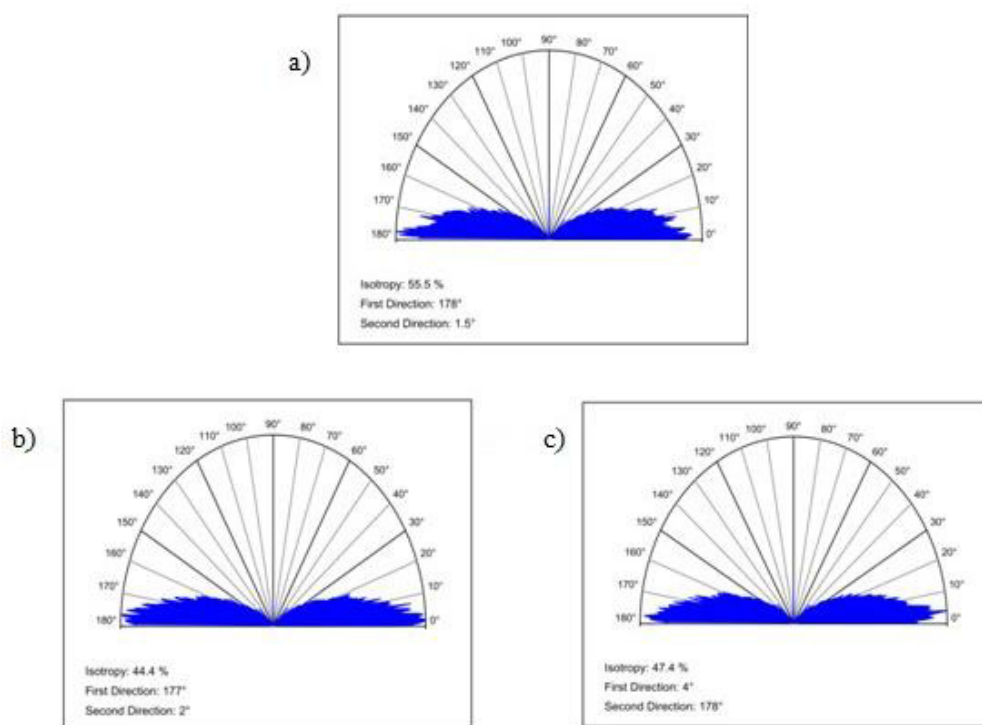
Rys. 73. Zmiany wartości parametru Sdq charakteryzującego średniokwadratowe nachylenie wierzchołków nierówności powierzchni w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu: S- bez ruchu, O -z ruchem obrotowym, O+D z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki

Zróznicowane elementarne zjawiska obróbkowe wpływające na proces kształtowania chropowatości wygładzanych powierzchni, wpływają również na stopień ich izotropowości I (rys.74).



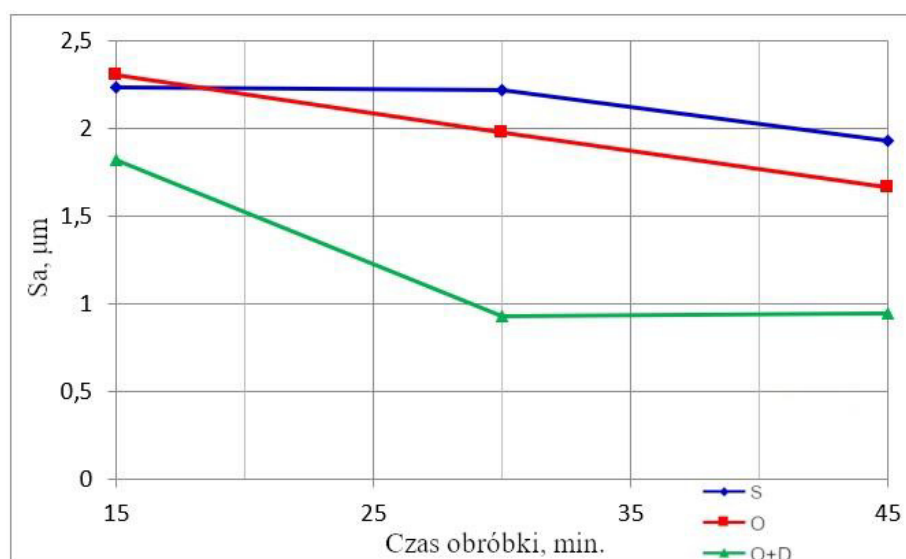
Rys. 74. Zmiany stopnia izotropowości struktury geometrycznej powierzchni I w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu: S- bez ruchu, O -z ruchem obrotowym, O+D z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki

Na podstawie tych danych można twierdzić, że w każdym z badanych przypadków stopień izotropowości obrabianych powierzchni, obniża się wraz ze wzrostem czasu obróbki. Najwyższym stopniem izotropowości, charakteryzuje się powierzchnia przedmiotu obrabianego w uchwycie stacjonarnym (S) ($I=55,5\%$). To można uzasadnić wielokierunkowością względnych ruchów przedmiotów obróbkowych i kontaktów kształtek ściernych, na powierzchni wykonującej ten złożony ruch w przestrzeni roboczej wygładzarki. Najniższą wartością wskaźnika izotropowości, charakteryzuje się powierzchnia wykonująca ruch obrotowy (O), który powoduje ukierunkowanie śladów obróbkowych ($I=44,4\%$). Natomiast złożony ruch względny kształtek roboczych i przedmiotu obrabianego (O+D), również nie zapewnia wzrostu izotropowości. Należy również podkreślić, że we wszystkich przypadkach, wartości wskaźnika stopnia izotropowości powierzchni wykazują niewielkie różnice. To jest wynikiem odmiennego mechanizmu kształtowania chropowatości powierzchni, wynikającego z innych wzajemnych relacji śladów mikroskrawania, zarysowywania, a zwłaszcza bruzdowania. Należy jednak podkreślić, że rozkłady wartości wskaźnika izotropowości I dla tych rozpatrywanych sposobów obróbkim mają zbliżoną postać (rys.75).



Rys.75. Zmiany stopnia izotropowości struktury geometrycznej powierzchni I w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu a) bez ruchu, b) z ruchem obrotowym, c) z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki

Zmiany stopnia rozwinięcia powierzchni i stopnia jej izotropowości podczas obróbki, wpływają na wartości parametru Sa , charakteryzującego średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni. Potwierdzają to wykresy, opisujące transformację wartości parametru Sa w postępującym czasie procesu obróbki (rys.76).



Rys. 76. Zmiany wartości parametru Sa określającego średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu S- bez ruchu, O- z ruchem obrotowym, O+D- z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki

Widoczny jest tu spadek wartości parametru Sa wraz ze wzrostem czasu obróbki, niezależnie od jej sposobu. W przypadku przedmiotu obrabianego w uchwycie stacjonarnym (S), ta intensywność jest relatywnie mała ($Sa=2,24-1,93 \mu m$), co wynika z losowych kontaktów kształtek ściernych z powierzchnią obrabianą. ta intensywność jest nieco większa. W przypadku przedmiotu wykonującego ruch obrotowy (O), ta intensywność jest nieco zwiększona, co jest spowodowane specyfiką chwilowych kontaktów obróbkowych kształtek, wynikających z łączonego ruchu wirowego wsadu roboczego i obrotów przedmiotu. Kumulacyjny skutek obróbkowy w okresie 45 min, nie zapewnia jednak znaczącej poprawy jakości powierzchni obrabianej ($Sa=2,37-1,67 \mu m$). Najwyższą efektywność obróbki, zapewnia skumulowany jednoczesny obrotowy i wibracyjny ruch przedmiotu obrabianego (O+D), zapewniający krótkie czasy oddziaływań kształtek. W tym przypadku, następuje znaczące obniżenie chropowatości powierzchni już w okresie 30 min i dalsza jej stabilizacja w ciągu kolejnych 15min ($Sa=1,82-0,95 \mu m$). Jest to najbardziej korzystny sposób obróbki wśród rozpatrywanych.

Efektywność procesu wygładzania obrabianych powierzchni w funkcji rodzaju ruchu przedmiotu obrabianego, obliczono z następującej zależności:

$$\Delta Sx = \frac{Sx(0) - Sx(45)}{Sx(0)} \times 100, \% \quad (6)$$

gdzie: $Sx(0)$ - parametr chropowatości powierzchni wyjściowej,

$Sx(45)$ - parametr chropowatości powierzchni po zakończeniu obróbki.

Tab.14. Wartości parametru ΔSa i ΔSdr dla badanych sposobów obróbki

Sposób obróbki	Parametry struktury geometrycznej powierzchni	
	$\Delta Sa, \%$	$\Delta Sdr, \%$
Obróbka bez ruchu	$\Delta Sa=13,8\%$	$\Delta Sdr=24,9\%$
Obróbka z obrotami p.o.	$\Delta Sa=27,7\%$	$\Delta Sdr=57,8\%$
Obróbka z obrotami i drganiami	$\Delta Sa=47,8\%$	$\Delta Sdr=74,0\%$

To pokazuje w sposób ilościowy intensywność zmian wartości parametrów chropowatości obrabianych powierzchni Sa i Sdr , w zależności od sposobu prowadzonej obróbki w odniesieniu do rodzaju ruchu wykonywanego przez przedmiot obrabiany. Widać, że szczególnie widoczne obniżenie wartości parametru Sa występuje w przypadku sposobu obróbki z zastosowaniem zintegrowanych obrotów i drgań przedmiotu obrabianego. Ten

sposób obróbki wpływa również na większą intensywność obniżania stopnia rozwinięcia obrabianej powierzchni charakteryzowaną parametrem *Sdr*. Wartości te są znacząco większe, w porównaniu do sposobu obróbki jedynie z obrotami przedmiotu obrabianego, a szczególnie w odniesieniu do obróbki prowadzonej bez dodatkowego ruchu przedmiotu..

Wiedza ta może stanowić podstawy do zoptymalizowanego projektowania uchwytów przedmiotowych do stosowania w rotacyjnych wygładzarkach pojemnikowych, umożliwiających zwiększenie efektywności obróbki i skrócenia jej czasu. Trzeba jednak traktować wyniki tych badań, jako rozpoznawcze i odniesione do obróbki próbek płasko-równoległych. W przypadku przedmiotów o złożonych kształtach, pożądane będzie nie tylko poszukiwanie ich korzystnej orientacji przestrzennej we wsadzie roboczym, np. kąt pochylenia).. Konieczne będzie także określenie czasów obróbki, w zależności od rodzaju materiału obrabianego oraz oczekiwanej końcowej chropowatości powierzchni, jej i stopnia izotropowości.

Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych procesu wygładzania rotacyjno-kaskadowego elementów ze stali AISI 304, mocowanych w aktywnym uchwycie z ruchem obrotowym i obrotowo-wibracyjnym oraz w uchwycie stacjonarnym, wskazują na istotne różnice w mechanizmie kształtowania chropowatości obrabianych powierzchni. Różnice te wynikają ze zróżnicowanego względnego kierunku ruchu kształtek ściernych z powierzchnia obrabianą, czasu ich kontaktu i ilości skumulowanych kontaktów. W tym aspekcie najbardziej korzystny wariant kształtowania chropowatości powierzchni, zapewnia proces realizowany z obrotowo-wibracyjnym ruchem przedmiotu obrabianego. Można zatem powiedzieć, że rotacyjno-kaskadowe wygładzanie przedmiotów zamocowanych w uchwycie, stwarza dodatkowe możliwości technologicznego rozwoju tego procesu obróbki. Z uwagi na rozszerzenie możliwości sterowania tym procesem za pomocą prędkości obrotowej oraz amplitudy i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego i prędkości wirowania wsadu roboczego, powstają nowe możliwości optymalizacji tych procesów, zarówno w zakresie kształtowania chropowatości powierzchni, jak i wydajności procesu obróbki.

Wnioski z przeprowadzonych badań wstępnych

Na podstawie uzyskanych wyników z badań oraz przeprowadzonych analiz, można stwierdzić, że:

1. Mechanizm kształtowania chropowatości powierzchni w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem aktywnego i stacjonarnego uchwytu

- przedmiotowego, w dużym stopniu zależy od rodzaju ruchów pomocniczych, nadanych przedmiotowi obrabianemu.
2. Ruchy te w istotny sposób wpływają na kształtowanie śladów obróbkowych pochodzących od elementarnych zjawisk obróbkowych w postaci mikroskrawania, zarysowywania, bruzdowania, kraterowania, które wpływają na mechanizm kształtowania chropowatości obrabianych powierzchni.
 3. Efektywność wygładzania obrabianych powierzchni w procesie obróbki w wariancie bez ruchu przedmiotu obrabianego $\Delta Sa=13,8\%$, w wariancie z ruchem obrotowym przedmiotu $\Delta Sa=27,7\%$, natomiast w wariancie ze zintegrowanym ruchem obrotowo-wibracyjnym przedmiotu $\Delta Sa=47,8\%$.
 4. Chropowatość powierzchni przedmiotów obrabianych z ruchem obrotowym i zintegrowanym ruchem obrotowo-wibracyjnym, charakteryzuje się wyraźnie mniejszym stopniem rozwinięcia Sdr ($1,58\%$), w porównaniu z przedmiotami obrabianymi w sposób stacjonarny Sdr ($6,05\%$). Wraz ze wzrostem czasu obróbki, stopień rozwinięcia powierzchni zmniejsza się, przy czym ten kierunek zmian jest szczególnie widoczny w przypadku ruchu obrotowo-wibracyjnego przedmiotu obrabianego.
 5. Powierzchnie obrabiane z dodatkowymi ruchami przedmiotu obrabianego, charakteryzują się również większymi krzywiznami wierzchołków nierówności, opisanymi odwrotnością wartości parametru Ssc . W wariancie obróbki bez ruchu przedmiotu $Ssc=0,067$ $1/\mu m$ z obrotami przedmiotu $Ssc=0,057$ $1/\mu m$, zaś w wariancie z ruchem obrotowo-wibracyjnym przedmiotu $Ssc=0,046$ $1/\mu m$.
 6. W rozpatrywanych przypadkach, najmniejsze wartości kątów wierzchołków nierówności występują w wariancie obróbki ze zintegrowanym obrotowo-wibracyjnym ruchem przedmiotu $Sdq=0,179$ $\mu m/\mu m$, przy nieco większych ich wartościach w wariancie z ruchem obrotowym przedmiotu $Sdq=0,276$ $\mu m/\mu m$. Największe wartości kątów wierzchołków, występują w przypadku obróbki przedmiotu bez ruchu $Sdq=0,355$ $\mu m/\mu m$.
 7. Wszystkie te cechy, wpływają na stopień izotropowości obrabianych powierzchni określany parametrem I . Daje się jednak zaobserwować wpływ dodatkowych ruchów przedmiotu obrabianego na nieznaczne zmniejszenie stopnia izotropowości struktury powierzchniowej. W wariancie obróbki bez ruchu przedmiotu $I=55,5\%$, w wariancie z ruchem obrotowym przedmiotu $I=44,4$, natomiast w wariancie obróbki ze zintegrowanym ruchem obrotowo-wibracyjnym przedmiotu $I=47,4$ %.

8. Na podstawie tej wiedzy, można jednoznacznie twierdzić, iż w procesie wygładzania realizowanego w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem uchwytu przedmiotowego, najlepsze efekty w zakresie kształtowania chropowatości osiąga się z zastosowaniem ruchów obrotowo-wibracyjnych przedmiotu obrabianego.
9. Ten sposób obróbki, zapewnia także znacząco większą intensywność obróbki, w porównaniu z obróbką zrealizowaną z samymi obrotami przedmiot, a zwłaszcza z obróbką w stanie stacjonarnym. To synergiczny efekt wpływu złożonego układu wzajemnych ruchów przedmiotu i kształtek roboczych, wielości i odmienności elementarnych zjawisk występujących w strefie obróbki.
10. Wobec powyższego, wariant obróbki z zastosowaniem ruchu obrotowo-wibracyjnego przedmiotu obrabianego, zostanie przeanalizowany w kolejnym etapie badań, realizowanych z zastosowaniem kształtek roboczych o zróżnicowanym poziomie skrawalności.

5.5. Badania wpływu zintegrowanego ruchu obrotowo - wibracyjnego przedmiotu obrabianego na kształtowanie chropowatości powierzchni obrabianych elementów ze stali AISI 304

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych, była analiza sposobu kształtowania chropowatości powierzchni w procesie wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, z zastosowaniem zintegrowanych obrotowo-wibracyjnych ruchów przedmiotu zamocowanego w uchwycie oraz ocena intensywności i efektywności obróbki. Odniesiono je do prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f . Taki zakres badań eksperymentalnych, umożliwiał analizę przebiegu procesu powierzchniowego wygładzania w przyjętych wariantach technicznych i pozwalał określić wpływ sposobu oddziaływania kształtek ściernych na kształtowanie chropowatości powierzchni obrabianej.

Badania przeprowadzono w dwóch etapach z zastosowaniem dwóch rodzajów kształtek charakteryzujących się różną intensywnością obróbki:

- kształtki ściernie ze spoiwem ceramicznym oznaczone symbolem GP10x10BD (wg. AVALON) charakteryzujące się dużą skrawnością i intensywnością obróbkową, służące do wstępnej obróbki powierzchniowej,
- kształtki ze spoiwem żywicznym oznaczone symbolem 02PP10 (wg. AVALON) przeznaczone do wygładzającej obróbki powierzchniowej.

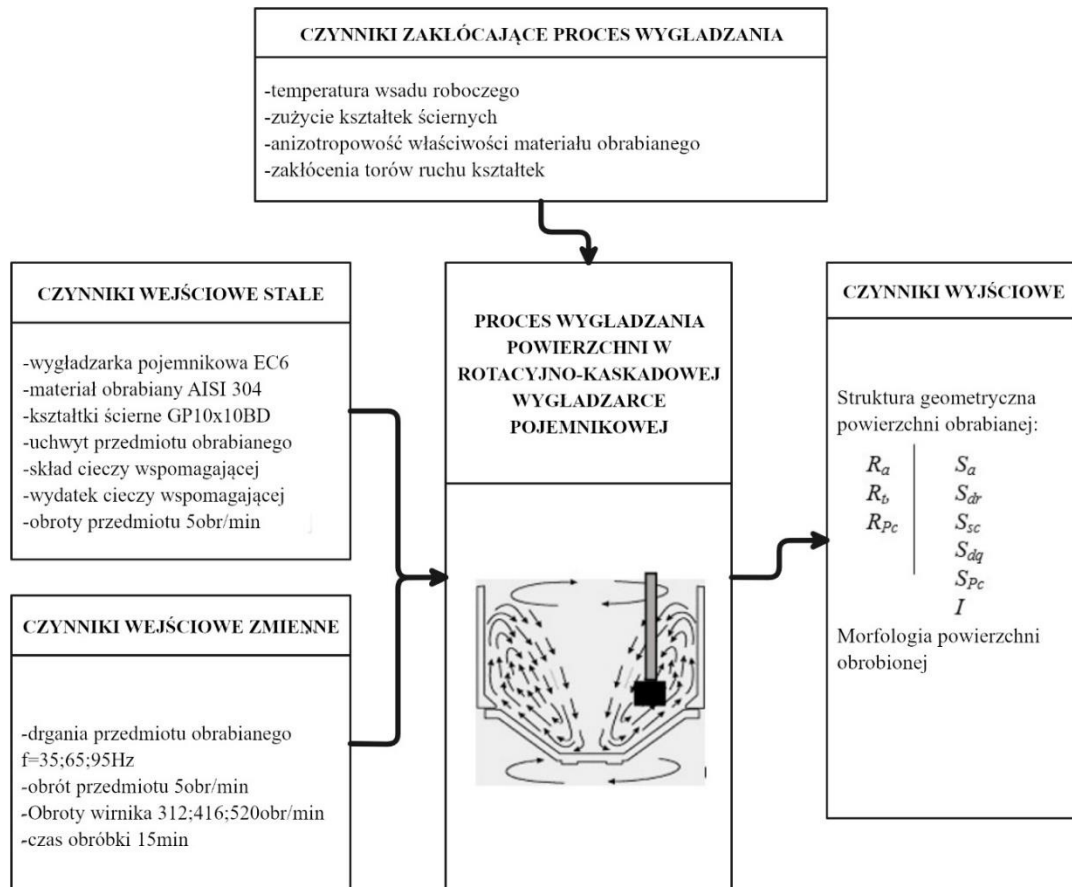
5.5.1. Badania wpływu zintegrowanego ruchu obrotowo - wibracyjnego przedmiotu obrabianego na kształtowanie chropowatości powierzchni w intensywnym procesie obróbki

Celem tego etapu badań, realizowanego z zastosowaniem kształtek ściernych charakteryzujących się dużą intensywnością obróbki GP10x10BD (rys.77), była ocena ich przydatności do obróbki wstępnej z zastosowaniem ruchu obrotowo-wibracyjnego przedmiotu obrabianego. Wsad roboczy z zastosowaniem tych kształtek wynosił ok.5 kg.



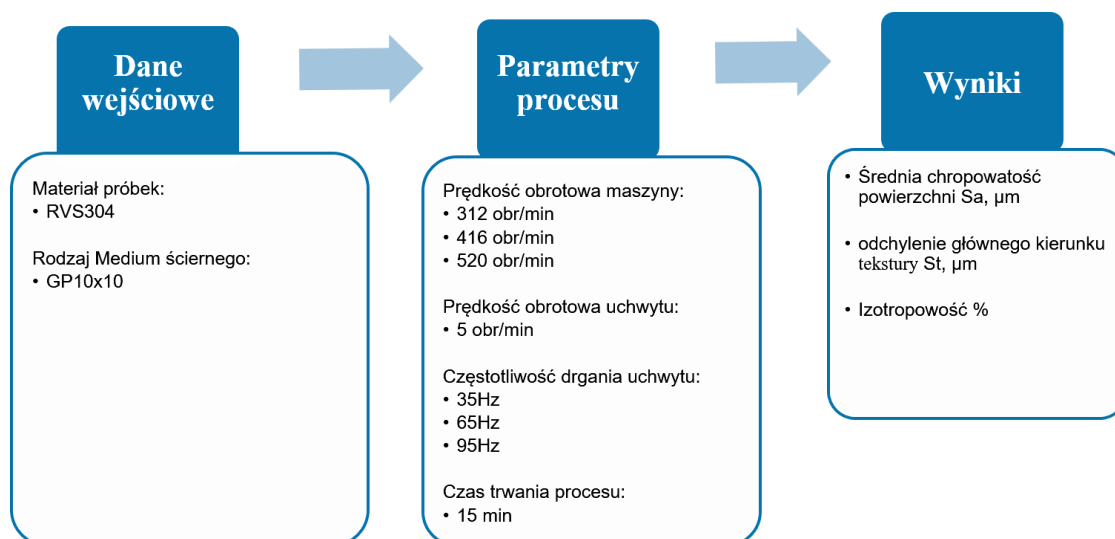
Rys. 77. Ceramiczne kształtki ścierne GP10x10 BD (graniastosłup pochyły)

Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia w badaniach intensywnej i wygładzającej obróbki przedstawia (rys.78).



Rys.78. Schemat obiektu badań intensywnej oraz wygładzającej obróbki powierzchniowej

Podobnie jak w etapie pierwszym, badano przedmioty o kształcie płasko-równoległym o wymiarach 30x20x3mm wykonane ze stali nierdzewnej ANSI.304 o chropowatości wyjściowej $Sa=2,52\mu\text{m}$ i $Sdr=7,74\%$. Badania przeprowadzono w czasie 15 min. Do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni zastosowano profilometr stykowy HommelTester T8000. Dla wszystkich analizowanych przypadków, badane próbki po zamocowaniu w obrotowo-wibracyjnym uchwycie, były umieszczane w obszarze największego poziomu energetycznego wsadu roboczego, występującego przy danej prędkości obrotowej. Parametry i warunki badań przedstawiono na rys.79.



Rys.79. Parametry i warunki badań intensywnej oraz wygładzającej obróbki powierzchniowej

Badania przeprowadzono z zastosowaniem trójpoziomowego planu eksperymentu, umożliwiające wyznaczenie nieliniowego modelu matematycznego procesu wygładzania stali AISI 304 w przyjętych warunkach technologicznych [26]. Zastosowano oprogramowanie Experiment Planner 1.0. Do opisu obiektu badań przyjęto funkcję eksponentyjalną o postaci $f(x)=e^x$, czyli funkcję wykładniczą o podstawie równej logarytmowi naturalnemu. Wykonano trzy powtórzenia eksperymentu dla każdego zestawu prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f . Liczba powtórzeń została wyznaczona na podstawie estymacji średniej z populacji.

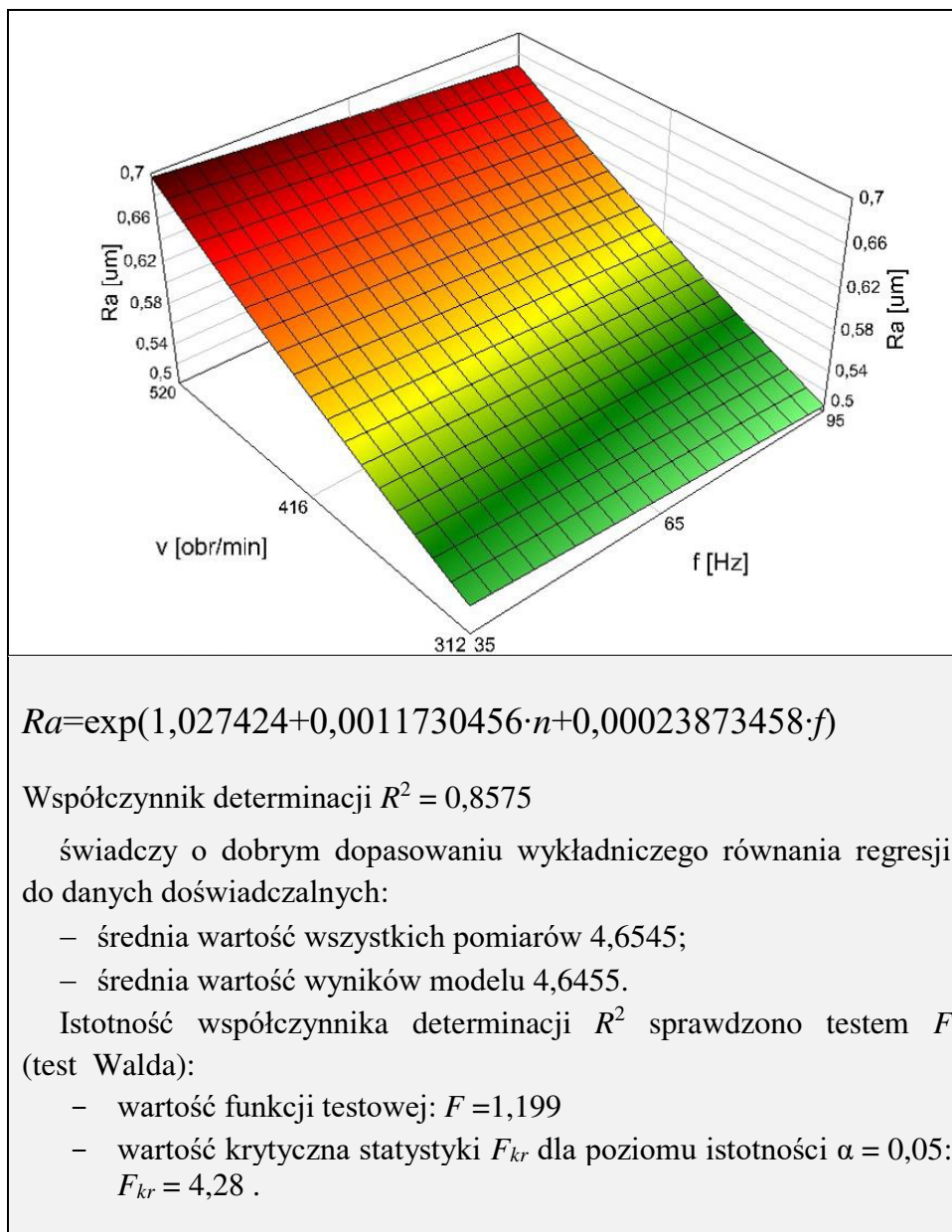
Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tab.15.

Tab.15. Wyniki badań wpływu prędkości obrotowej wirnika wygładzarki EC6 i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego na wybrane parametry profilu chropowatości powierzchni

lp.	n , obr/min	t , min	$n_{p.}$, obr/min	f , Hz	R_a , μm	R_t , μm	R_{pc} , 1/cm
1	312	15	5	35	3,26	4,86	175,29
2	312	15	5	35	4,51	8,52	147,38
3	312	15	5	35	5,88	9,21	156,54
4	312	15	5	65	4,25	7,37	165,60
5	312	15	5	65	3,33	6,25	172,48
6	312	15	5	65	3,89	7,29	151,07
7	312	15	5	95	3,84	6,62	162,77
8	312	15	5	95	3,87	6,58	141,68
9	312	15	5	95	4,25	7,53	156,51
10	416	15	5	35	4,30	9,68	102,79
11	416	15	5	35	4,24	6,75	164,13
12	416	15	5	35	3,69	6,79	196,15
13	416	15	5	65	4,62	7,38	158,39
14	416	15	5	65	5,00	9,47	155,61
15	416	15	5	65	4,85	7,11	172,26
16	416	15	5	95	5,14	8,41	163,16
17	416	15	5	95	5,08	11,34	146,25
18	416	15	5	95	4,37	6,17	212,20
19	520	15	5	35	5,31	8,47	163,46
20	520	15	5	35	5,45	8,37	139,61
21	520	15	5	35	4,83	8,34	167,06
22	520	15	5	65	5,37	8,79	162,10
23	520	15	5	65	5,17	7,53	181,86
24	520	15	5	65	5,51	8,66	182,83
25	520	15	5	95	5,64	10,01	177,14
26	520	15	5	95	4,97	7,78	192,18
27	520	15	5	95	4,95	7,57	191,26

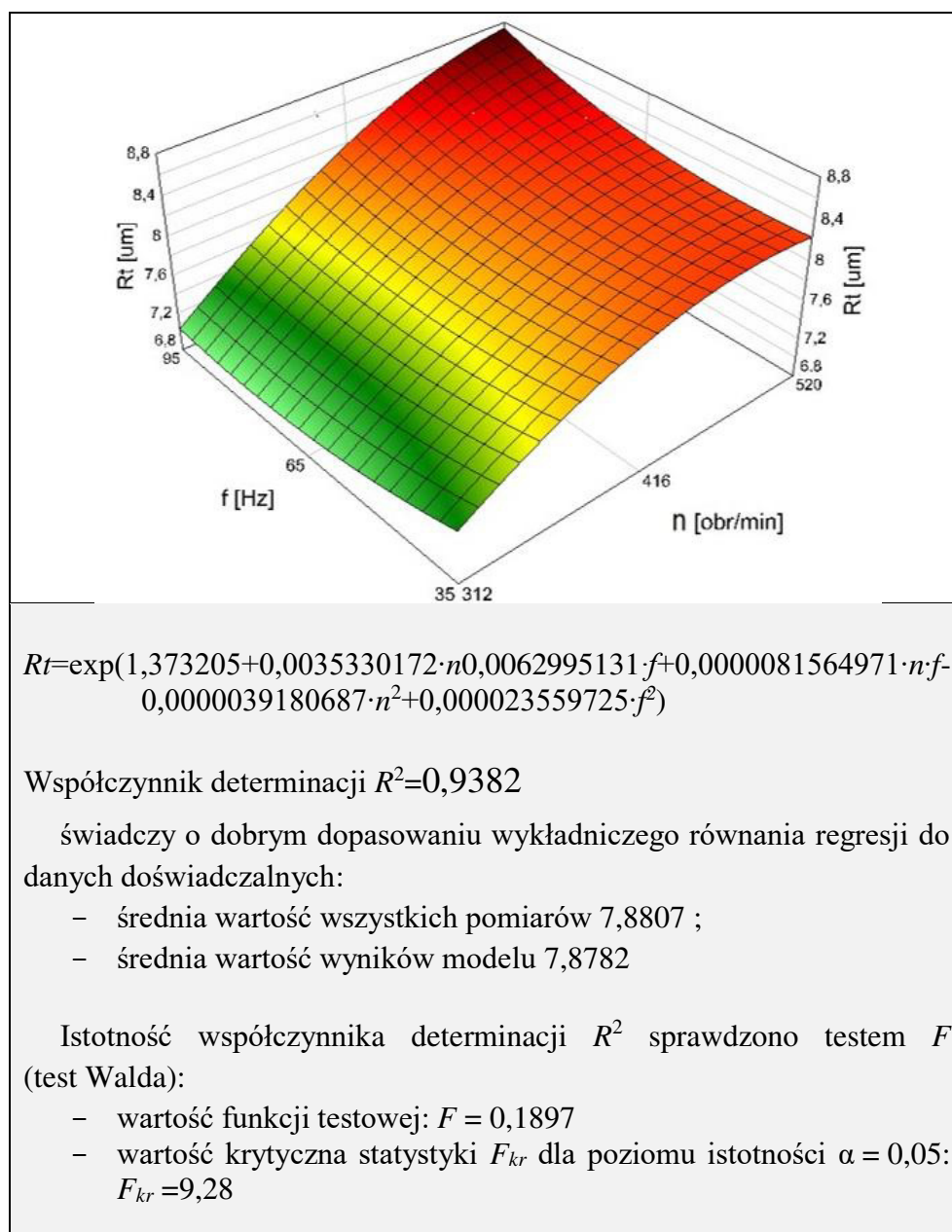
Analiza otrzymanych wyników wskazuje na znaczący wpływ prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n oraz częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f , na proces kształtowania chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego. Odnosi się to zarówno do wartości parametrów wysokościowych Ra charakteryzującego średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości i Rt charakteryzującego całkowitą wysokość profilu chropowatości, jak i parametru horyzontalnego RPc charakteryzującego liczebność wierzchołków profilu chropowatości na długości jednostkowej. Wynika to z dynamiki i kierunku oddziaływań aktywnych kształtek roboczych, rozkładu śladów obróbkowych w skumulowanym ruchu wirowym kształtek ściernych i drgań przedmiotu. Analiza przebiegu zmian wartości parametru Ra wskazuje, że wartości tego parametru są silniej uzależnione od prędkości wirnika wygładzarki n i jego najniższa wartość występuje przy najmniejszej prędkości obrotowej z badanego przedziału $n=312$ obr/min. Jest to niewątpliwie wynikiem mniejszej intensywności oddziaływań kształtek ściernych, co wpływa na mniejsze zagłębienia śladów obróbkowych, w tym śladów posiadających kształt lokalnych kraterów. Natomiast w odniesieniu do częstotliwości drgań przedmiotu f zależność ta jest znacząco słabsza, chociaż wraz z jej wzrostem, wartości parametru Ra ulegają wyraźnemu obniżeniu i osiągają najniższą wartość dla $f=95$ Hz. W tym przypadku decydujący wpływ ma zagęszczenie śladów obróbkowych i zmienna ich orientacja, co wynika ze złożonej kinematyki ruchu kształtek roboczych w kontakcie z powierzchnią obrabianą.

Należy zaznaczyć, że największą wartość parametru Ra obserwuje się przy największej wartości obrotowej wirnika napędowego wsadu roboczego n i najniższych częstotliwościach ruchu drgającego f przedmiotu obrabianego. W tym przypadku, generowane są ślady obróbkowe charakteryzujące się największymi względnymi głębokościami. Na rys.80 przedstawiono model matematyczny wpływu prędkości obrotowej wirnika wygładzarki EC6 na kształtowanie wartości parametru Ra .



Rys. 80 Zmiany wartości parametru Ra charakteryzującej średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości w funkcji prędkości obrotowej n wirnika napędowego wsadu roboczego i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f

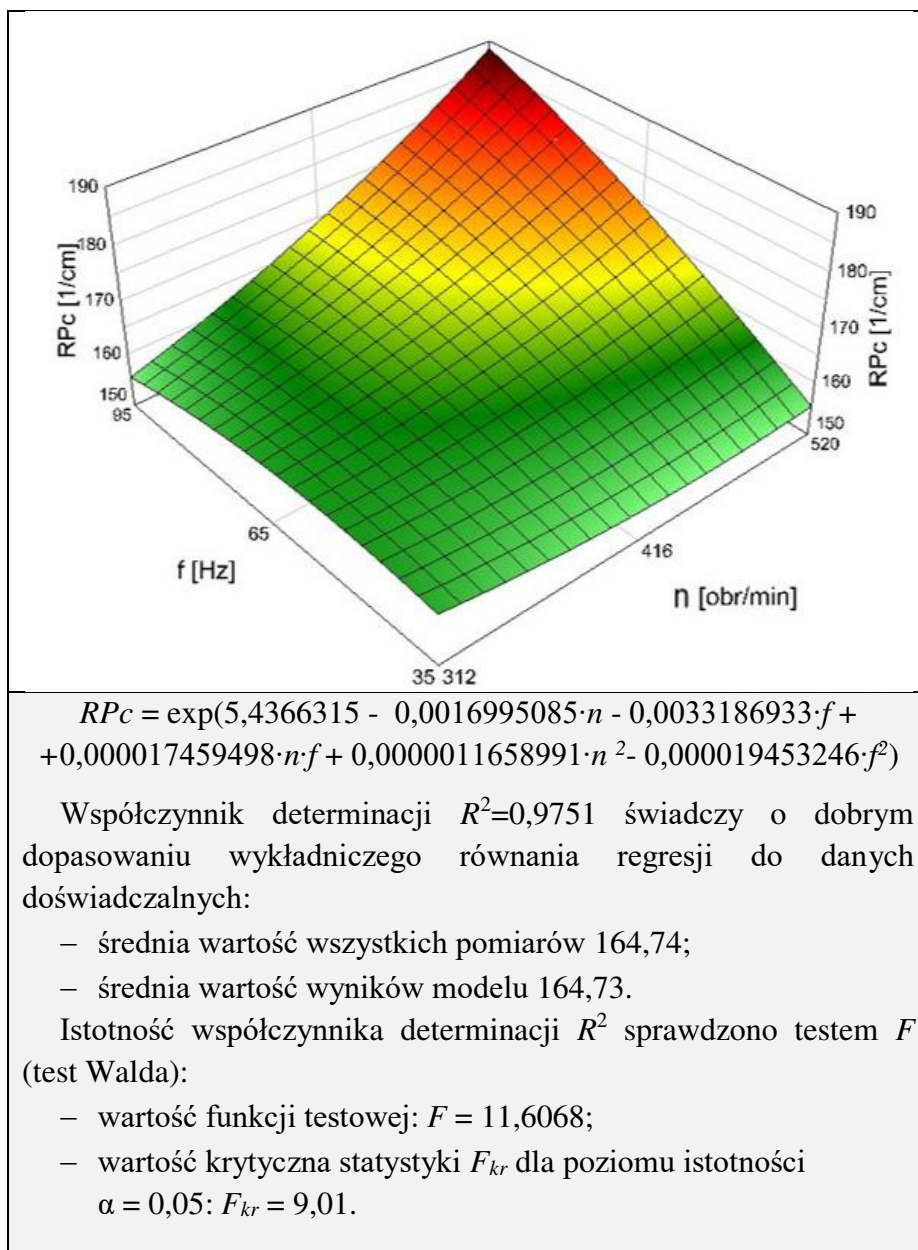
Przebieg zmian wartości parametru Rt charakteryzującego całkowitą wysokość profilu chropowatości, charakteryzuje się podobną formą zależności i w tym przypadku również jego wartość obniża się wraz ze zmniejszeniem prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n generującego ruch wirowy wsadu obróbkowego oraz ze wzrostem częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f . Model matematyczny wpływu prędkości obrotowej wirnika wygładzarki EC6 na kształtowanie wartości parametru Rt przedstawia rys.81.



Rys.81. Zmiany wartości parametru R_t charakteryzującego całkowitą wysokość profilu chropowatości w funkcji prędkości obrotowej n wirnika napędowego wsad roboczy i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f

O takich zależnościach decydują te same mechanizmy i zjawiska obróbkowe, jak to ma miejsce w odniesieniu do parametru R_a . Należy jednak zauważyć, iż najwyższe wartości nierówności występują w tym przypadku przy największej prędkości obrotowej n i największej częstotliwości ruchu drgającego f . Jest to stan największej intensywności obróbki i dynamicznych oddziaływań kształtek roboczych. W tych warunkach technologicznych powstające struktury powierzchniowe są silnie uzależnione od głębokości powstających śladów obróbkowych.

Analiza wartości parametru RP_c charakteryzującego liczbę wierzchołków na jednostkowej długości profilu chropowatości wskazuje, że wartość ta w głównej mierze wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości ruchu drgającego przedmiotu f i wzrostem prędkości obrotowej wirnika n wprowadzającego w ruch kształtki ściernie. Jest to wynikiem wzrastającej liczby kontaktów kształtek z powierzchnią obrabianą i intensywnością ich lokalnych oddziaływań na powierzchnię obrabianą. Model matematyczny tej zależności przedstawiono na rys.82.



Rys.82. Zmiany wartości parametru RP_c charakteryzującego liczbę wierzchołków na jednostkowej długości profilu chropowatości w funkcji prędkości obrotowej n wirnika napędowego wsadu roboczego i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f

Przedstawione powyżej wyniki badań prezentują w sposób ilościowy zależność wpływu zmian parametrów struktury geometrycznej obrabianych powierzchni w procesie wygładzania, w zależności od parametrów technologicznych obróbki, które stanowią prędkość obrotowa wirnika napędowego wygładzarki n i częstotliwość ruchu drgającego przedmiotu obrabianego f .

Wnioski z przeprowadzonych badań

Analiza wyników przeprowadzonych w powyższym zakresie badania, pozwala sformułować następujące wnioski:

1. Skumulowane ruchy drgające f przedmiotu obrabianego i wirnika wygładzarki n , w istotny sposób wpływają na kształtowanie śladów obróbkowych pochodzących od elementarnych zjawisk mikroskrawania, zarysowywania, bruzdowania, kraterowania, na mechanizm kształtowania chropowatości powierzchni obrabianej..
2. Na kształtowanie wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości Ra w mniejszym stopniu wpływa częstotliwość ruchu drgającego przedmiotu obrabianego f , w porównaniu do prędkości obrotowej wirnika n generującego ruch kształtek roboczych.
3. Na kształtowanie całkowitej wysokości nierówności profilu chropowatości powierzchni Rt , wpływ prędkości obrotowej wirnika wygładzarki, wykazuje również znacząco większy wpływ w porównaniu z częstotliwością drgań przedmiotu obrabianego f .
4. Częstotliwość drgań przedmiotu obrabianego f w większym stopniu wpływa na stopień rozwinięcia powierzchni obrabianej opisywaną liczbę wierzchołków nierówności przypadającej na jednostkę długości profilu chropowatości RPc , w porównaniu z prędkością obrotową wirnika wygładzarki n .
5. Badane parametry profili struktury geometrycznej obrobionych powierzchni charakteryzują się dużą zmiennością wartości w zależności od parametrów i warunków obróbki: $Ra = 3,26 - 5,88 \mu m$, $Rt = 4,86 - 11,34 \mu m$, $RPc = 102,79 - 212,20 1/cm$, co jest efektem dużej intensywności obróbki w wyniku zastosowania kształtek ściernych charakteryzujących się dobrymi właściwościami skrawnym.i
6. Duża intensywność obróbki w tym procesie wskazuje na jego przydatność do obróbki wstępnej wygładzanych powierzchni, mającej na celu usunięcie nierówności powierzchniowych, występujących po cięciu metodami obróbki skrawaniem i obróbki ścierniej, cięciu strumieniem wody lub lasera, a także usuwania uplastycznionych i utwardzonych warstw wierzchnich na przykład po walcowaniu, nagniataniu, czy obróbce strumieniowej.

5.5.2. Badania wpływu zintegrowanego ruchu obrotowo-wibracyjnego przedmiotu obrabianego na kształtowanie chropowatości powierzchni w intensywnym procesie obróbki pojemnikowej

Tak jak w poprzednim etapie, badania przeprowadzono na elementach o kształcie płasko-równoległym o wymiarach 20x30x2 mm wykonanych ze stali nierdzewnej gatunku AISI 304. Zastosowano kształtki ścierne ze spoiwem żywicznym, oznaczone przez dystrybutora AVALON symbolem 02PP10. Obróbkę prowadzono przy prędkości obrotowej wirnika wygładzarki $n=300$ obr/min w czasie 0-45 min. Do pomiaru chropowatości powierzchni obrobionych zastosowano optyczny profilometr TalySurf CLI 2000 prod. Taylor-Hobson z oprogramowaniem TalyMap. Dla wszystkich analizowanych przypadków, badane próbki po zamocowaniu w obrotowo-wibracyjnym uchwycie, były umieszczane w obszarze największego poziomu energetycznego wsadu roboczego, występującego przy danej prędkości obrotowej. W odniesieniu do pierwszej przyjętej hipotezy badawczej zakładającej, że nadanie dodatkowych ruchów obrotowych i drgających przedmiotowi obrabianemu za pomocą uchwytu mocującego, wpłynie na kształtowanie chropowatości powierzchni obrabianej, do jej oceny przyjęto cztery grupy parametrów liczbowych, charakteryzujących cechy wysokościowe, horyzontalne, przestrzenne i kształt wierzchołków nierówności.

Zbiór ten obejmuje następujące parametry w odniesieniu do poszczególnych cech:

- cechy wysokościowe struktury geometrycznej powierzchni:
 Sa - średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności,
- cechy horyzontalne struktury geometrycznej powierzchni
 Sdr – stopień rozwinięcia powierzchni,
 Spc – gęstość szczytów powierzchni,
- cechy kształtu wierzchołków nierówności:
 Ssc – średnia arytmetyczna krzywizna szczytów powierzchni,
 Sdq – średnie kwadratowe pochylenie nierówności powierzchni,;
- cechy przestrzenne:
 I - stopień izotropowości powierzchni.

Zbiór tych parametrów umożliwia kompleksową ocenę stanu topografii powierzchni po wygładzaniu w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej odniesieniu do parametrów i warunków obróbki. Ponadto, umożliwia ocenę wpływu podstawowych grup parametrów chropowatości na właściwości użytkowe i eksploatacyjne powierzchni

(tab.16) [12]. Umożliwia również określenie związków występujących pomiędzy poszczególnymi parametrami charakteryzującymi różne cechy chropowatości powierzchni. Interesujące jest powiązanie wartości tych parametrów ze stopniem rozwinięcia struktury geometrycznej powierzchni charakteryzowanej za pomocą parametru Sdr , który jest silnie uzależniony nie tylko od parametrów i warunków obróbki, ale także od dodatkowych ruchów przedmiotu obrabianego (n, f) nadawanych przez uchwyt mocujący.

Tab. 16. Wpływ podstawowych grup parametrów chropowatości na właściwości użytkowe i eksploatacyjne powierzchni [12]

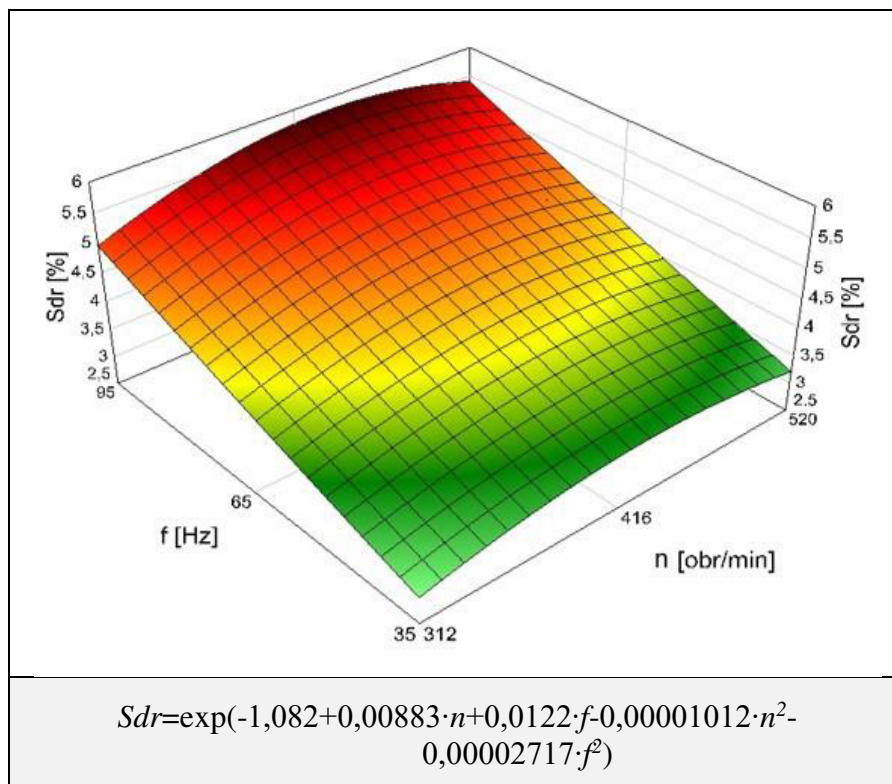
	Parametry chropowatości	Wysokościowe	Amplitudowe i kształt nierówności	Mieszane i krzywizna nierówności	Odległościowe	Ślady obróbkowe i kierunkowość
	Funkcja					
Związki funkcjonalne	Nośność	••	••	•	•	••
	Szczelność	••	••	••	•	••
	Tarcie	••	••	••	••	••
	Sztywność stykowa	••	••	•	•	•
	Połączenia ślizgowe (prowadnice)	••	••	•	••	••
	Kontakt elektryczny / termiczny	••	••	••	••	
	Zużycie	••	••	••	••	••
	Odporność na zatarcie	••	•	••	•	
	Łączenie i adhezja	••	••	•	•	•
	Powłoki i plater	••	•	•	•	
	Kształtowanie plastyczne	••	••	••	••	••
	Zmęczenie	••	•	•	•	••
	Naprężenia kontaktowe i pękanie	••	•	•		••
	Refleksyjność	••		••	•	•
	Zastosowania biomedyczne	••	•	•		

Uzyskane wyniki badań doświadczalnych przedstawiono w tab.17.

Tab. 17. Wyniki badań wpływu prędkości obrotowej wirnika wygładzarki v i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f na wybrane parametry chropowatości powierzchni obrabianych

Lp	n obr	f Hz	Sa μm	Sdr %	Ssc 1/ μm	Sdq $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	SPc pks/mm ²	I %
1	312	35	1,55	3,23	0,053	0,257	1,07	40,1
2	312	65	1,71	4,36	0,061	0,302	1,00	49,9
3	312	95	1,63	4,06	0,055	0,290	1,13	40,2
4	416	35	1,07	1,72	0,046	0,187	0,25	42,1
5	416	65	2,38	7,76	0,075	0,402	4,20	49,9
6	416	95	1,94	6,76	0,072	0,377	6,52	49,2
7	520	35	1,72	5,84	0,068	0,350	2,38	57,1
8	520	65	0,97	2,25	0,051	0,226	0,376	31,8
9	520	95	1,70	5,62	0,066	0,344	3,95	49,2
S	-	-	1,03	2,51	0,051	0,227	0	51,4

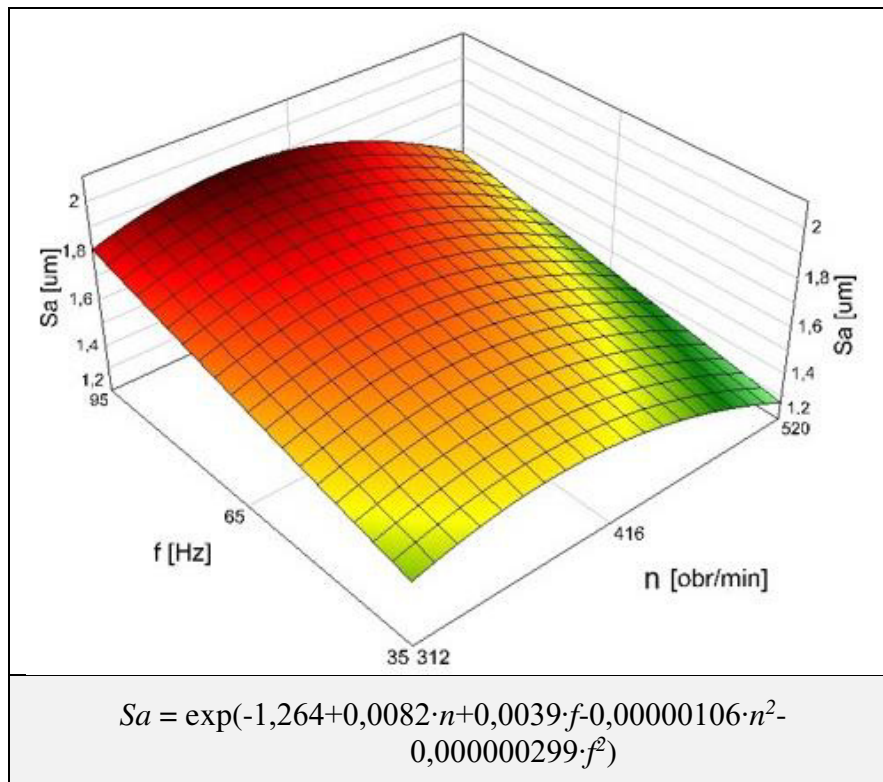
Analiza otrzymanych wyników wskazuje na istotny wpływ prędkości obrotowej wirnika n i częstotliwości drgań f , na proces kształtowania chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego. Odnosi się to zarówno do wartości parametrów wysokościowych, jak i horyzontalnych charakteryzujących tę strukturę powierzchniową, a także liczby i kształtu lokalnych wzniesień (wierzchołków). Wynika to z dynamiki i kierunku oddziaływania aktywnych kształtek roboczych na kształtowanie i rozkład śladów obróbkowych w skumulowanym obrotowo-wibracyjnym ruchu przedmiotu. Świadczy o tym analiza zmian wartości parametru Sdr , charakteryzującego zmiany stopnia rozwinięcia powierzchni w czasie trwania procesu obróbkowego (rys.83).



Rys.83. Zmiany wartości parametru *Sdr* określającego stopień rozwinięcia powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirlnika wygładzarki *n* i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego *f*

Analiza przebiegu tych zmian wskazuje, że wartości parametru *Sdr* są silniej uzależnione od częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego *f* i zwiększają się wraz ze wzrostem częstotliwości. Jest to niewątpliwie wynikiem zagęszczenia śladów obróbkowych na obrabianej powierzchni. Natomiast w odniesieniu do prędkości obrotowej wirlnika wygładzarki *n* zależność ta jest niemonotoniczna, a największy jej wpływ występuje dla pośrednich jej wartości. Wynika stąd, że ta czynność nie ma istotnego wpływu na generowania liczebności śladów obróbkowych i stopień ich zagęszczenia. Jednak w celu pogłębionej oceny procesu kształtowania struktury powierzchniowej, konieczne jest prowadzenie analizy przy skumulowanym obrotowo-wibracyjnym ruchu przedmiotu.

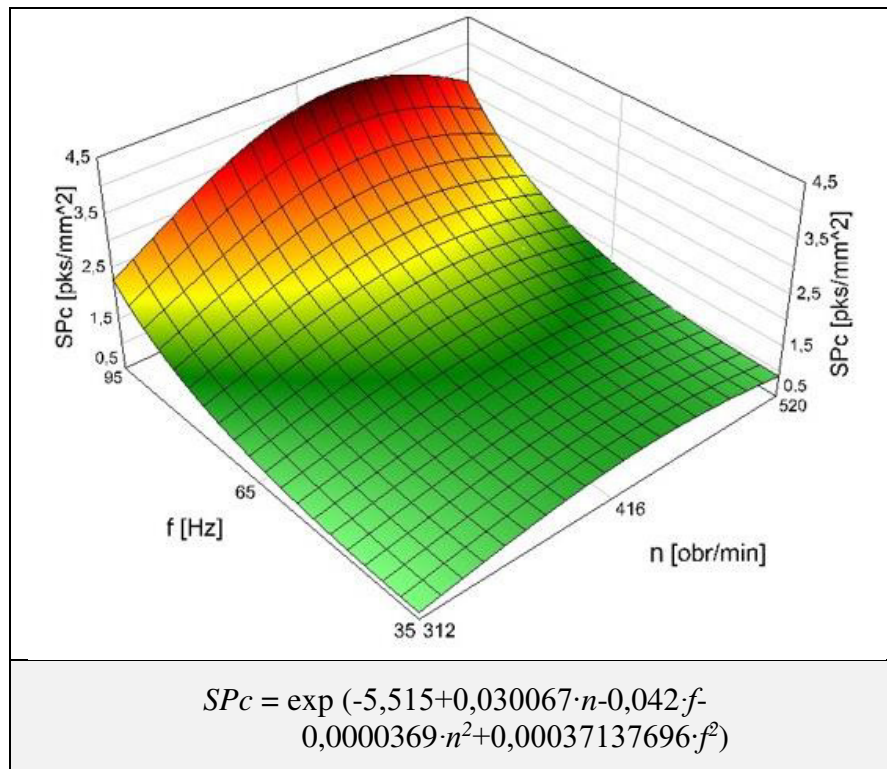
Zmiany stopnia rozwinięcia powierzchni i stopnia jej izotropowości dla różnych wartości parametrów *n* i *f*, znacząco wpływają na wartości parametru *Sa* charakteryzującego średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni. Potwierdzają to wykresy, opisujące zmiany wartości parametru *Sa* w czasie procesu obróbki (rys.84).



Rys.84. Zmiany wartości parametru Sa określającego średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f

Z powyższego wynika, że postać rozkładu wartości parametru Sa w funkcji skumulowanego ruchu obrotowo-wibracyjnego n i f , ma zbliżoną postać do rozkładu wartości parametru Sdr charakteryzującego stopień rozwinięcia powierzchni. Wartości parametru Sa charakteryzują się relatywnie dużą zmiennością mieszczącą się w zakresie $Sa = 0,97 - 2,38 \mu m$. Jest to niewątpliwie wynikiem dużych zmian intensywności w procesie obróbki.

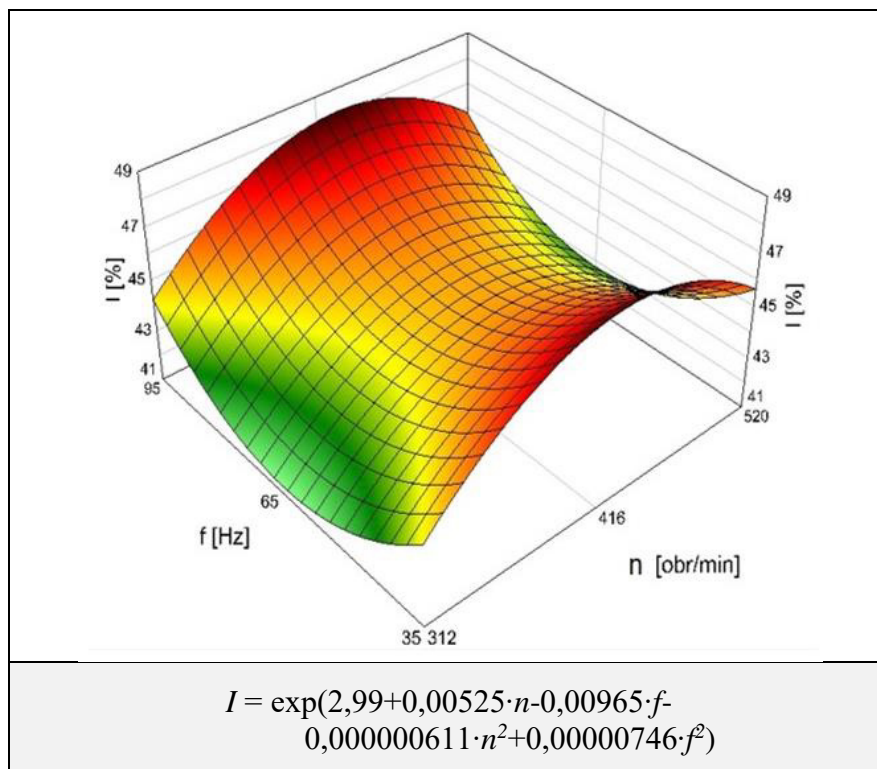
Rozszerzoną wiedzę o zjawiskach wpływających na transformację struktury geometrycznej powierzchni w wariantach obróbki ze skumulowanym obrotowo-wibracyjnym, umożliwia analiza liczebności wierzchołków nierówności powierzchni z użyciem parametru SPc (rys.85).



Rys.85. Zmiany wartości parametru SPc opisującego gęstość wzniesień powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f

Zmiany wartości tego parametru, podobnie jak parametru Sdr , silnie korelują z kierunkami zmian wartości obrotów wirnika wyładowarki n i drgań przedmiotu obrabianego f . W tym przypadku również większy wpływ wykazuje częstotliwość drgań przedmiotu f , która w większym stopniu wpływa na zagęszczenie śladów obróbkowych i generowanie wierzchołków nierówności. Liczba tych wierzchołków w całym przedziale zmienności waha się w zakresie od 1 do 4. To w znacznym stopniu zmienia charakter struktury geometrycznej powierzchni obrabianej.

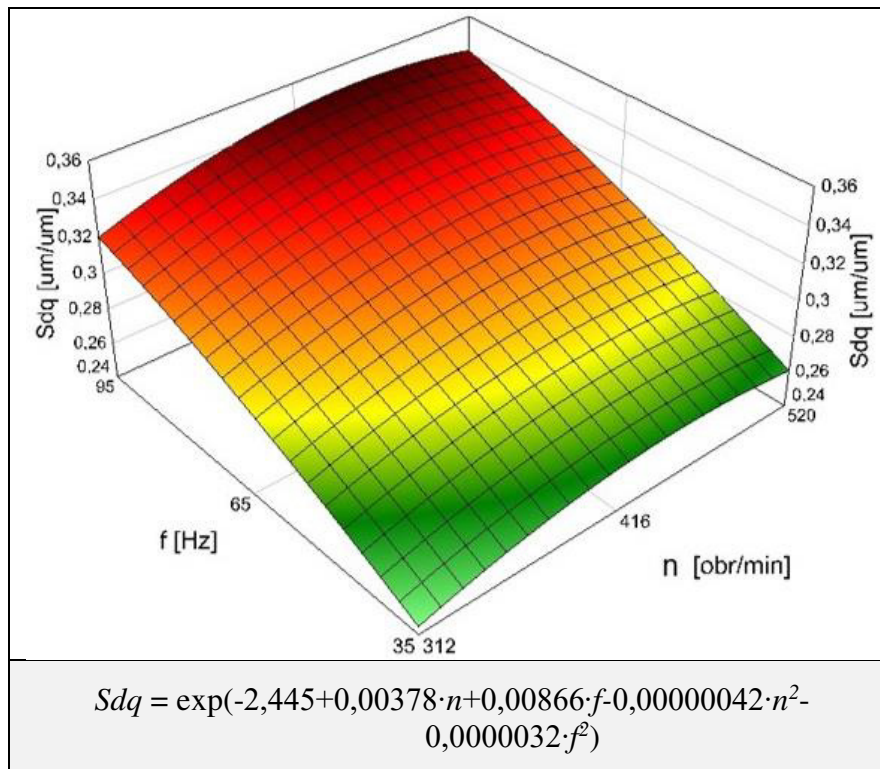
W wyniku występowania tego rodzaju zależności, relatywnie do nich są też kształtowane zmiany poziom izotropowości powierzchni obrabianej charakteryzowane za pomocą parametru I (rys.86).



Rys.86 Zmiany wartości parametru I określającego stopień izotropowości w funkcji prędkości obrotowej wirnika wyłazarki n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f

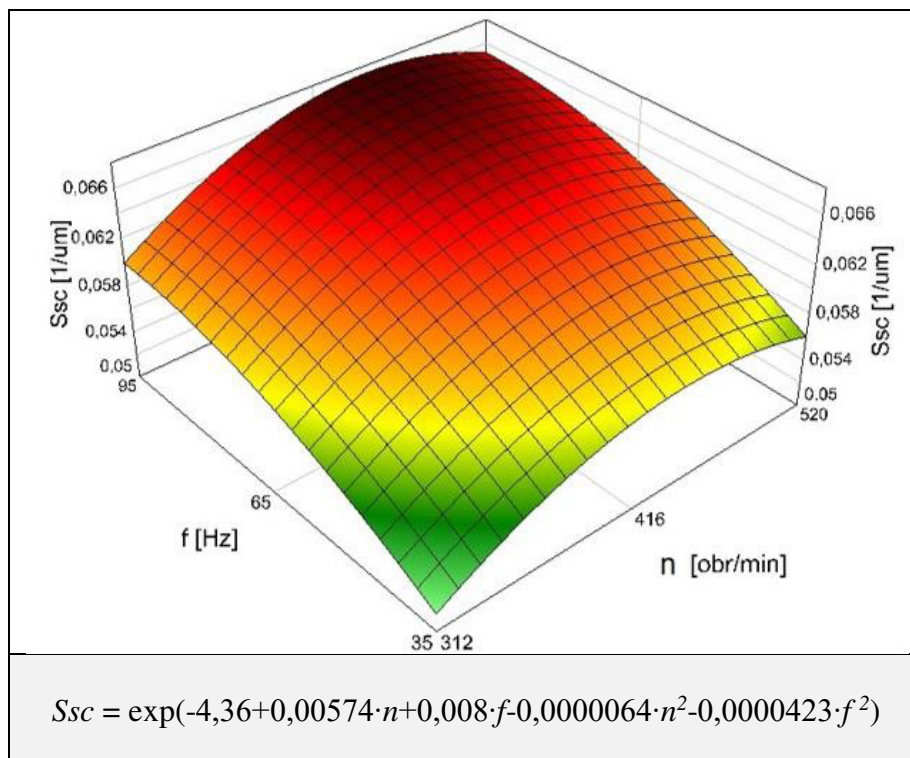
Te dane wskazują, że stopień izotropowości obrabianych powierzchni zmienia się w stosunkowo szerokim zakresie $I=31,8-57,1\%$. Najwyższe wartości parametr ten przyjmuje dla największych częstotliwości drgań przedmiotu f i średnich prędkości obrotowych wirnika wyłazarki n . Jest to wynikiem zmian udziału wzajemnych relacji śladów mikroskrawania, zarysowywania, a zwłaszcza bruzdowania. Istotne są tu także kształt i zagłębienie śladów obróbkowych, wynikające z dynamiki i intensywności oddziaływań kształtek ściernych.

Przeprowadzone badania wykazały, że parametry i warunki obróbki mają również istotny wpływ na kształty wierzchołków nierówności powstających w procesie wyłazania. Odnosi się to do średniokwadratowego nachylenia nierówności Sdq (rys.87) oraz średniej arytmetycznej krzywizny wierzchołków nierówności Ssc (rys.88).



Rys.87. Zmiany wartości parametru Sdq określającego średniokwadratowe nachylenie nierówności powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f

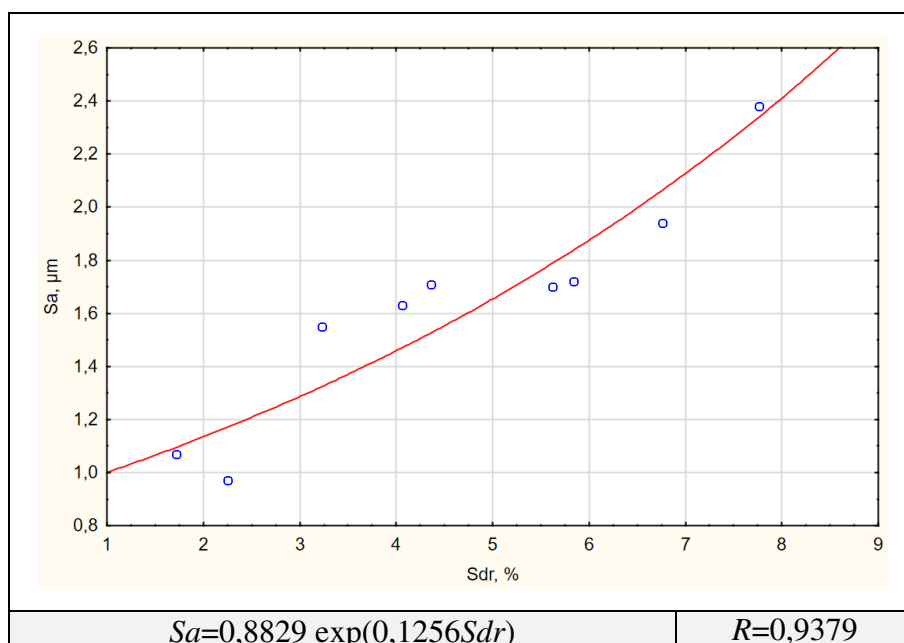
Z przebiegu tych zależności wynika, że nachylenie wierzchołków nierówności wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f . Natomiast znacząco mniejszy wpływ występuje tu w odniesieniu do prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n . Taki stan można tłumaczyć mechanizmem kształtowania nierówności powierzchni, wynikający ze zmiany sposobu kontaktu kształtek ściernych z powierzchnią obrabianą. Odnosi się to w szczególności do czasu kontaktu, siły i kierunków ich działania na powierzchnię obrabianą. W tym przypadku następuje zmiana rozkładu powierzchniowego śladów obróbkowych, przy jednoczesnej zmianie ich głębokości.



Rys.88. Zmiany wartości parametru S_{sc} określającego średniej arytmetycznej krzywizny wierzchołków nierówności powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n i drgań przedmiotu obrabianego f

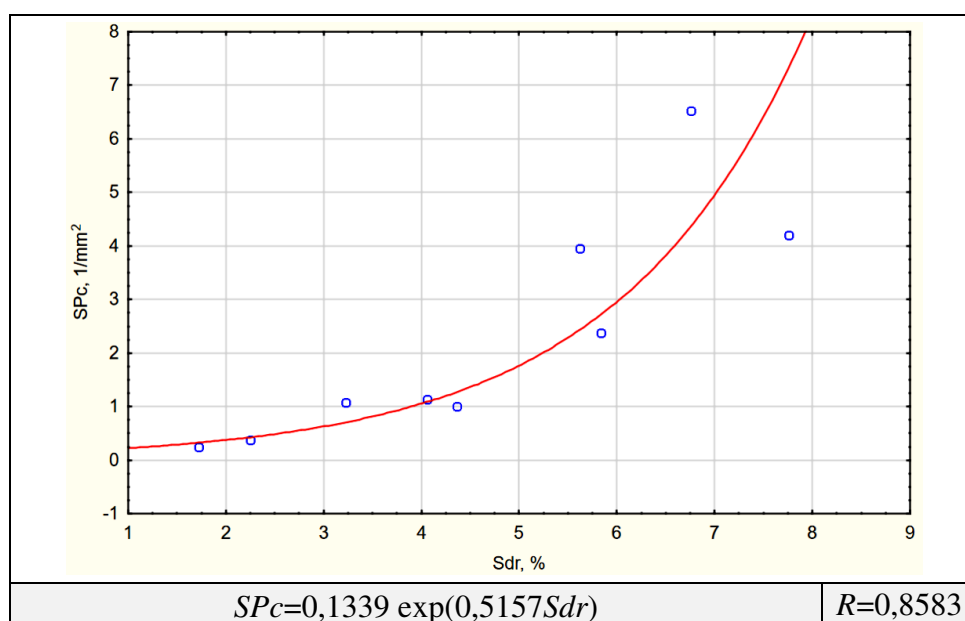
Te dane wskazują, że zarówno częstotliwość drgań przedmiotu f , jak i prędkość obrotowa wirnika wygładzarki n wykazują znaczący wpływ na wielkość krzywizny wierzchołków kształtowanych nierówności powierzchni. Wielkość tej krzywizny wzrasta przy wzroście wartości tych parametrów technologicznych. Tłumaczyć to można wzrostem intensywności procesu wygładzania wierzchołków nierówności, zachodzącym głównie w wyniku ścierania i obtaczania ziarnami kształtkami ściernymi, a także mikro odkształceniami plastycznymi.

W celu bliższego poznania zjawiska kształtowania wartości poszczególnych parametrów struktury geometrycznej badanych powierzchni w odniesieniu zmienności przyjętych parametrów technologicznych n i f , przeprowadzono analizy dotyczące korelacji ich wartości w stosunku do stopnia rozwinięcia powierzchni charakteryzowanego parametrem S_{dr} . W pierwszej kolejności przeanalizowano wpływ zmian stopnia rozwinięcia powierzchni S_{dr} na wartości parametru określającego średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni S_a (rys.89).



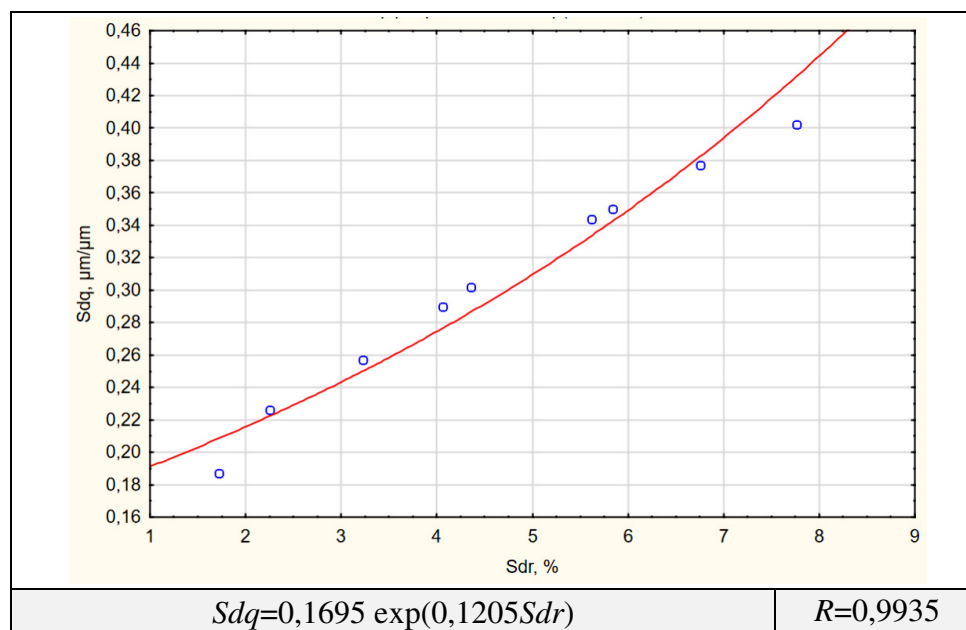
Rys.89. Zmiany wartości parametru Sa w funkcji wartości parametru Sdr

Analiza danych z wykresu potwierdza występowanie zależności między tymi parametrami w całym zakresie zmienności ich wartości. Zależność ta ma postać funkcji wykładniczej, co wskazuje na silną zależność między wartościami parametru Sdr charakteryzującego strukturę geometryczną powierzchni w kierunku horyzontalnym, a wartościami parametrem Sa charakteryzującym ją w kierunku wysokościowym. Równie silną zależność wykazano między wartościami parametru Sdr i parametru SPc określającym liczbę wzniesień (wierzchołków) struktury geometrycznej powierzchni (rys.90).



Rys.90. Zmiany wartości parametru SPc określających liczbę wzniesień na jednostce powierzchni w funkcji wartości parametru Sdr

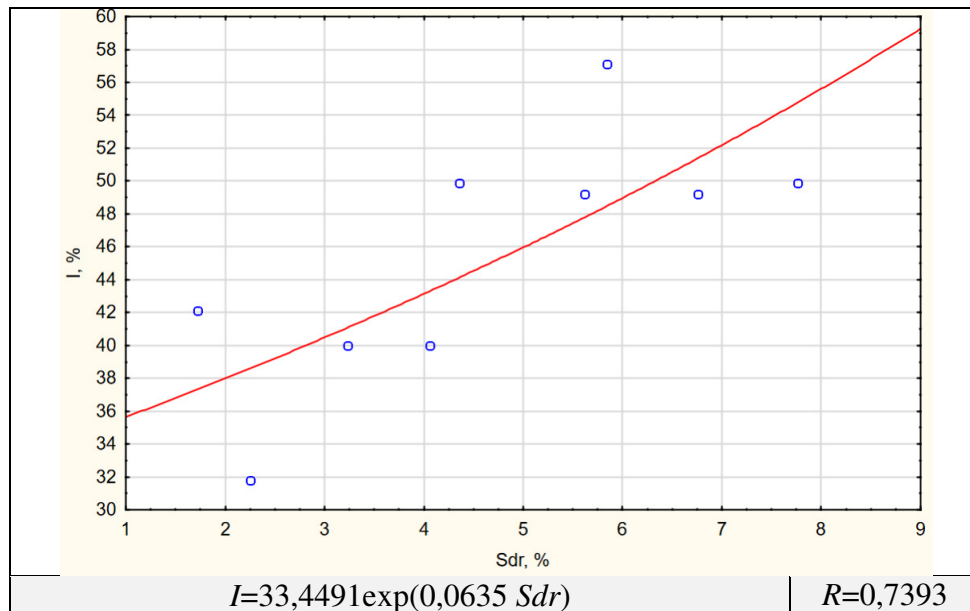
Ten związek ilościowy jest oczywisty, gdyż od stopnia rozwinięcia powierzchni bezpośrednio zależy liczba wierzchołków nierówności powierzchni. Znaczący jest jednak fakt, że dla większych wartości parametru Sdr , parametr SPc przyjmuje również większe wartości. To prawdopodobnie jest wynikiem bardziej zróżnicowanej struktury zarówno w kierunku horyzontalnym, jak i wysokościowym powierzchni (rys.91).



Rys. 91. Zmiany wartości parametru Sdq charakteryzującego średniokwadratowe nachylenie nierówności w funkcji wartości parametru Sdr

Stąd dla mniejszego stopnia rozwinięcia powierzchni, kąty pochylenia nierówności są mniejsze, zaś wierzchołki są bardziej rozwarte.

Stopień rozwinięcia struktury geometrycznej obrabianych powierzchni w badanym procesie wygładzania w znacznym stopniu determinuje stopień ich izotropowości I (rys.92).



Rys. 92 Zmiany stopnia izotropowości powierzchni I w funkcji wartości parametru S_{dr}

W tym przypadku również istnieje silna zależność między stopniem rozwinięcia obrabianej powierzchni S_{dr} , a stopniem jej izotropowości I . Wraz ze wzrostem stopnia rozwinięcia powierzchni, rośnie stopień izotropowości powierzchni. Funkcja aproksymująca tę zależność ma postać zbliżoną do postaci liniowej, jednak występują w tym zakresie duże rozrzuty danych i zależność ta nie jest w pełni oczywista. Można ją jednak traktować jako funkcję trendu.

Przedstawione wyniki badań prezentują w sposób ilościowy intensywność zmian parametrów chropowatości obrabianych powierzchni, w zależności od prędkości obrotowej wirnika wyłazarki n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f z zastosowaniem obrotowo-wibracyjnego ruchu przedmiotu zamocowanego w aktywnym uchwycie. Wiedza ta może posłużyć do projektowania procesu obróbki, umożliwiające uzyskanie określonych wartości parametrów charakteryzujących stan struktury geometrycznej powierzchni ze stali nierdzewnej gatunku AISI 304.

Wnioski z przeprowadzonych badań

Na podstawie uzyskanych wyników z badań oraz przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że:

1. Skumulowany ruch obrotowo-wibracyjny przedmiotu obrabianego w rotacyjno-kaskadowej wyłazdarce pojemnikowej generowany przez aktywny uchwyt

przedmiotowy, w istotnym stopniu wpływa na sposób kształtowania chropowatości obrabianej powierzchni.

2. Na sposób kształtowania chropowatości powierzchni w mniejszym stopniu wpływa prędkość obrotowa wirnika wygładzarki n , niż częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f .
3. Częstotliwość drgań przedmiotu f w znaczący sposób wpływa na stopień rozwinięcia powierzchni obrabianej charakteryzowanej parametrem Sdr , na liczbę wierzchołków nierówności opisywanej parametrem SPc oraz wartość parametru Sa charakteryzującego średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni.
4. Wartości parametrów SPc określającego liczbę wzniesień na jednostce powierzchni oraz parametru Sdq charakteryzującego średniokwadratowe nachylenie nierówności, silnie zależą od stopnia rozwinięcia powierzchni Sdr . Ich wartości wzrastają, wraz ze wzrostem wartości parametru Sdr .
5. Wpływ obrotów wirnika wygładzarki n i drgań przedmiotu obrabianego f na stopień izotropowości obrabianej powierzchni I , nie ma charakteru monotonicznego. Można jednak wskazać zakresy wartości tych parametrów, dla których uzyskuje się powierzchnie o największym stopniu izotropowości.
6. Badane parametry chropowatości obrabianych powierzchni charakteryzują się dużą zmiennością wartości w zależności od parametrów i warunków obróbki n i f : $Sa=1,03-2,38 \mu m$ $Sdr=1,72-5,62 \%$, $SPc= ok.0,376-4,20 pks/mm^2$, $I=40,1-50,4\%$ $1/cm$, co wynika z dużych zmian intensywności obróbki.
7. Otrzymane wyniki badań umożliwiają wskazanie takich wartości sterowanych parametrów obróbki n i f w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, które zapewniają uzyskanie określonych wartości parametrów chropowatości obrabianych powierzchni. Umożliwia to sterowanie wynikami obróbki powierzchniowej z zastosowaniem opracowanych modeli matematycznych.

6. BADANIA 3-ETAPOWEGO PROCESU OBRÓBKİ STALI AISI 304 Z OKRESOWĄ ORIENTACJĄ PRZDMIOTU OBRABIANEGO W STREFACH WSADU ROBOCZEGO O STOPNIOWO ZMNIEJSZAJĄCEJ SIĘ WIELKOŚCI ENERGII KINETYCZNEJ

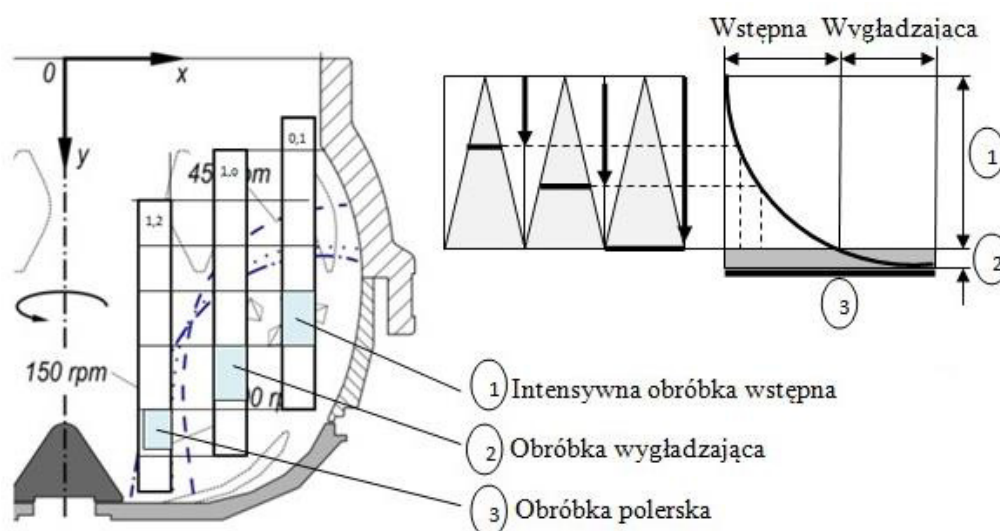
6.1.Charakterystyka 3-etapowego procesu obróbki

W stosunku do procesów wygładzania pojemnikowego, podobnie do wielu innych procesów obróbkowych, coraz częściej oczekuje się skrócenia czasu ich realizacji, przy jednoczesnym zapewnieniu oczekiwanej jakości powierzchni przedmiotów obrabianych. Jest to szczególnie istotne w przypadku wygładzarek o dużej pojemności komór roboczych i wygładzarek do obróbki ciągłej. Osiąganie tej jakości jest często związane ze znacznym wydłużeniem czasu obróbki i ewentualnym przechodzeniem do procesu wieloetapowego, połączonego ze zmianą rodzaju kształtek roboczych, a niekiedy zmiany kinematyki procesu obróbki i zastosowaniem wygładzarek wibracyjnych.

Przeprowadzone prace badawcze [14,18] potwierdzają, że w przypadku obróbki przedmiotów w uchwytach, istnieje wiele dodatkowych możliwości sterowania intensywnością procesu wygładzania powierzchni obrabianych w wygładzarkach pojemnikowych, z zastosowaniem ruchów pomocniczych przedmiotu obrabianego, którymi mogą być: ruchy ustawcze, wibracyjne, obrotowe oraz ich różnego rodzaju wzajemne skojarzenia. To umożliwia sterowanie mechanizmem kształtowania chropowatości powierzchni obrabianej w wyniku zmiany udziału elementarnych zjawisk obróbkowych. Ponadto, możliwe jest określone kształtowanie topografii powierzchni, przez ukierunkowanie śladów obróbkowych, ich zagęszczenie i zmiany głębokości. Szczególne możliwości w tym względzie zapewnia orientacja przedmiotów obrabianych w określonych strefach struktury wewnętrznej wsadu obróbkowego, które charakteryzują się zmienną energią kinetyczną i zmiennym określonym potencjałem obróbkowym.

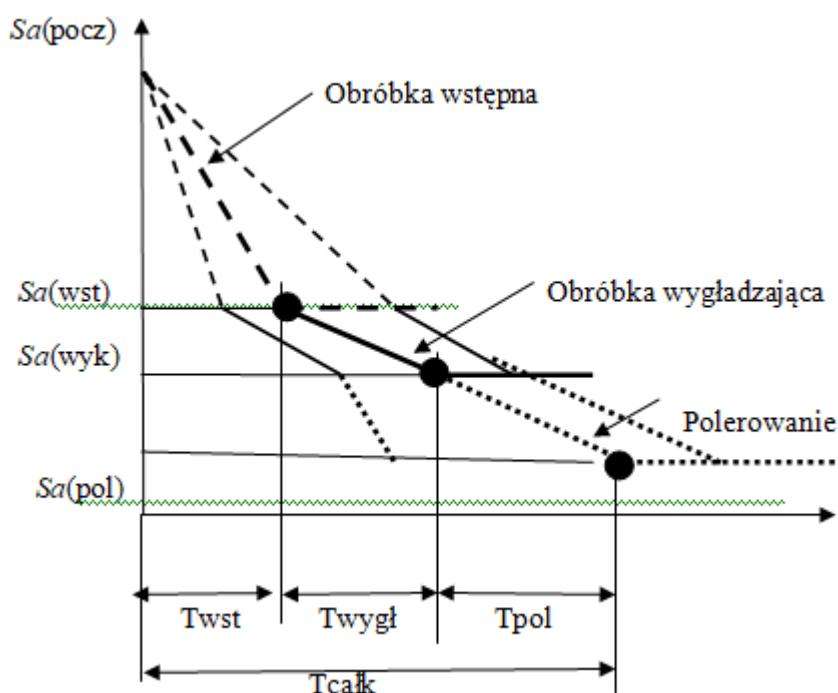
W odniesieniu do powyższego, została zaproponowana autorska ogólna koncepcja projektu etapowego procesu wygładzania, bazująca na idei kolejnych przemieszczeń przedmiotu obrabianego zamocowanego w aktywnym uchwycie w kierunku osiowym ku środkowi komory rotacyjno – kaskadowej wygładzarki pojemnikowej, tj. w kierunku malejącego poziomu energii kinetycznej wsadu roboczego. W przypadku badanego 3-etapowego procesu obróbkowego, przyjęta sekwencja przemieszczeń przedmiotu umożliwia realizację następujących etapów obróbki (rys.93):

1. **Obróbkę wstępną** kształtkami ściernymi przedmiotu zamocowanego w uchwycie przedmiotowym wykonującym ruchy obrotowo-wibracyjne z orientacją powierzchni obrabianej w kierunku prostopadłym do kierunku działania kształtek ściernych, umiejscowionego w strefie wysokiego poziomu ich energii kinetycznej. Zapewnia to możliwie dużą intensywność procesu obróbki, mającą na celu usunięcia dużych nierówności powierzchni pochodzących z poprzedzających operacji obróbkowych i ujednolicenia struktury geometrycznej powierzchni (obróbka w obszarze nierówności powierzchni).
2. **Obróbkę wygładzającą** kształtkami ściernymi przedmiotu zamocowanego w uchwycie aktywnym, z orientacją powierzchni obrabianej w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu kształtek ściernych, umiejscowionego w strefie średniego poziomu ich energii kinetycznej. Umożliwia to niższą intensywność procesu obróbki, zapewniającą usuwanie nierówności powierzchni pochodzących z poprzedzającego zabiegu obróbki wstępnej prowadząc do uzyskania oczekiwanej niskiej końcowej chropowatości powierzchni (obróbka w pełnym materiale).
3. **Obróbkę wykończeniową** przedmiotu zamocowanego w uchwycie aktywnym, z orientacją powierzchni obrabianej w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu kształtek ściernych, umiejscowionego w strefie niskiego poziomu ich energii kinetycznej prowadzącą do uzyskania oczekiwanej niskiej końcowej chropowatości powierzchni.



Rys.93. Schemat przebiegu 3-etapowego procesu wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z okresowym przemieszczaniem przedmiotu obrabianego zamocowanego w uchwycie

Czasy trwania poszczególnych etapów obróbki mogą być uzależniane od oczekiwanej efektywności obróbki, rodzaju kształtek roboczych oraz oczekiwanej chropowatości powierzchni wyjściowej (rys.94). Jest to w głównej mierze zależne od rodzaju materiału obrabianego, jego właściwości obróbkowych oraz kształtu przedmiotu obrabianego.



Rys.94. Przebieg zmian chropowatości powierzchni w procesie 3- etapowej obróbki dla różnych wariantów technologicznych

W poszczególnych etapach projektowanego procesu wygładzania, mogą być zastosowane następujące czynności:

1. W etapie obróbki wstępnej:

- Umieszczenie przedmiotu obrabianego w strefie najwyższego poziomu energetycznego wsadu roboczego,
- prostopadłe zorientowanie obrabianej powierzchni przedmiotu do kierunku działania kształtek ściernych,
- zastosowanie ceramicznych kształtek ściernych o dobrej skrawalności zapewniających możliwie dużą intensywność obróbki,
- zastosowanie dużej prędkości obrotowej wirnika komory roboczej wygładzarki.

2. W etapie obróbki wygładzającej:

- umieszczenie przedmiotu obrabianego w strefie średniego poziomu energetycznego wsadu roboczego,

- prostopadłe zorientowanie obrabianej powierzchni przedmiotu do kierunku działania kształtek ściernych,
- zachowanie niezmiennej z poprzedniego etapu obróbki prędkości obrotowej wirnika komory roboczej wyłazarki,
- zastosowanie chemicznie aktywnych płynów wspomagających obróbkę, zwłaszcza aktywujących procesy trawienia i pasywacji powierzchni i ułatwiające jej usuwanie przez kształtki ściernie z mikroziarnami.

3. W etapie obróbki wykończeniowej:

- umiejscowienie przedmiotu obrabianego w strefie niskiego poziomu energetycznego wsadu roboczego,
- prostopadłe zorientowanie obrabianej powierzchni przedmiotu do kierunku działania kształtek ściernych,
- zachowanie niezmiennej z poprzednich etapów obróbki prędkości obrotowej wirnika komory roboczej wyłazarki,
- zastosowanie chemicznie aktywnych płynów wspomagających obróbkę, zwłaszcza aktywujących procesy trawienia i pasywacji powierzchni i ułatwiające jej usuwanie przez ceramiczne kształtki ściernie z mikroziarnami.

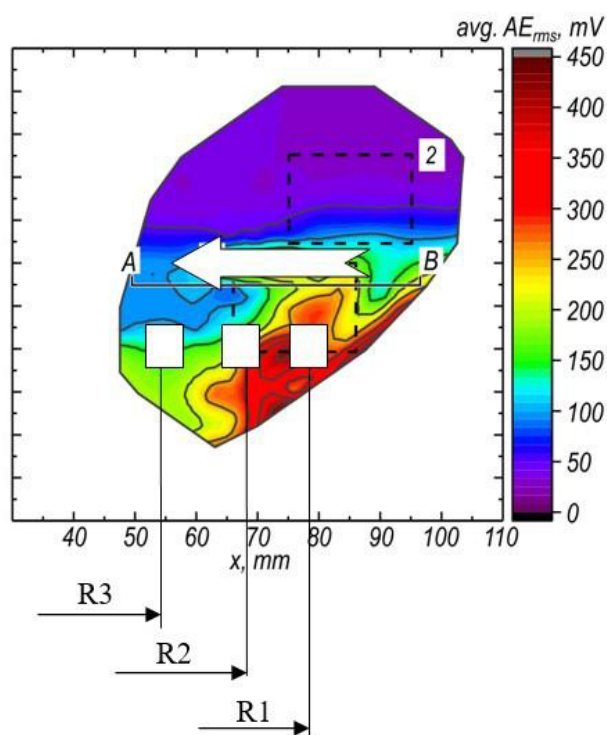
6.2.Badania doświadczalne

Celem prowadzonych badań było określenie, w jaki sposób orientacja przedmiotu obrabianego we wsadzie roboczym w kierunku promieniowym wyłazarki pojemnikowej, wpływa na efektywność wyłazania powierzchniowego i chropowatość jego powierzchni. Badania prowadzono na wyłazarce rotacyjnej EC6 z zastosowaniem uchwytu przedmiotowego generującego ruchy obrotowo - wibracyjne. Badano przedmioty o kształcie płasko-równoległym o wymiarach 30x20x2mm wykonane ze stali nierdzewnej AISI 304. Jako wsad roboczy zastosowano ceramiczne kształtki ściernie GP10x10BD (oznaczenie wg. AVALON) –rys.95 o łącznej masie 5 kg.



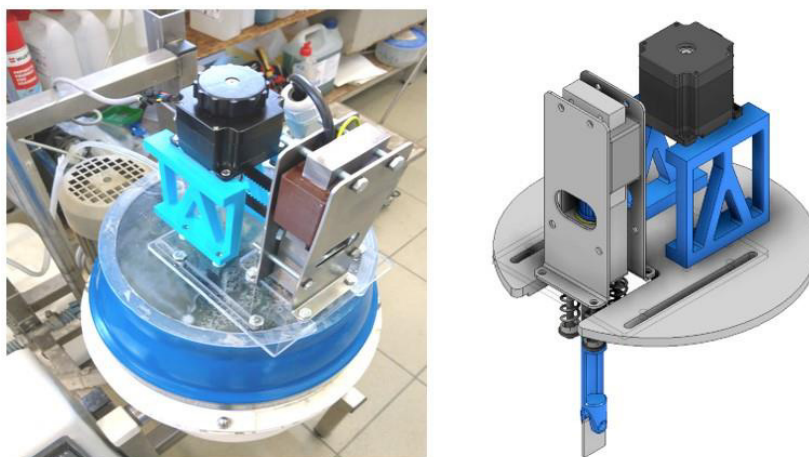
Rys.95. Ceramiczne kształtki ściernie GP10x10 BD (graniastosłup pochyły)

Przyjęto wariant obróbki o dużej intensywności, z możliwie najwyższą wartością prędkości obrotowej wirnika wygładzarki $n=450$ obr/min, amplitudę drgań przedmiotu obrabianego $A=1$ mm i częstotliwość drgań $f=65$ Hz, obroty przedmiotu obrabianego $n_p=5$ obr/min. Przedmiot orientowano w trzech obszarach o zróżnicowanym poziomie energii wsadu roboczego przy stałej zadanej prędkości obrotowej (rys.96).



Rys.96. Rozkład średnich wartości energii kinetycznej wsadu roboczego dla prędkości obrotowej wirnika wygładzarki EC6 $n=450$ obr/min. [43,44]

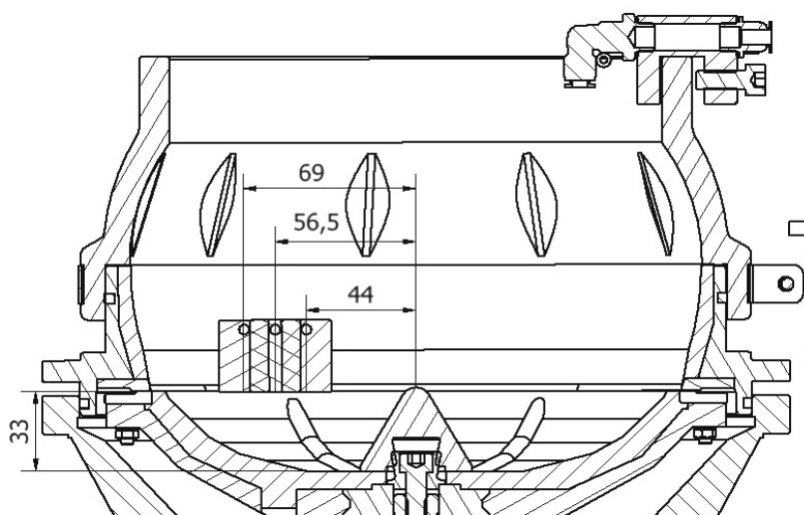
W celu przemieszczania przedmiotu w kierunku promieniowym wygładzarki, wykorzystano wzdłużne otwory prowadzące uchwyt przedmiotowy (rys.97).



Rys. 97. Uchwyt przedmiotowy: a) widok ogólny, b) uchwyt zamontowany na podstawie

Na podstawie przeprowadzonych analiz rozkładu wsadu roboczego, przyjęto następujące położenia promieniowe przedmiotu obrabianego w poszczególnych etapach procesu obróbki (rys.98):

1. Etap obróbki wstępnej: $R= 69,0 \text{ mm}$
2. Etap obróbki wygładzającej: $R=56,5 \text{ mm}$
3. Etap obróbki wykończeniowej: $R=44,0 \text{ mm}$



Rys.98. Promieniowe położenie punktów pomiarowych dla poszczególnych etapów obróbki

W programie badań przyjęto następujące warunki dla realizowanego procesu obróbki:

1. Etap obróbki wstępnej ($R=69,0$ mm)

czas obróbki $t=15$ min

2. Etap obróbki wygładzającej ($R=56,5$ mm)

(Próbka po etapie obróbki wstępnej $t=15$ min)

czas obróbki $t=15$ min

3. Etap obróbki wykończeniowej ($R=44,0$ mm)

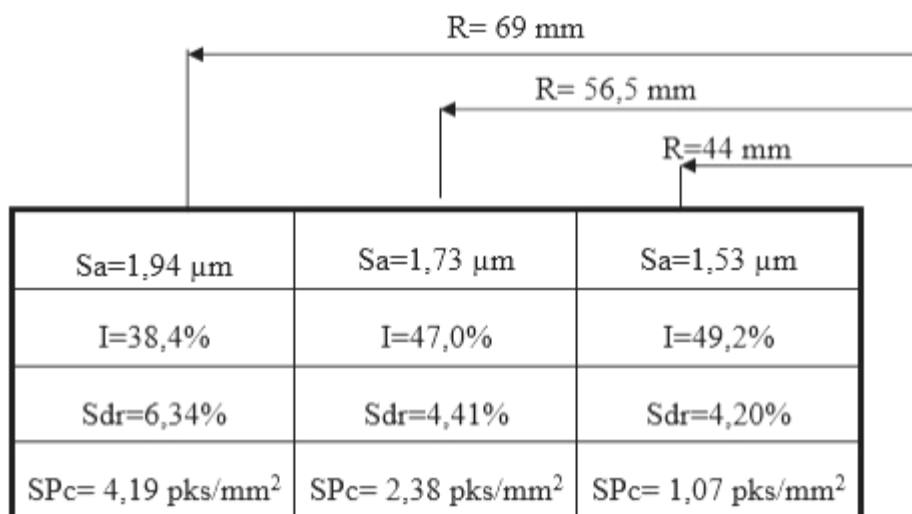
(Próbka po etapie obróbki wstępnej $t=15$ min

i etapie obróbki wygładzającej $t=15$ min)

czas obróbki $t=15$ min

Sumaryczny czas obróbki: Etap 1+ Etap 2+ Etap 3 = 45 min

Uzyskane wyniki chropowatości powierzchni obrabianych, przedstawiono na rys.99.



Rys.99. Parametry chropowatości powierzchni przedmiotów obrabianych zależności od miejsca ich orientacji w komorze roboczej wygładzarki

Wyniki tych badań potwierdzają, że okresowe przemieszczanie przedmiotu obrabianego w kierunku osiowym wygładzarki w kolejnych etapach obróbki, korzystnie wpływa na postępujące obniżanie chropowatości powierzchni obrabianej. Pomimo zastosowania relatywnie krótkich czasów poszczególnych etapów obróbki $t=15$ min, znacząco zmniejsza się stopień rozwinięcia powierzchni Sdr i średnia wysokość nierówności Sa , przy jednoczesnym znaczącym wygładzeniu wierzchołków nierówności i zmniejszeniu ich liczby na powierzchni jednostkowej SPc . Znacząco wzrasta też stopień izotropowości obrabianej powierzchni I .

Dla porównania, przeprowadzono obróbkę 1-etapową z umieszczeniem przedmiotu obrabianego w obszarze najwyższego poziomu energetycznego wsadu roboczego na promieniu $R1=69,0\text{mm}$. Zastosowano takie same parametry obróbki: $n=450\text{obr/min}$, $n_p=5\text{ obr/min}$, $A=1\text{mm}$, $f=65\text{Hz}$, $t=45\text{ min}$. W tych warunkach uzyskano chropowatość obrabianej powierzchni $Sa=1,63\text{ }\mu\text{m}$, przy znacząco niższym stopniu jej izotropowości $I=32,8\%$. To świadczy, że w tym procesie obróbki, następuje jedynie powolny efekt wygładzania powierzchni, ale nie postępuje efekt obróbki wykończeniowej.

Efektywność wygładzania powierzchni ukształtowanych w badanych wariantach procesu obróbki, obliczano z następującej zależności:

$$\Delta Sx = \frac{Sx(0)-Sx(45)}{Sx(0)} \cdot 100\% , \quad (7)$$

gdzie: ΔSx – względna różnica wartości określonego parametru SGP,

$Sx(0)$ – początkowa wartość parametru SGP, $Sx(45)$ – końcowa wartość parametru.

W odniesieniu do parametrów Sa i Sdr , obliczone wskaźniki efektywności procesu obróbki przedstawiono w tab.18.

Tab. 18. Wartości parametru ΔSa i ΔSdr dla badanych porównywanych sposobów obróbki

Sposób obróbki	Parametry struktury geometrycznej powierzchni	
	$\Delta Sa, \%$	$\Delta Sdr, \%$
Obróbka luzem	$\Delta Sa=35,3\%$	$\Delta Sdr=40,2\%$
Obróbka 3-stopniowa	$\Delta Sa=59,1\%$	$\Delta Sdr=45,8\%$

Wnioski z przeprowadzonych badań

Na podstawie uzyskanych wyników z badań oraz przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że:

1. Przedstawiona koncepcja sekwencyjnego 3-etapowego procesu obróbki w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, umożliwia sterowanie intensywnością obróbki wstępnej, wygładzającej i wykończeniowej, zarówno w odniesieniu do parametrów jak i czasu obróbki.
2. Taka strategia procesu obróbki, pozwala to również wpływać na chropowatość powierzchni obrabianych w postępujących po sobie etapach obróbki.
3. W przedstawionym programie badań 3- etapowego procesu obróbki w czasie 45 min, uzyskano relatywnie niższą chropowatość obrabianej powierzchni $Sa=1,53\text{ }\mu\text{m}$, wobec

$Sa=1,63\mu m$ w przypadku obróbki realizowanej w jednym etapie w strefie największego poziomu energetycznego wsadu roboczego.

4. W tych warunkach stwierdzono także znaczący spadek stopnia rozwinięcia struktury geometrycznej obrabianej powierzchni, co potwierdzają wyrażają wartości wskaźnika $\Delta Sdr=45,8\%$ i $\Delta Sdr=40,2\%$. To jest wynikiem zmniejszającej się liczby wierzchołków nierówności i spłaszczania ich wierzchołków.
5. Również efektywność obróbki w tym przypadku była znacząco wyższa, co potwierdza porównanie wartości wskaźnika $\Delta Sa=35,3\%$ i $\Delta Sa=59,1\%$. Zaproponowana organizacja i struktura procesu, pozwala na tworzenie nowych strategii obróbki powierzchniowej w rotacyjno- kaskadowych wygładzarkach pojemnikowych, a także w wygładzarkach o innych strukturach kinematycznych, np. w wygładzarkach wibracyjnych i strumieniowych.

7. BADANIA WPLYWU STĘPIENIA NARZĘDZI OBRÓBKOWYCH W POPRZEDZAJĄCYCH OPERACJACH TOCZENIA I SZLIFOWANIA NA KSZTAŁTOWANIE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI W PROCESIE POJEMNIKOWEGO WYGŁADZANIA ELEMENTÓW ZE STALI AISI 304

7.1. Wprowadzenie

Kształtowanie powierzchni przedmiotu obrabianego, jest efektem oddziaływań wielu różnorodnych zjawisk występujących w kolejnych operacjach technologicznych. Są to oddziaływania o charakterze mechanicznym, cieplnym, chemicznym i trybologicznym. Kształtowanie nowej powierzchni i jej warstwy wierzchniej w procesach obróbki ubytkowej, odbywa się w wyniku usuwania lub degradacji wcześniej wytworzonych warstw powierzchniowych w operacjach poprzedzających. Każda kolejna nowa powierzchnia i jej warstwa wierzchnia, uzyskuje nowe właściwości jakościowe i ilościowe. Zmianę tych właściwości dokonuje się przez oddziaływanie postępujących po sobie operacji obróbki, które mogą służyć do nadawania powierzchni właściwości zwiększających jej walory użytkowe i eksploatacyjne, np. wytrzymałościowe, trybologiczne, dekoracyjne, czy antykorozyjne. Transformacja technologiczna kształtowanej powierzchni wyrobu, jest skutkiem realizowanych operacji, przy czym dominujący wpływ ma operacja końcowa procesu.

Sumaryczny wpływ operacji poprzedzających na efektywność i jakość technologiczną powierzchni przedmiotów obrabianych, można rozpatrywać w aspekcie "dziedzictwa technologicznego". Jest ono rozumiane, jako zbiór cech fizyko-geometrycznych wyrobu po kolejnych obróbkach poprzedzających, które wpływają na przebieg i wyniki operacji obróbki wykończeniowej, w której kształtowana jest ostateczna jakość technologiczna wyrobu. Dziedzictwo technologiczne można także interpretować, jako pewnego rodzaju synergizm w kształtowaniu kształtowanej powierzchni określonego typu wyrobu. Po każdym etapie wytwarzania, wyrób uzyskuje inne pod względem jakościowym i ilościowym właściwości, zależne od rodzaju materiału i technologii wytwarzania. Istotną rolę w tym względzie, odgrywa kolejność poszczególnych operacji oraz zastosowane w nich parametry i warunki technologiczne, wywołujące określone modyfikacje właściwości fizycznych i geometrycznych danego wyrobu [12,3,23].

Analizując działania optymalizacyjne ubytkowych procesów obróbkowych, takich jak: obróbka skrawaniem, obróbka ścierna, obróbka elektroerozyjna czy elektrochemiczna, można

oceniać, iż działania te w większości odnoszą się do pojedynczych wydzielonych operacji obróbkowych. Bardzo mało rozpatruje się natomiast wpływ całej historii wpływu poszczególnych operacji procesu technologicznego i związków przyczynowo-skutkowych, na kształtowanie jakości technologicznej obrabianego przedmiotu. W takim przypadku utrudnione jest optymalizowanie procesów technologicznych, zwłaszcza o złożonej strukturze operacyjnej i skomplikowanych operacjach technologicznych. Wobec tego, istotne jest precyzyjne określenie skutków interakcji między kolejno postępującymi operacjami technologicznymi i systemowe podejście do optymalizacji procesów technologicznych określonych wyrobów. Takie podejście jest istotne dla precyzyjnego prognozowania jakości technologicznej przedmiotów obrabianych w zakresie dokładności wymiarowo-kształtowej, struktury geometrycznej powierzchni i stanu jej warstwy wierzchniej. Pozwala to unikać tzw. pętli naprawczych [12,3,23,4], koniecznych do usuwania błędów produkcyjnych, zwłaszcza w produkcji elementów o dużym stopniu skomplikowania technologicznego i o wysokich wymaganiach dokładnościowych. Można temu zapobiec już na etapie planowania procesu technologicznego, uwzględniając wpływ następstwa technologicznego operacji poprzedzających.

W niniejszej pracy przedstawiono dwa przypadki procesu wygładzania pojemnikowego, w których przedmiot w operacjach poprzedzających jest obrabiany narzędziami ostrymi oraz narzędziami stępionymi i jaki to ma wpływ na kształtowanie chropowatości powierzchni w operacji końcowej stali nierdzewnej AISI 304, realizowanej metodą wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej EC6.

7.2. Kształtowanie jakości technologicznej powierzchni stali AISI 304 w sekwencyjnym procesie technologicznym

Jako przykład obrazujący związki przyczynowo-skutkowe w zakresie wpływu tak rozumianego „dziedzictwa technologicznego”, na efektywność rotacyjnego wygładzania pojemnikowego i jakość powierzchni przedmiotów obrabianych, poddano analizie proces sekwencyjnej obróbki ubytkowej o następującej strukturze operacyjnej:

TOCZENIE - SZLIFOWANIE - WYGŁADZANIE POJEMNIKOWE.

Jest to przykład sekwencyjnego procesu obróbki ubytkowej elementu obrotowego wykonanego ze stali AISI 304, składającego się z operacji toczenia, szlifowania i wygładzania pojemnikowego. Istotą tych analiz jest określenie, jakie związki przyczynowo-skutkowe występują w takim procesie technologicznym, z zastosowaniem narzędzi skrawających i ściernych o różnym stopniu zużycia. Jaka wobec tego będzie chropowatość

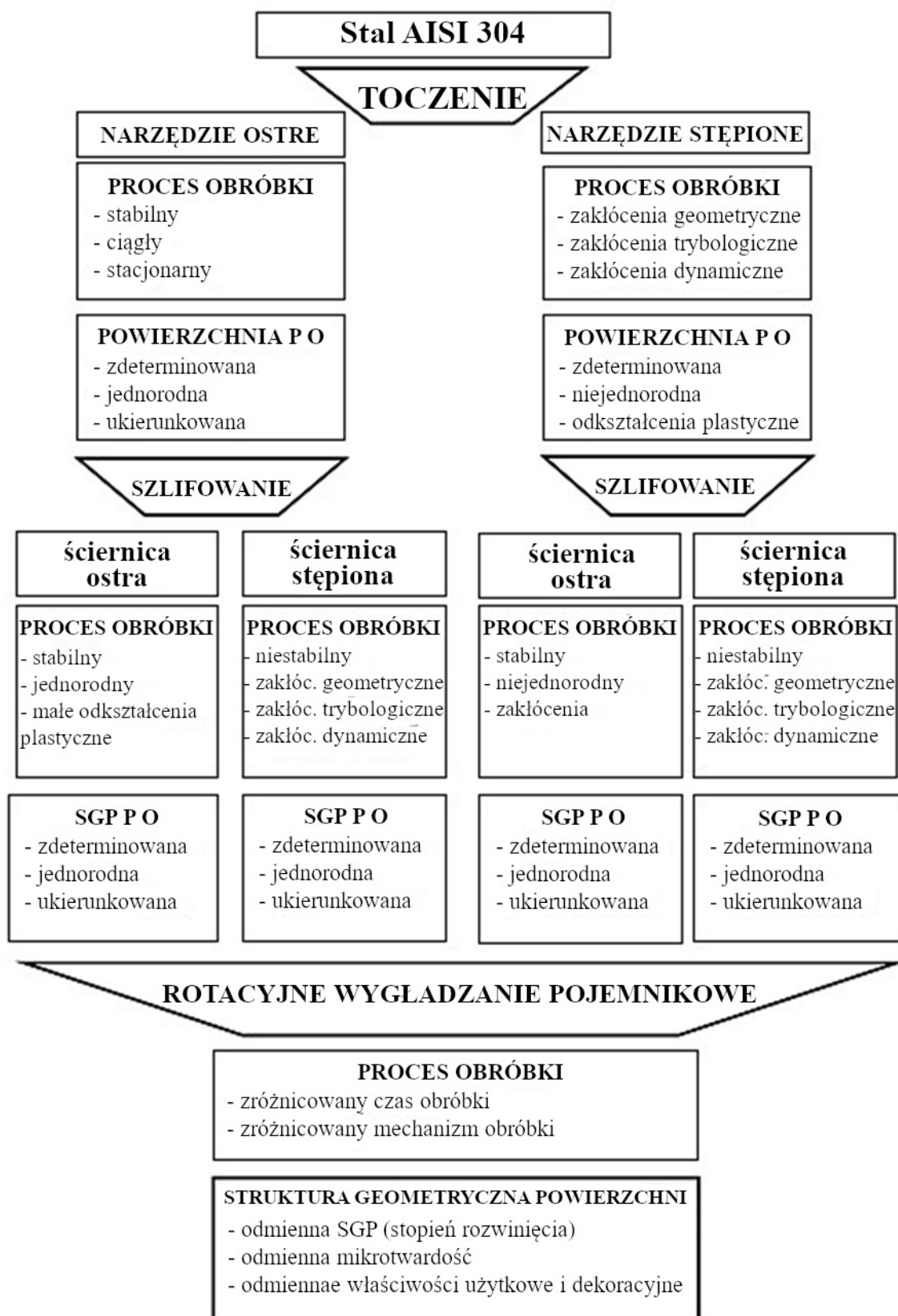
powierzchni po toczeniu, jaki będzie jej wpływ na stan powierzchni po szlifowaniu i w jaki sposób to wpłynie na cechy jakościowe powierzchni po wygładzaniu, przy zastosowaniu takich samych (powtarzalnych) parametrów obróbkowych w każdym z tych procesów. W tym przypadku chropowatość i parametry procesu obróbki pozostają stałe, natomiast zmiennym jest stopień zużycia narzędzi obróbkowych

Analizując związki przyczynowo-skutkowe występujące w poszczególnych operacjach sekwencyjnego procesu obróbki, składającego się z operacji obróbki wstępnej kształtującej i wykończeniowej, należy mieć na uwadze, że każda z tych operacji jest charakteryzowana przez odmienną kombinację obciążeń materiału obrabianego. To oznacza, że końcowy stan powierzchni obrabianej i jej warstwy wierzchniej, zależy od wielkości obciążeń mechanicznych, cieplnych i chemicznych oraz od ich wzajemnych udziałów.(tab.19).

Tab. 19. Oddziaływania podstawowych czynników występujących w operacjach technologicznych na zmiany wybranych cech jakościowych obrabianych powierzchni

Warunki obróbki	Proces	Materiał	Powierzchnia	Funkcjonalność
-kinematyka	Obciążenia:	-naprężenie	- chropowatość	- wsp. tarcia
-parametry	-mechaniczne	-odkształcenie	- izotropowość	- korozyjność
-narzędzie	-cieplne	-struktura	- tekstura	- trwałość
-chłodzenie	-chemiczne	- twardość	- morfologia	- refleksyjność

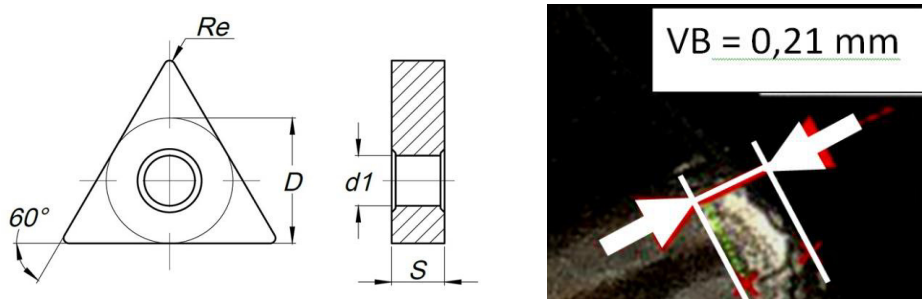
W przypadku procesów skrawania i szlifowania, obciążenia cieplne i mechaniczne występują łącznie, i są zależne od stopnia zużycia narzędzia, wpływającego na odkształcenia materiału w strefie obróbki, wielkość i rozkład ciepła oraz zjawiska trybologiczne. To z kolei ma wpływ na kształtowanie śladów obróbkowych, stopień ich ciągłości, wielkość i rozkład wypływek, a w efekcie na strukturę powierzchni obrabianych. Istotą tych analiz jest określenie, jakie związki przyczynowo-skutkowe w tym względzie występują w takim procesie technologicznym, z zastosowaniem narzędzi skrawających i ściernych o różnym stopniu zużycia. Jaka będzie chropowatość powierzchni po toczeniu, jaki będzie ich wpływ na stan powierzchni po szlifowaniu i w jaki sposób to wpłynie na jakość powierzchni po wygładzaniu, przy zastosowaniu tych samych parametrów obróbkowych w każdym z tych procesów. W tym przypadku struktura technologiczna i parametry obróbki pozostają stałe, natomiast zmiennym jest stopień zużycia narzędzi obróbkowych (rys.100).



Rys.100. Wpływ skutków operacji poprzedzających na kształtowanie chropowatości powierzchni w procesie rotacyjno-kaskadowego wygładzania pojemnikowego

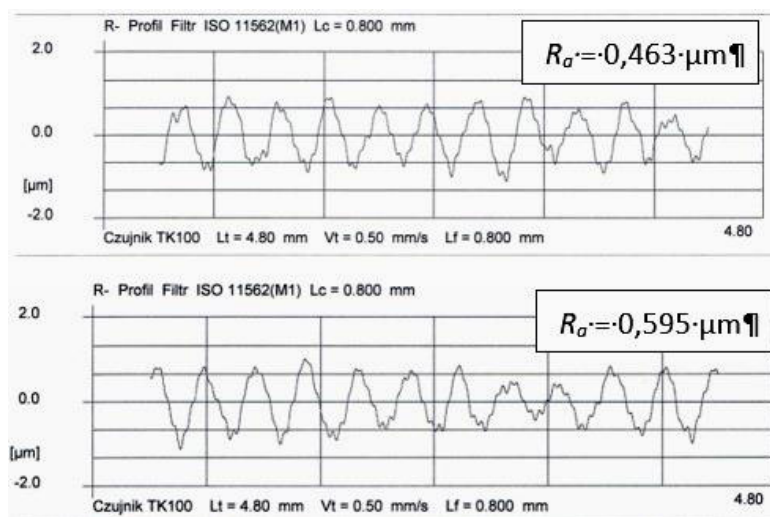
7.3. Kształtowanie chropowatości powierzchni w operacjach toczenia i szlifowania poprzedzających proces pojemnikowego wygładzania

Jako materiał obrabiany w przyjętym programie badań zastosowano stal austenityczną AISI 304 w kształcie wałka o średnicy $\varnothing 20$ i długości 50 mm. W celu zróżnicowania warunków realizacji operacji technologicznych, proces toczenia i szlifowania wykonano narzędziami o zróżnicowanych właściwościach skrawnych, zdefiniowanych jako ostre i stępione. Przy tym założeniu badano, w jaki sposób tak zróżnicowane warunki obróbki, wpływają na przebieg i wyniki procesu wygładzania i polerowania pojemnikowego. W takim stanie powierzchnie po szlifowaniu będą poddane procesom wygładzania i polerowania pojemnikowego. Proces toczenia przeprowadzono na tokarce CTX 310 z zastosowaniem noża tokarskiego z płytką skrawającą z węgla spiekane ORION WSP CCMW 09T308 6605 (rys.101). Zastosowano obróbkę jednoprzęciową z głębokością skrawania $a_p = 0,1$ mm, prędkością skrawania $v_c = 250$ m/min oraz posuwem $f_t = 0,1$ mm/obr.



Rys. 101. Widok płytki skrawającej SANDVIK TNMG160404R-K 4425 a) i stopień jej zużycia b)

Do pomiaru chropowatości powierzchni obrabianych zastosowano profilometr stykowy Hommel Tester T8000. Profile chropowatości powierzchni po tych operacjach realizowanych z zastosowaniem płytki ostrej i stępionej przedstawiono na rys.102.



Rys.102 Profile chropowości powierzchni po toczeniu : a) narzędzie ostre, b) narzędzie stępione

Z analizy kształtu tych profili wynika, że charakteryzują się one zróżnicowaną strukturą geometryczną, co wykazują wartości wybranych parametrów profili chropowości, wyznaczone zarówno w kierunku horyzontalnym, jak i wertykalnym, a także wartościami parametrów mieszanych. Jest to z jednej strony wynikiem odwzorowania kształtu wierzchołków skrawających, zarówno w skali makro, jak i mikro oraz zakłóceń powodowanych drganiami przedmiotu obrabianego i narzędzia. Jest to także skutkiem oddziaływań cieplno-mechanicznych w strefie obróbki. Te oddziaływania powodują zwiększenie stopnia plastyczności materiału obrabianego w tej strefie, co wpływa na lokalne warunki przemieszczenia materiału i kształt śladów obróbkowych w przekroju poprzecznym. Towarzyszą temu zjawiska zakłócające, wpływając na nieciągłości procesu tworzenia wiórów, powstawanie wypływek, lokalnych odkształceń plastycznych i narostu na ostrzu płytki skrawającej. Proces jest w stanie quasi stabilnym, a kształtowana topografia powierzchni obrabianej, charakteryzuje się zmiennością i brakiem powtarzalności.

Potwierdzają to wartości podstawowych parametrów profili chropowości powierzchni (tab.20).

Tab. 20. Parametry profili chropowości powierzchni stali AISI 304 po operacji toczenia

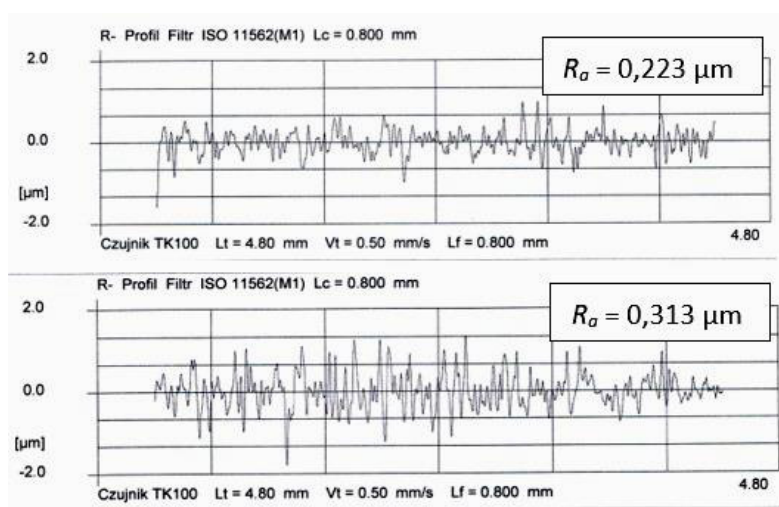
RODZAJ OPERACJI	$R_a, \mu m$		$R_t, \mu m$		R_{Sm}, mm		$W_t, \mu m$	
Stan narzędzia	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe
TOCZENIE	1,13	4,12	4,38	41,81	0,124	0,349	2,22	16,72

Proces szlifowania powierzchni po toczeniu płytkami skrawającymi o zróżnicowanym stanie ostrości, przeprowadzono na uniwersalnej szlifierce do wałków i otworów JOTES SWA-25 prod. Fabryki Szlifierek Ponar Jotes (Polska) –rys.103.



Rys. 103 Uniwersalna szlifierka do wałków i otworów JOTES SWA-25

Obróbkę przeprowadzono w kinematyce szlifowania wgłębnego z zastosowaniem ściernicy o następującej charakterystyce technicznej PENTAR 1.400x35x127 CrA 80K P. Szlifowano z głębokością $a_e=0,2$ mm, przy prędkości szlifowania $v_s=30$ m/s, prędkości obrotowej przedmiotu $n=500$ obr/min ($v_s=31,4$ m/min), posuwie $v_f=0,96$ mm/obr i chłodzeniu 5% emulsją olejową. Profile chropowatości powierzchni po tych operacjach z zastosowaniem ściernicy ostrej i stępionej przedstawiono na rys.104.



Rys.104. Profile chropowatości powierzchni po szlifowaniu: a) ściernicą ostrą, b) ściernicą stępioną

Na podstawie analizy strukturalnej tych profili można oceniać, iż stopień zużycia ściernicy w znaczący sposób wpływa przede wszystkim na wartości parametrów wysokościowych profilu. To jest wynikiem dużych obciążeń cieplno-mechanicznych w strefie obróbki, wpływających na wzrost przemieszczeń obrabianego materiału i tworzenia nieregularnych odkształceń i zmiennych w obszarze oddziaływania aktywnych ziaren ściernych. Istotnym czynnikiem, jest też generowanie relatywnie dużych i nieregularnych wypływek. To wpływa na duży stopień rozwinięcia profili chropowatości obrabianych powierzchni. Potwierdzają to wartości podstawowych parametrów profili chropowatości powierzchni (tab.10).

Tab. 21. Parametry profili chropowatości powierzchni stali AISI 304 po procesie toczenia i szlifowania narzędziami o zróżnicowanym stopniu ostrości

RODZAJ OPERACJI	$Ra, \mu m$		$Rt, \mu m$		RSm, mm		$Wt, \mu m$	
Stan narzędzia	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe
TOCZENIE	1,13	4,12	4,38	41,81	0,124	0,349	2,22	16,72
SZLIFOWANIE	0,48	0,73	4,38	5,31	0,104	0,132	17,61	9,23

Jak wynika z powyższego, w zależności od stanu właściwości skrawnych badanych narzędzi, zarówno w przypadku operacji toczenia, jak i szlifowania realizowanych przy tych samych parametrach i warunkach obróbki, chropowatość obrobionych powierzchni wykazuje znaczące różnice. Różnice te dotyczą zarówno parametrów wysokościowych, jak i częstotliwościowych profili obrobionych powierzchni. Wynika to przede wszystkim ze zmiany kształtu wierzchołka płytki skrawającej wytaczaka i kształtu wierzchołków ziaren aktywnych narzędzia ściernego, wpływających na ich odwzorowanie w kształtowaniu SGP. Wpływa to również, zwłaszcza w procesie szlifowania, na ilość ciepła powstającego w strefie obróbki, które generuje zmiany fizyczne i odkształcenia plastyczne w warstwie wierzchniej.

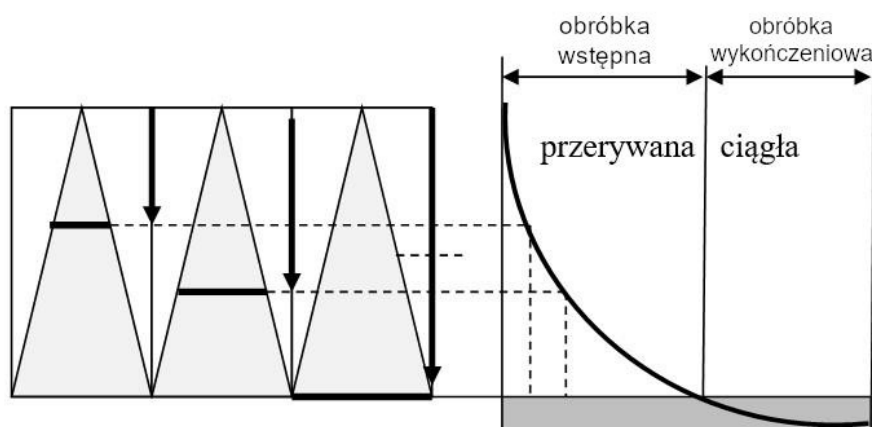
Pomimo formalnego podobieństwa technologicznego, już na tym etapie procesu technologicznego, poszczególne powierzchnie niosą odmienne cechy wyjściowe dla kolejnej operacji, którą jest wygładzanie pojemnikowe za pomocą kształtek ściernych.

7.4. Badania procesu kształtowania chropowatości powierzchni w procesie wygładzania pojemnikowego

Proces wygładzania pojemnikowego, stanowiący końcowy etap procesu obróbki sekwencyjnej, był realizowany w dwóch etapach, przeprowadzonych z zastosowaniem dwóch typów wygładzarek pojemnikowych, charakteryzujących się różną kinematyką procesu obróbki. Taka struktura tego etapu obróbki została przyjęta z uwagi na charakter przebiegu procesu wygładzania powierzchni, w którym można wyróżnić dwa etapy obejmujące:

- usuwanie wierzchołków nierówności (obróbka powierzchni nieciągłej),
- równomierne wygładzanie (obróbka powierzchni ciągłej).

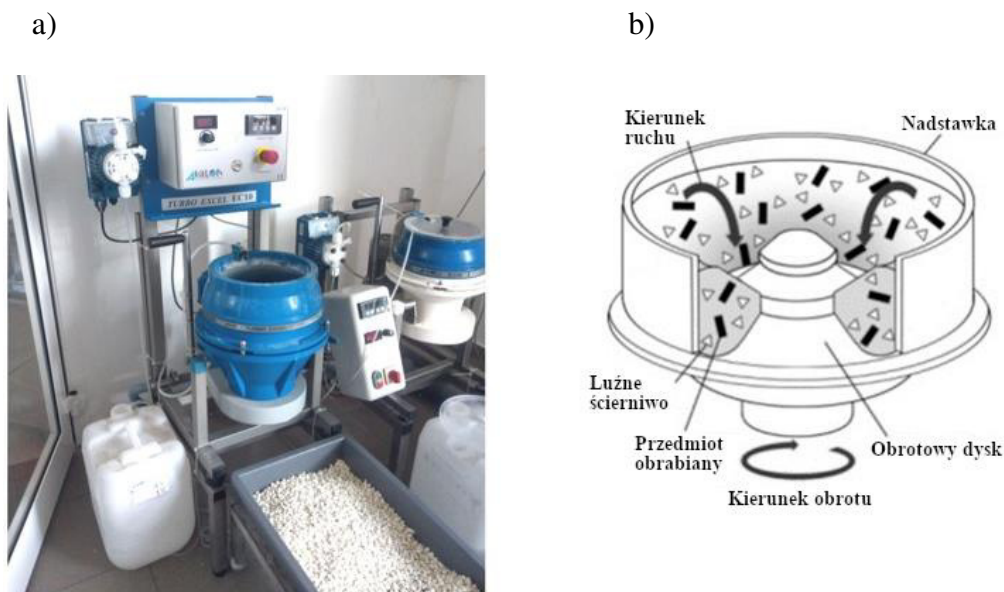
Etapy te można charakteryzować, jako obróbka wstępna i obróbka wykończeniowa powierzchni wyjściowej po procesie szlifowania (rys.105).



Rys.105. Schemat przebiegu procesu kształtowania struktury geometrycznej powierzchni podczas wygładzania pojemnikowego

W etapie obróbki wstępnej, występuje głównie intensywne usuwanie wierzchołków nierówności powierzchni z zastosowaniem kształtek ściernych o dobrych właściwościach skrawnych. Natomiast proces obróbki wykończeniowej, odbywa się już w pełnym materiale, ze zmniejszoną intensywnością z zastosowaniem kształtek do obróbki wykończeniowej lub polerskiej. W tym etapie kształtowana jest końcowa jakość chropowatości obrabianych powierzchni.

Proces obróbki wstępnej był realizowany na wygładzarce rotacyjno - kaskadowej EC10 produkcji AVALON (rys.106).



Rys.106. Widok rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej EC10 a)
kinematyka ruchu kształtek roboczych b)

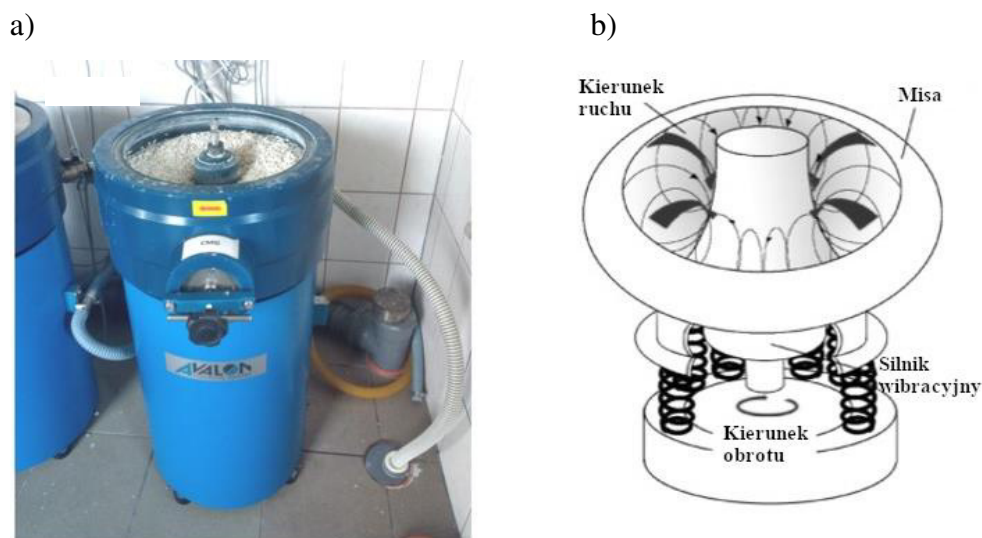
W wygładzarce tej, podobnie jak to ma miejsce w wygładzarce EC6, wsad roboczy składający się kształtek ściernych i środków wspomagających wykonuje ruch rotacyjny, generowany ruchem obrotowym wirnika pojemnika roboczego. W aktywnym wsadzie roboczym, kształtki wykonują jeszcze dodatkowy ruch wirowy. Jako narzędzia obróbkowe, zastosowano ceramiczne kształtki ściernie GP10x10 o kształcie graniastosłupa pochyłego (rys.107). Zastosowano wsad roboczy o masie 5 kg.



Rys. 107. Ceramiczne kształtki ściernie GP10x10

Proces obróbki przeprowadzono w czasie $t=30$ min z prędkością obrotową wirnika wygładzarki $n_w=320$ obr/min.

Końcowy proces obróbki wygładzającej, przeprowadzono na wygładzarce wibracyjnej W15 także produkcji .AVALON (rys.108).



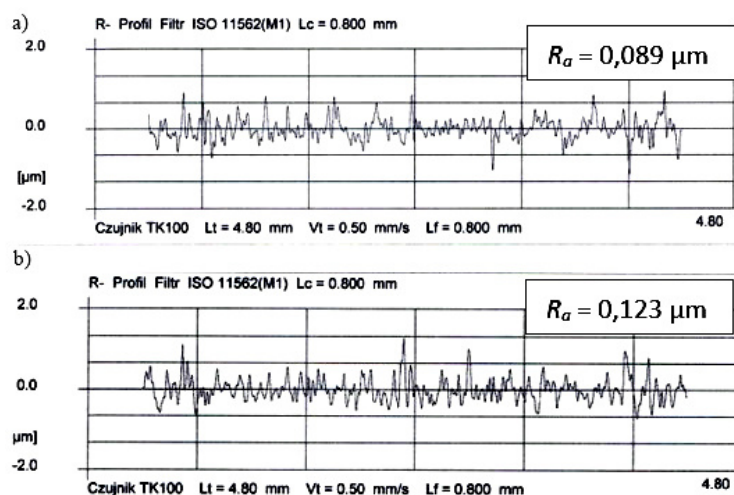
Rys. 108. Widok wibracyjnej wygładzarki pojemnikowej W15 a) i kinematyka ruchu kształtek roboczych b)

W wygładzarce wibracyjnej ruch wsadu roboczego generowany jest przez układ drgań, który wprawia wsad w ruch drgający oraz ruch obrotowy. Ruch drgający jest zasadniczym ruchem roboczym, natomiast ruch obrotowy wsadu roboczego jest ruchem pomocniczym. W tym procesie jako narzędzia obróbkowe zastosowano ceramiczny mix gładzący CMG + proszek ścierny GP20 (rys.109) o łącznej masie wsadu 6 kg.



Rys. 109. Porcelanowe kształtki polerskie CMG a) i proszek ścierny GP20

Proces obróbki przeprowadzono w czasie $t=14$ godzin z prędkością obrotową zespołu napędowego układu wibracyjnego $n=2400$ obr/min i amplitudą drgań $f=1,25$ mm. Profile chropowatości powierzchni po tych dwóch etapach obróbki wygładzającej z zastosowaniem wygładzarek pojemnikowych EC10 i W15, przedstawiono na rys.110.



Rys. 110. Profile chropowatości powierzchni próbek po operacjach wygładzania pojemnikowego w wygładzarce EC10 i W15, po poprzedzających operacjach toczenia i szlifowania z zastosowaniem narzędzi ostrych a) i stępionych b)

Z analizy struktury tych profili wynika, że powierzchnia wygładzana po wstępnych operacjach obróbki narzędziami stępionymi, charakteryzuje się mniejszym wysokościowym rozkładem rzędnych profilu, a także mniejszą wartością maksymalnych wysokości nierówności R_t . To z kolei wpływa na mniejszą wartość parametru R_a . Jest to wynikiem lepszego stanu wyjściowego powierzchni do operacji obróbki wygładzającej. Dotyczy to zarówno stanu nierówności powierzchni, jak i stanu warstwy wierzchniej, ukształtowanej przy mniejszych obciążeniach cieplno-mechanicznych, mniejszym poziomie cieplno-mechanicznych odkształceń strukturalnych oraz mniejszym zróżnicowaniu lokalnych mikrotwardości.

Transformację chropowatości powierzchni w całym sekwencyjnym procesie obróbkowym, składającym się z operacji toczenia, szlifowania i wygładzania pojemnikowego, przedstawiono w tab.22.

Tab. 22. Transformacja chropowatości powierzchni w sekwencyjnym procesie obróbki stali AISI 304 w zależności od stanu ostrości narzędzi obróbkowych w zależności od stanu ostrości narzędzi

RODZAJ OPERACJI	$R_a, \mu\text{m}$		$R_t, \mu\text{m}$		RSm, mm		$Wt, \mu\text{m}$	
	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe	Ostre	Tępe
TOCZENIE	1,13	4,12	4,38	41,81	0,124	0,349	2,22	16,72
SZLIFOWANIE	0,48	0,73	4,38	5,31	0,104	0,132	17,61	9,23
WYGŁADZANIE	0,28	0,33	3,46	4,06	0,208	0,195	4,43	10,44

Z powyższych danych wynika, w jaki sposób stan powierzchni w operacjach poprzedzających realizowanych narzędziami o zróżnicowanym stanie ostrości, wpływa na chropowatość powierzchni w obróbce wygładzającej. Widać, że wpływ ten w szczególności odnosi się do parametrów wysokościowych Ra , Rt i Wt . W odniesieniu do parametru RSm charakteryzującego stopień rozwinięcia profilu powierzchni, ten wpływ jest w szczególności widoczny w początkowych operacjach badanego procesu.

7.5. Transformacja chropowatości powierzchni wariantach sekwencyjnego procesu technologicznego

Do oceny intensywności zmian struktury geometrycznej powierzchni w sekwencyjnym procesie obróbki, zastosowano wskaźnik transformacji o następującej postaci:

$$T = Ra_i / Ra_{i+1},$$

gdzie: Ra_i - średnie arytmetyczne odchylenie profilu powierzchni z operacji poprzedzającej,
 Ra_{i+1} - średnie arytmetyczne odchylenie profilu powierzchni w operacji następującej.

Umożliwia to porównanie przebiegu analizowanych procesów obróbki z zastosowaniem narzędzi o różnym stanie właściwości skrawnych oraz określenie ich wpływu na jakość i efektywność sekwencyjnego procesu obróbki (rys.111).

Międzyoperacyjną efektywność procesu obróbki z zastosowaniem narzędzi ostrych oraz stępionych w odniesieniu do parametru Sa w obliczono z za pomocą wskaźnika o następującej postaci:

$$\Delta Ra = \frac{Ra(0) - Ra(45)}{Ra(0)} \cdot 100\% ,$$

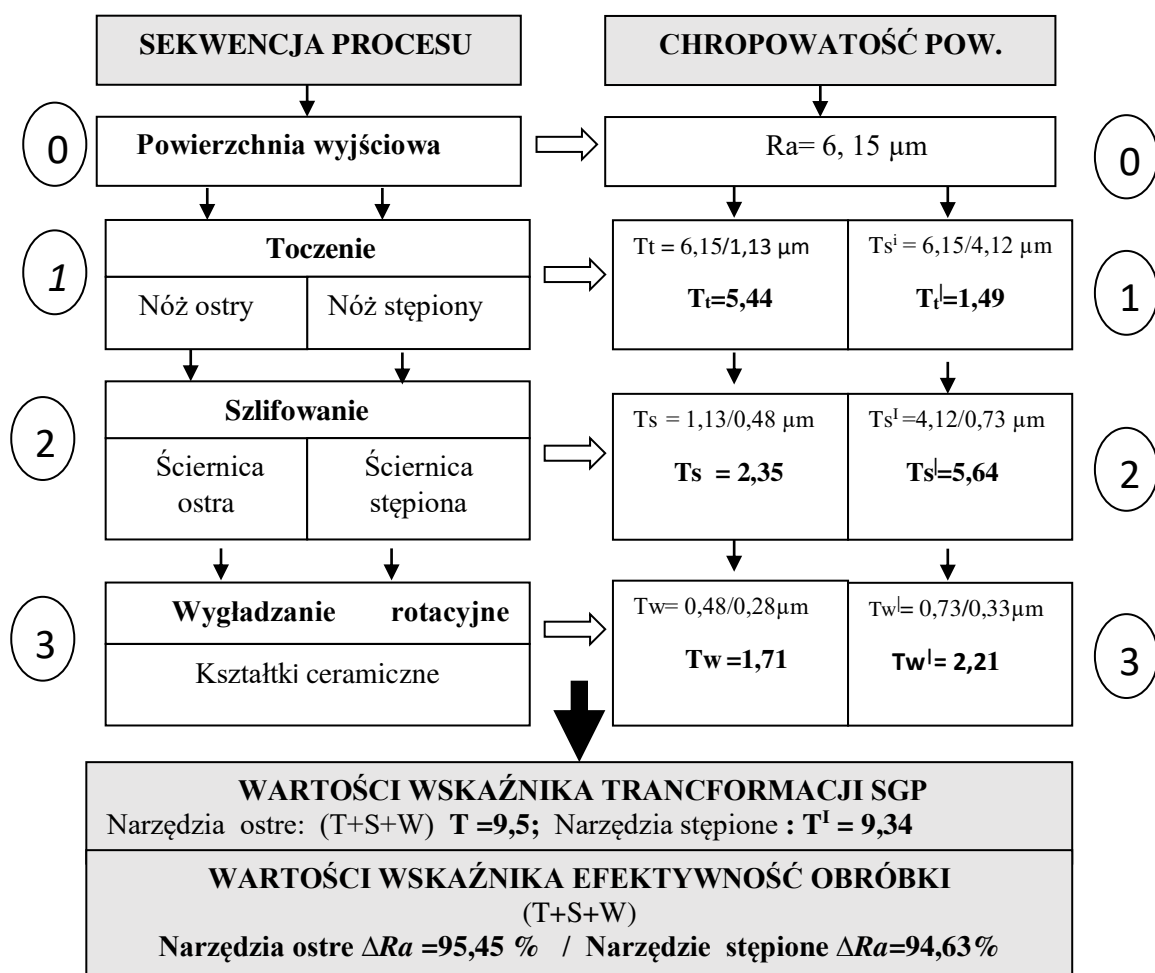
(1)

gdzie: $Ra(0)$ – początkowa wartość wybranego parametru SGP,
 $Ra(45)$ – wartość parametru po zakończeniu procesu obróbki.

Obliczone wartości międzyoperacyjnych wskaźników efektywności procesu obróbki z zastosowaniem narzędzi ostrych i stępionych przedstawiono w tab.17.

Tab. 23. Wartości wskaźnika efektywności obróbki ΔRa dla badanych sposobów

Sposób obróbki	Parametry struktury geometrycznej powierzchni	
	Narzędzie ostre	Narzędzie stępione
Toczenie	$\Delta Ra=81,5 \%$	$\Delta Ra=33,0 \%$
Szlifowanie	$\Delta Ra=57,5 \%$	$\Delta Ra=82,3 \%$
Wygładzanie pojemnikowe	$\Delta Ra=41,6 \%$	$\Delta Ra=54,7 \%$
Pełny sekwencyjny proces obróbki	$\Delta Ra=95,45 \%$	$\Delta Ra=94,63 \%$



Rys.111. Transformacja chropowatości powierzchni stali AISI 304 w sekwencyjnym procesie technologicznym w zależności od stanu zużycia narzędzi obróbkowych w operacjach poprzedzających proces wyglądania

Jak wynika z analizy powyżej przedstawionych danych, wartości rozpatrywanych wskaźników charakteryzujących transformację chropowatości powierzchni i efektywność obróbki, w znaczący sposób zależą od stanu ostrości narzędzi w operacjach poprzedzających.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników badań dwóch wariantów sekwencyjnego procesu obróbki, złożonego z operacji toczenia i szlifowania narzędziami ostrymi i stępionymi oraz operacji wyglądania pojemnikowego, można sformułować następujące wnioski:

Wnioski z przeprowadzonych badań

1. Wykazano, że zarówno w operacji toczenia, jak i szlifowania stali AISI 304, stopień ostrości stosowanych w nich narzędzi, znacząco wpływa na kształtowanie chropowatości powierzchni obrabianej. Wpływ ten w szczególności dotyczy stopnia rozwinięcia profili obrabianych powierzchni określany wartościami parametru RSm oraz parametrów wysokościowych profilu Ra , Rt , Wt .
2. Wykazano, że zużycie narzędzi obróbkowych zastosowanych w sekwencyjnym procesie obróbki złożonym z operacji toczenia, szlifowania i wygładzania pojemnikowego, ma negatywny wpływ na wartości wskaźnika transformacji chropowatości powierzchni obrabianej $T = 9,50 \mu m$ / $T^i = 9,34 \mu m$.
3. Wykazano także, że zużycie narzędzi obróbkowych w operacjach poprzedzających ma także duże znaczenie na efektywność obróbki wyrażoną wskaźnikiem określającym intensywność zmiany chropowatości powierzchni $\Delta Ra = 95,45\%$ / $\Delta Ra = 94,63\%$.
4. Z powyższego wynika, iż następstwa technologiczne operacji poprzedzających, należy uwzględniać w aspekcie optymalizacji jakości technologicznej powierzchni przedmiotu obrabianego oraz porównywania wyników badań, zwłaszcza w przypadku precyzyjnej obróbki wykończeniowej. Te same operacje mogą bowiem zapewniać inne wyniki jakościowe, jeśli przenoszone z poprzedzających operacji cechy przedmiotu obrabianego, będą się różnić pod względem mechanicznym, strukturalnym i topograficznym.
5. Znajomość następstwa technologicznego może ułatwiać porównywanie wyników złożonych procesów technologicznych, umożliwia lepsze programowanie badań doświadczalnych i symulacyjnych, a także optymalizowanie takich procesów. Jest to istotne w szczególności do procesów obróbki elementów o wysokich wymaganiach jakościowych i eksploatacyjnych.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy w zakresie obróbki powierzchniowej prowadzonej w wygładzarkach pojemnikowych, umożliwiła sprecyzowanie istotnych zagadnień, dotyczących stosowania uchwytów przedmiotowych w tych procesach. Szczególną uwagę zwrócono na uchwyty aktywne, które nadają przedmiotom obrabianym dodatkowe ruchy pomocnicze. Oceniono ich zalety w aspekcie wpływu na efektywność procesu obróbki i jakość powierzchni obrabianych w odniesieniu do ich chropowatości. Na tej podstawie wytyczono poznawcze i utylitarne cele rozprawy. W celu przeprowadzenia badań doświadczalnych, został autorsko zaprojektowany i zbudowany innowacyjny aktywny uchwyt przedmiotowy, generujący ruchy obrotowe, wibracyjne i obrotowo-wibracyjne przedmiotu obrabianego, przystosowany do mocowania na rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej EC6. Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz analizy otrzymanych wyników potwierdzają, że zasadniczy cel rozprawy, którym było poznanie mechanizmu kształtowania chropowatości powierzchni w procesie wygładzania pojemnikowego w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej EC6, z zastosowaniem dodatkowych ruchów przedmiotu zamocowanego w aktywnym uchwycie, został osiągnięty i odpowiednio uzasadniony. Również drugi z postawionych celów, dotyczący wpływu operacji poprzedzających (dziedzictwa technologicznego) na efektywność i jakość powierzchni przedmiotów obrabianych na przebieg i wyniki operacji obróbki wykończeniowej w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, w której kształtowana jest ostateczna jakość technologiczna wyrobu, został osiągnięty i potwierdzony. Udowodnione zostały także przyjęte naukowe hipotezy rozprawy.

Przeprowadzone analizy i badania odnoszą się do jednego typu i wielkości rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej cEC6, o kinematyce powszechnie stosowanej w tego typu urządzeniach. Stąd zdobyta wiedza jest w dużym stopniu uniwersalna i może być wykorzystana przy realizacji procesów obróbki w tego typu wygładzarkach, a także w tych, w których istnieje możliwość stosowania aktywnych uchwytów przedmiotowych, np. wygładzarkach wibracyjnych, rotacyjnych, strumieniowych.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań i ich wielokierunkowych analiz, sformułowano wnioski o charakterze poznawczym, metodycznym i utylitarным oraz zaproponowano wnioski do dalszych badań.

8.1. Wnioski poznawcze

1. W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono, że sposób kształtowania chropowatości powierzchni w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem aktywnego uchwytu przedmiotowego, w dużym stopniu zależy od dodatkowych obrotowych i obrotowo-wibracyjnych ruchów pomocniczych wykonywanych przez przedmiot obrabiany. Ruchy te w istotny sposób wpływają na kształtowanie śladów obróbkowych, będących wynikiem elementarnych zjawisk obróbkowych w postaci mikroskrawania, zarysowywania, bruzdowania, kraterowania.
2. Potwierdzono, że chropowatość powierzchni przedmiotów obrabianych z pomocniczym ruchem obrotowym i zintegrowanym ruchem obrotowo-wibracyjnym, charakteryzuje się wyraźnie mniejszym stopniem rozwinięcia opisanym parametrem S_{dr} , w porównaniu z powierzchnią przedmiotów obrabianych w uchwycie stacjonarnym.. Powierzchnie obrabiane z dodatkowymi ruchami przedmiotu obrabianego, charakteryzują się również większymi krzywiznami wierzchołków nierówności opisanymi parametrem S_{sc} , a także mniejszymi kątami ich pochylenia opisanymi parametrem S_{dq} wraz ze wzrostem czasu obróbki. Ten charakter zmian jest szczególnie wyraźny w przypadku obróbki ze zintegrowanym ruchem obrotowo-wibracyjnym przedmiotu obrabianego.
3. Na podstawie tej wiedzy można wnosić, iż w procesie wygładzania realizowanym w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem aktywnego uchwytu przedmiotowego, najlepsze efekty w zakresie kształtowania chropowatości osiąga się z zastosowaniem ruchów obrotowo-wibracyjnych przedmiotu obrabianego.
4. Wykazano, że ten sposób obróbki zapewnia także znacząco większą intensywność procesu obróbki, w porównaniu z obróbką realizowaną jedynie obrotami przedmiotu, a zwłaszcza z obróbką prowadzoną w uchwycie stacjonarnym. To synergiczny efekt wpływu złożonego układu wzajemnych ruchów przedmiotu i kształtek roboczych, oraz odmienności elementarnych zjawisk występujących w strefie obróbki.
5. Na kształtowanie struktury chropowatości w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem aktywnego uchwytu przedmiotowego, w mniejszym stopniu wpływa częstotliwość ruchu drgającego przedmiotu f , w porównaniu do prędkości obrotowej wirnika w komorze roboczej wygładzarki n generującego ruch wirowy kształtek roboczych. Częstotliwość drgań w znaczący sposób wpływa na stopień rozwinięcia powierzchni obrabianej, opisywaną liczbę wierzchołków nierówności przypadającej na jednostkę długości profilu chropowatości RP_c i S_{cc} .

6. Zaproponowany sekwencyjny proces 3-etapowej obróbki wygładzającej, pozwala na korzystanie ze zróżnicowanych poziomów energetycznych wsadu roboczego wygładzarki pojemnikowej, przez przemieszczanie przedmiotu obrabianego w jej kierunku promieniowym. Umożliwia to sterowanie przebiegiem i intensywnością obróbki wstępnej, wygładzającej i wykończeniowej, zarówno w odniesieniu do parametrów procesu, jak i czasu obróbki.
7. Wpływa to w istotny sposób na zwiększenie intensywności procesu obróbki w porównaniu z przypadkiem, kiedy jest realizowany w tym samym okresie czasu z jedną orientacją przedmiotu obrabianego w strefie najwyższej energii wsadu roboczego: $\Delta Sa=35,3\%$ / $\Delta Sa=59,1\%$.
8. Wykazano, że na końcowy stan chropowatości powierzchni kształtowanych w sekwencyjnej obróbce ubytkowej z końcowym procesem wygładzania pojemnikowego, istotne wpływa następstwo operacji poprzedzających. Potwierdza to przedstawiony w pracy wpływ stopnia zużycia narzędzi skrawających i ściernych zastosowanych w operacjach poprzedzających.
9. Wykazano, że dziedzictwo technologiczne może mieć istotne znaczenie poznawcze w złożonych sekwencyjnych procesach technologicznych, zwłaszcza w przypadku precyzyjnej sekwencyjnej obróbki wykończeniowej. Może ono mieć także istotne znaczenie w aspekcie porównywania wyników prac badawczych oraz optymalizacji procesów obróbki o wielooperacyjnej strukturze technologicznej.

8.2. Wnioski uytylitarne

1. Opracowany aktywny uchwyt przedmiotowy, umożliwiający nadawanie pomocniczych ruchów obrotowych i obrotowo-wibracyjnych przedmiotowi obrabianemu w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej, umożliwia modyfikację procesu obróbki powierzchniowej, poprzez sterowanie mechanizmem kształtowania chropowatości obrabianych powierzchni w wyniku sterowanych zmian udziału elementarnych zjawisk obróbkowych.
2. Wpływ operacji poprzedzających, na procesy wygładzania pojemnikowego ma duże znaczenie dla praktyki przemysłowej. Synergiczny wpływ operacji poprzedzających, może bowiem mieć znaczący wpływ na efektywność procesu wygładzania pojemnikowego oraz jakość chropowatości powierzchni obrabianej i stan jej warstwy wierzchniej.

3. Zaproponowany 3-etapowy proces obróbki w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem przemieszczeń aktywnego uchwytu przedmiotowego, rozszerza możliwości sterowania przebiegiem procesu obróbki, z uwzględnieniem zmiennego poziomu energii kinetycznej kształtek roboczych i zmiennej intensywności obróbki. Może on mieć również zastosowanie do innych typów wygładzarek pojemnikowych o odmiennej kinematyce działania.

8.3. Wnioski do dalszych badań

Badania i analizy przeprowadzone w ramach niniejszej pracy, wskazały na możliwości zastosowania aktywnych uchwytów przedmiotowych w procesach wygładzania w rotacyjno-kaskadowych wygładzarkach pojemnikowych. Na podstawie uzyskanej wiedzy oraz własnych doświadczeń z praktyki przemysłowej, można również wskazać dalsze kierunki badań procesów obróbki pojemnikowej z zastosowaniem aktywnych uchwytów przedmiotowych, które mogą przyczynić się do dalszego wzrostu efektywności i jakości tych procesów. Mogą one dotyczyć następujących zagadnień:

1. Opracowania innowacyjnych konstrukcji aktywnych uchwytów przedmiotowych o rozszerzonych możliwościach orientacji przedmiotów obrabianych w aktywnym wsadzie roboczym, min. pochylania przedmiotów o określony kąt względem kierunku ruchu kształtek roboczych w strefie obróbki, orientacji w kierunku wysokościowym komory roboczej, nadawania zmiennych prędkości obrotowych i kierunków ich ruchu.
2. Modelowania i doświadczalnych badań rozkładu energii wsadu roboczego w przestrzeni roboczej różnych typów wygładzarek (np. wibracyjnych, bębnowych i planetarnych). Powinny one uwzględniać: kształt i wymiary komór roboczych wygładzarek, rodzaj i wielkość kształtek roboczych oraz kinematykę ich ruchu i parametry obróbki.
3. Badań doświadczalnych efektywności procesów obróbki pojemnikowej z zastosowaniem uchwytów przedmiotowych różnych gatunków materiałów, z uwzględnieniem zmiennych parametrów i warunków obróbki oraz różnych rodzajów kształtek roboczych w zakresie obróbki wstępnej i gładkościowej, przy różnej ich orientacji w przestrzeni wsadu roboczego.
4. Badań procesu obróbki pojemnikowej z zastosowaniem uchwytów przedmiotowych wyrobów o zróżnicowanych kształtach i gabarytach, w tym posiadających różnego rodzaju specyficzne cechy geometryczne, takie jak: zagłębienia, otwory i nieciągłości, z zastosowaniem określonej orientacji przedmiotów obrabianych względem kierunku ruchu kształtek roboczych.

5. Badań procesów obróbki pojemnikowej z zastosowaniem aktywnych uchwytów przedmiotowych w odniesieniu do kształtowania specyficznych cech obrabianych powierzchni, takich jak: refleksyjność, matowość, kolorystyka i lokalne maskowanie z zastosowaniem różnych rodzajów kształtek ściernych i polerskich.
6. Badań optymalizacyjnych procesów obróbki pojemnikowej z uwzględnieniem możliwości sterowania torem ruchu kształtek roboczych w strefie ich kontaktu z powierzchnią obrabianą oraz ograniczenia ich ruchu unoszenia poprzez zastosowanie tarcz blokujących.

Bibliografia

1. Barletta i in.: *Experimental investigation and modelling of fluidized bed assisted drag finishing according to the theory of localization of plastic deformation and energy absorption*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014 ·
2. Barletta M. i in.: *A comparative evaluation of fluidized Bed assisted drag finishing and centrifugal disc dry finishing*. Engineering Science and Technology, an International Journal, vol.17,2014
3. Brinksmeier E. in.: *Process signatures-a new approach to solve the inverse surface integrity problem in machining processes*. Procedia CIRP, vol.13,2014
4. Brinksmeier E. in.: *Underlying mechanisms for developing process signatures in manufacturing*. Nanomanufacturing and Metrology, vol. 1,2018
5. Brinksmeier E. i in.: *Process Signatures – a new approach to solve the inverse surface integrity problem in machining processes*. Procedia CIRP 13, 2014
6. Brinksmeier E. i in.: *Process signatures - the missing link to predict surface integrity in machining*. Procedia CIRP 71, 2018
7. Burakowski T.: *Synergizm technologii wytwarzania a trwałość eksploatacyjna narzędziowych systemów areologicznych*. Problemy Eksploatacji, nr 4,2011
8. Campini D.: *Impact velocity, Almen strip curvature and residual stress modelling in vibratory finishing*. Graduate Department of Mechanical and Industrial Engineering
9. Cariapa V. i in.: *Development of a metal removal model using spherical ceramic media in a centrifugal disc mass finishing machine*. International Journal Advanced Technology, 2008
10. Ciampini D. in.: *Characterization of vibratory finishing using the Almen system*. Wear, vol.264,2008
11. Grzesik W.: *Zastosowanie koncepcji cech rozpoznawczych procesu do prognozowania właściwości eksploatacyjnych części maszyn*. Mechanik, nr 3, 2019
12. Grzesik W.: *Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn* Mechanik, nr.8-9,2015
13. Hashimoto F. i in.: *Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process*. CIRP, vol.65,2016
14. Hashimoto Y. i in.: *Fundamental investigation gyro finishing experimental investigation of contact force between cylindrical workpiece and abrasive media under dry condition*. Precision Engineering, vol.67,2021
15. Hashimoto Y. in.: *Improving finishing efficiency using a cover plate in gyro finishing*. Precision Engineering, vol.74,2022
16. Juniewicz M., i in.: *Badania procesu obróbki powierzchniowej stali AISI 304 w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z zastosowaniem aktywnego uchwytu przedmiotowego*. Materiały XV Naukowej Szkoły Obróbki Skrawaniem i XLIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej - Inteligentne rozwiązania we współczesnym rozwoju obróbki ubytkowej, Ce and Technology, 2022
17. Juniewicz M., Plichta J. i in.: *Investigation of the Surface Treatment Process of AISI 304 Stainless Steel by Centrifugal Disc Finishing with the Use an Active Workpiece Holder* MDPI Materials 2022,15(19), 6762

18. Juniewicz M., Plichta J.: *Sequential treatment process in a rotary container polishing machine with periodic workpiece location changes in working abrasives areas with decreasing kinetic energy*. Journal of Mechanical and Energy Engineering, Vol 6(46) No.2
19. Juniewicz M., Plichta J.: Pat.243716 *Urządzenie do obrabiania wstępnie uformowanych elementów w medium roboczym*. (14.07 2023)
20. Kacaras A. in.: *Influence of rotational speed on surface states after stream finishing*. *Perpedia CIRP* 71,2018
21. Katalog kształtek do obróbki pojemnikowej MARBAD Zakład Techniki Obróbki Powierzchni
22. Katalog kształtek do obróbki pojemnikowej Metal Finishing Supply Company. Inc
23. Klocke F. i in.: *Technology chain optimization: a systematic approach considering the manufacturing history*. Production Engineering Research and Development. Vol.8, 2014
24. Kopp M. i in.: *Experimental investigations of the workpiece-media-interaction and the*
25. Kopp M., Uhlmann E.: *Potential of robot-guided centrifugal disc finisher*. Proceedings of the 11th Congress the German Academic Association for Production Technology. Dresden 2021
26. Kukielka L.: *Podstawy badań inżynierskich*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002
27. Lachenmaier M. in.: *Influence of different input parameters on the contact conditions determining the surface integrity of workpieces in unguided vibratory finishing process*. *CIRP* vol.71,2018
28. Liubimov V. Oczóś K.: *Wybrane zagadnienia fizyki kształtowania struktur geometrycznych powierzchni*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2010
29. Malkorra I. i in.: *Identification of interaction mechanisms during drag finishing by means of original macroscopic numerical model*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 168, 2021
30. Malkorra I. i in.: *Modeling of drag finishing-influence of abrasive media shape*. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2021
31. Malkorra I. i in.: *The influence of the process parameters of drag finishing on the surface topography of aluminium samples*. *CIRP*, vol.31,2020
32. Malkorra I. i in.: *Numerical modeling of the drag finishing process at a macroscopic scale to optimize surface roughness improvement on additively manufactured (SLM) Inconel 718 parts*. *Procedia CIRP* 108, 2022
33. Marciniak M., Stefko A., Szyrle W.: *Podstawy obróbki w wygładzarkach pojemnikowych*. Wydawnictwo WNT Warszawa 1983
34. Matuszewski M.: *Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej*. Rozprawy Nr 170, Uniwersytet Techniczno Przyrodniczy w Bydgoszczy, Bydgoszcz 3013
35. Mullany B. i in.: *The application of computational fluid Dynamics to vibratory finishing processes*. *CIRP* vol.66,1,2017
36. Oczóś K., Liubimov V.: *Struktura geometryczna powierzchni*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2003

37. *of surface characterization of components in mass finishing process.* International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2017
38. Plichta J., Juniewicz M.: *Research on the influence of workpiece orientation during processing in disc centrifugal machine on the geometrical structure of its surface and processing efficiency.* Journal of Mechanical and Energy Engineering, Vol 4(44) No. 3,
39. Prakasam P.K., Subbiah S.: *Analysis of 1d abrasive vibratory finishing using acoustic emission.* Proceedings of the ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference 2013
40. Salvatore F. i in.: *Experimental and numerical study of media action during tribifinishing In case of SLM titanium parts.* Procedia CIRP, vol.58, 2017
41. Schulze V. i in.: *Qualification of the stream finishing process for surface modification.* CIRP, Vol.66, 2017
42. Sho Itoh i in.: *Influence of Component Toolpath on Material Removal Distribution in*
43. Srivastav S. i in.: *Effect of workpiece orientation lubrication and media geometry on the effectiveness of vibratory finishing of A16061.* 4th International Conference on Material Science and Engineering Technology, 2015
44. *Stream Finishing.* The 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 2019.
- surface topography formation in centrifugal disc finishing.* Procedia CIRP vol.115 2022
45. Sutowski P., Plichta J., Kałduński P.: *Determining kinetic energy distribution of the working medium in a centrifugal disc finishing process- part 1: theoretical analis.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2019
46. Sutowski P., Plichta J., Kałduński P.: *Determining kinetic energy distribution of the working medium in a centrifugal disc finishing process- part 2: experimental analysis with the use of acoustic emission signal.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2019
47. Sutowski P.: *Teoretyczne i doświadczalne podstawy monitorowania oraz oceny wybranych procesów obróbki ściernej i ścierno-erozyjnej z zastosowaniem wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej.* Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2019
48. Uhlmann E. i in.: *Investigation of material removal and surface topography formation in vibratory finishing.* Procedia CIRP, vol.14, 2014
49. Uhlmann E., Kopp M.: *Measurement and modeling of contact forces during robot-guided drag finishing.* Procedia CIRP vol.102, 2021
50. Uhlmann E. i in.: *Discrete element modeling of drag finishing.* Procedia CIRP vol. 31, 2015
51. University of Toronto 2008
52. Vijayaraghavan V. i in.: *State-of-the-art in experimental and numerical modeling*
53. Woźniak K.: *Obróbka powierzchniowa w wygładzarkach pojemnikowych,* WNT Warszawa 2017
54. Zenger F. i in.: *Optimization of the stream finishing process for mechanical surface treatment by numerical and experimental process analis.* CIRP, vol.68/1, 2019

Adresy Internetowe (dostęp: grudzień 2021)

- 55. <http://www.avalon-machines.pl/produkty/>
- 56. <https://www.fintek.co.uk/fintek-industry-case-studies/pulse-surface-finishing-higher-performance-gear-wheels-that-require-fewer-oil-changes/>
- 57. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098614000135>
- 58. <http://www.pfonline.com/articles/drag-finishing>
- 59. <https://pl.rosler.com/pl-pl/produkty/>
- 60. <https://www.otec.de/pl/produkty/>
- 61. <http://www.massfin.com/products-services/machines/centrifugal-disc-systems>
- 62. <http://www.obrobkawibracyjna.pl/ksztaltki-zywiczne-ceramiczne-i-porcelanowe>
- 63. <http://kwasnicki.prawo.uni.wroc.pl/pliki/Rosienkiewicz%20innowacje-%20obrobka%20scierna.pdf>

Katalogi/oferty handlowe (dostęp: grudzień 2021)

- 64. <http://www.avalon-machines.pl/files/download/1065/Maszyny-do-obrobki-powierzchni.pdf>
- 65. <http://www.avalon-machines.pl/files/download/1066/PRECYZYJNE-MASZYNY-JUBILERSKIE.pdf>
- 66. https://www.otec.de/fileadmin/uploads/Downloads/Prospekte/DF_Prospekt_DE.pdf

Spis rysunków

Rys.1. Metody i urządzenia wykorzystywane w badaniach procesów rotacyjnego wygładzania pojemnikowego (opracowanie własne)	8
Rys.2. Podstawowe cechy jakościowe powierzchni elementów metalowych obrabianych w wygładzarkach pojemnikowych (opracowanie własne)	9
Rys.3. Rotacyjno – kaskadowa wygładzarka pojemnikowa EC6: a) widok ogólny, b) schemat komory roboczej (AVALON) [33,45]	10
Rys.4. Cechy charakterystyczne wygładzania pojemnikowego [32]	11
Rys.5. Wirujący strumień kształtek w komorze roboczej rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej: a) widok ogólny, b) tory ruchu kształtek (opracowanie własne)	12
Rys.6. Schemat pracy rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej: a) schemat budowy: 1 - nieruchoma część pojemnika, 2 - wirnik roboczy, 3- wsad roboczy, b) schemat działania sił na element o masie m : F - siła odśrodkowa, F_n - składowa normalna	13
Rys.7. Tor ruchu kształtek roboczych w komorze rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej [33,45]	13
Rys.8. Proces rotacyjnego pojemnikowego wygładzania: a) skala makroskopowa - kształtki ściernie z płynem wspomagającym generują obciążenie mechaniczne (naprężenia normalne σ_n i τ), b) skala mezoskopowa - mieszanina środków ściernych (dyskretnych cząstek) działająca na powierzchnię pod wpływem sił kontaktowych (F_n , F_t , F) z prędkością (v) i przy kątach orientacji (α_m) [27].....	15
Rys.9. Schemat proces rotacyjnego wygładzania pojemnikowego [27]	16
Rys.10. Podstawowe rodzaje śladów obróbkowych powstałych na powierzchniach obrabianych w procesie obróbki w wygładzarkach pojemnikowych będące wynikiem: a) mikrowgłębienia (kraterowania), b) mikroskrawania, c) obtaczania i tarcia [8]	16
Rys.11. Dyskretny model DEM obróbki w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej	17
Rys. 12. Przekrój komory roboczej wygładzarki EC6 a) i przekrój osiowy wsadu roboczego dla zmiennych prędkości obrotowych wirnika napędowego b) [45,46]	18
Rys.13. Rozkład położenia i prędkości elementów w komorze roboczej wygładzarki rotacyjnej oraz wykres zmian prędkości losowo wybranego elementu w funkcji czasu dla różnych prędkości obrotowych wirnika: a-b) $n = 150$ obr/min, c-d) $n = 30$ [45,46]	18
Rys. 14. Widok rozkładu prędkości swobodnych cząstek w strumieniu dla dwóch skrajnych prędkości obrotowych wirnika: $n = 150$ obr/min (a) i $n = 450$ obr/min (b [45,46].....	19
Rys.15. Rozkład średnich wartości energii sygnału emisji akustycznej (AE_{rms}) w przekroju wsadu dla różnych prędkości obrotowych: a) 150 obr/min, b) 300 obr/min, c) 450 obr/min.[45,46]	20
Rys.16 Porównanie wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych: a) średnia wartość sygnału emisji akustycznej AE mierzona w przekroju poprzecznym strumienia b) wypadkowa prędkość w przekroju strumienia wsadu określona metodą DEM (prędkość obrotowa wirnika komory roboczej 450 obr/min, czas symulacji 4,69 s) [45,46] ...	20
Rys.17. Struktura przestrzenna kształtek ściernych a) oraz ich przykładowe kształty b) [33]	23
Rys.18. Podstawowe rodzaje brył ceramicznych kształtek ściernych (Rösler)	24
Rys.19. Podstawowe kształty kształtek ceramicznych MARBAD - Polska [30]	25
Rys.20. Podstawowe kształty kształtek żywicznych (Rösler)	25
Rys.21. Podstawowe kształty kształtek żywicznych MARBAD – Polska [62]	26
Rys. 22 Kształty stalowych kształtek polerskich [21]	26
Rys.23. Podział podstawowych rodzajów uchwytów przedmiotowych stosowanych w wygładzarkach pojemnikowych (opracowanie własne).....	27
Rys.24. Sposób przestrzennej orientacji przedmiotu obrabianego w komorze strumieniowej wygładzarki pojemnikowej[52]	28

Rys.25. Porównanie strzałek ugięcia H próbek ALMEN po 16 min. czasu wygładzania w funkcji od kąta pochylenia φ i położenia wysokościowego h badanych próbek ze stali 1.7225 [52]	29
Rys.26. Proces rotacyjnego wygładzania pojemnikowego: a) układ kinematyczny procesu obróbki (prędkość obrotowa ω , głębokość zanurzenia h , wysokość części δ , ciśnienie hydrostatyczne p , b) przepływ wsadu roboczego względem walcowej powierzchni elementu obrabianego [46]	29
Rys. 27. Wartości naprężeń normalnych i naprężeń stycznych w zależności od kąta orientacji strefy obróbki dla kształtek ściernych w kształcie kulistym i stożkowym [6]	30
Rys.28. Zmiany wartości parametru chropowatości powierzchni obrabianej S_a w zależności od kąta orientacji α strefy obróbki powierzchni i rodzaju kształtek ściernych [32]	31
Rys.29. Uchwyt umożliwiający wysokościową i kątową orientację przedmiotu obrabianego w przestrzeni wsadu roboczego wygładzarki EC6 [19]	32
Rys.30. Sposoby orientacji powierzchni obrabianego przedmiotu w układzie wertykalnym	33
Rys.31. Wpływ kąta pochylenia próbki w układzie horyzontalnym i kąta jej obrotu względem osi, na kształtowanie wartości parametru chropowatości powierzchni R_a w procesie wygładzania [41]	36
Rys.32. Schemat komory roboczej wygładzarki strumieniowej wyposażonej w obrotowy uchwyt przedmiotu [31]	37
Rys.33. Wykres zmian wartości strzałki ugięcia próbki ALMEN H w funkcji prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego n i czasu obróbki t [31]	37
Rys.34. Zmiany wartości parametru chropowatości powierzchni S_a w funkcji prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego n i czasu obróbki t [31]	38
Rys. 35. Rozkład naprężeń ściskających na powierzchni obrabianej δ w funkcji prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego n [31]	38
Rys.36. Realizacja procesu obróbki w wygładzarce strumieniowej z zastosowaniem robota przemysłowego pełniącego funkcję uchwytu przedmiotowego [54]	39
Rys.37. Tor ruchu planetarnego przedmiotu obrabianego w komorze roboczej wygładzarki wibracyjnej realizowany przez robot przemysłowy [42]	39
Rys.38. Zmiany wartości parametru chropowatości powierzchni obrabianej R_z , w zależności od rodzaju zastosowanych kształtek oraz czasu obróbki [42]	40
Rys.39. Wpływ rodzaju kształtek ściernych na ubytek masy przedmiotu obrabianego Δm_w oraz chropowatości powierzchni obrabianej R_a w funkcji czasu obróbki [19]	41
Rys.40. Widok łopatki turbiny ukształtowanej metodą DMLS [48]	41
Rys.41. Widok zrobotyzowanego stanowiska obróbkowego na wygładzarce do obróbki strumieniowej [48]	42
Rys.42. Wykonywane ruchy narzędzia podczas realizowanych badań: a) ruch obrotowy 360° (ścieżka narzędzia A), b) cztery stałe orientacje (ścieżka narzędzia B) [48]	42
Rys.43. Rozkłady wydajności obróbki MR w różnych wariantach procesu wygładzania [48]	43
Rys.44. Widok wygładzarki do obróbki strumieniowej z zainstalowanym aktywnym uchwytem PULSE FINISHING a) i wykres dynamicznych zmian obrotów wrzeczona przedmiotowego b)	43
Rys.45. Rozkłady materiałowe i profile chropowatości powierzchni obrabianych: a) metodą szlifowania, b) metodą wygładzania PULSE FINISHING	44
Rys.46. Szkic konstrukcyjny projektowanego aktywnego uchwytu przedmiotowego do rotacyjno-kaskadowej wygładzarki EC6	51
Rys.47. Model CAD 3D aktywnego uchwytu przedmiotowego	52
Rys.48. Rysunek podstawy uchwytu przystosowany do wygładzarki pojemnikowej typu EC6	54
Rys.49. Zespół napędu ruchu obrotowego uchwytu przedmiotu obrabianego	55
Rys.50. Zespół ruchu wibracyjnego przedmiotu obrabianego	55
Rys.51. Uchwyt mocujący uchwyt przedmiotu obrabianego	56

Rys. 52. Widok aktywnego uchwytu przedmiotowego po zamontowaniu na wygładzarce EC6 a i widok kompletnego stanowiska badawczego b)	56
Rys.53. Animacja pracy systemu obróbkowego na wygładzarce EC6: a) model 3D układu roboczego, b) symulacja ruchów wsadu roboczego i uchwytu przedmiotowego	57
Rys.54. Sekwencyjny układ głównych etapów realizowanego programu badawczego	60
Rys. 55. Rotacyjno – kaskadowa wygładzarka pojemnikowa EC6): a) widok ogólny, b) schemat komory roboczej wraz z kinematyką ruchu kształtek roboczych	61
Rys.56. Schemat komory roboczej wygładzarki EC6.....	62
Rys.57. Widok układu sterowania wygładzarki EC6 a) i widok panelu sterowania b)	62
Rys. 58. Widok uchwytu zamocowanego na komorze roboczej wygładzarki EC6 w układzie roboczym a) i widok w przekroju komory roboczej wraz z lokalizacją przedmiotu obrabianego b)	63
Rys.59. Profilometr optyczny TalySurf CLI 2000.....	64
Rys. 60. Profilometru stykowy Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke	65
Rys.61. Schemat obiektu badań w etapie pierwszym	69
Rys. 62. Rysunek próbki badawczej ze stali AISI 304 a) oraz jej widok ze śladem powierzchni maskowanej przez zacisk mocujący b)	70
Rys.63. Żywieczne kształtki ściernie 02PP10	70
Rys.64. Poprzeczne rozkłady wsadu roboczego w wygładzarce EC6 przy różnej prędkości obrotowej a) i rozkład energii wsadu przy prędkości obrotowej $n=300$ obr/min	71
Rys. 65. Parametry i warunki badań.....	71
Rys.66. Morfologia powierzchni po procesie obróbki przedmiotu w uchwycie stacjonarnym: a) powiększenie x500, b) powiększenie x1000	72
Rys.67. Morfologia powierzchni po procesie obróbki z ruchem obrotowym przedmiotu: a) powiększenie x500, b) powiększenie x1000	72
Rys.68. Morfologia powierzchni po procesie obróbki z ruchem obrotowo-wibracyjnym przedmiotu: a) powiększenie x500, b) powiększenie x1000	72
Rys.69. Zmiany orientacji powierzchni elementu obrabianego względem kierunku ruchu kształtek roboczych a) i rozkład ciśnienia hydrostatycznego wsadu roboczego w kierunku wysokościowym obrabianej powierzchni b)	74
Rys.70. Dominujące zjawiska obróbkowe generowane przez kształtki robocze w zależności od orientacji powierzchni obrabianej względem kierunku ich ruchu	75
Rys.71. Zmiany wartości parametru S_{dr} określającego rozwinięcie powierzchni w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu: S- bez ruchu, O- z ruchem obrotowym, O+D- z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki...76	76
Rys.72. Zmiany wartości parametru S_{sc} charakteryzującego średniokwadratowe nachylenie nierówności w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu: S- bez ruchu, O -z ruchem obrotowym, O+D z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki	77
Rys. 73. Zmiany wartości parametru S_{dq} charakteryzującego średniokwadratowe nachylenie wierzchołków nierówności powierzchni w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu: S- bez ruchu, O -z ruchem obrotowym, O+D z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki	78
Rys. 74. Zmiany stopnia izotropowości struktury geometrycznej powierzchni I w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu: S- bez ruchu, O -z ruchem obrotowym, O+D z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki.....	79
Rys.75. Zmiany stopnia izotropowości struktury geometrycznej powierzchni I w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu a) bez ruchu, b) z ruchem obrotowym, c) z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki	80
Rys. 76. Zmiany wartości parametru S_a określającego średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni w procesie wygładzania z zastosowaniem uchwytu o różnych rodzajach ruchu S-	

bez ruchu, O- z ruchem obrotowym, O+D- z ruchem obrotowo-drgającym w funkcji postępującego czasu obróbki	80
Rys. 77. Ceramiczne kształtki ściernie GP10x10 BD (graniastosłup pochyły).....	85
Rys.78. Schemat obiektu badań intensywnej oraz wygładzającej obróbki powierzchniowej	86
Rys.79. Parametry i warunki badań intensywnej oraz wygładzającej obróbki powierzchniowej	87
Rys. 80 Zmiany wartości parametru Ra charakteryzującej średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości w funkcji prędkości obrotowej n wirnika napędowego wsadu roboczego i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f	90
Rys.81. Zmiany wartości parametru Rt charakteryzującego całkowitą wysokość profilu chropowatości w funkcji prędkości obrotowej n wirnika napędowego wsad roboczy i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f	91
Rys.82. Zmiany wartości parametru RPc charakteryzującego liczbę wierzchołków na jednostkowej długości profilu chropowatości w funkcji prędkości obrotowej n wirnika napędowego wsadu roboczego i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f	92
Rys.83. Zmiany wartości parametru Sdr określającego stopień rozwinięcia powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f	97
Rys.84. Zmiany wartości parametru Sa określającego średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f	98
Rys.85. Zmiany wartości parametru SPc opisującego gęstość wzniesień powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f	99
Rys.86 Zmiany wartości parametru I określającego stopień izotropowości w funkcji prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f	100
Rys.87. Zmiany wartości parametru Sdq określającego średniokwadratowe nachylenie nierówności powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika n i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f	101
Rys.88. Zmiany wartości parametru Ssc określającego średniej arytmetycznej krzywizny wierzchołków nierówności powierzchni w funkcji prędkości obrotowej wirnika wygładzarki n i drgań przedmiotu obrabianego f	102
Rys.89. Zmiany wartości parametru Sa w funkcji wartości parametru Sdr	103
Rys.90. Zmiany wartości parametru SPc określających liczbę wzniesień na jednostce powierzchni w funkcji wartości parametru Sdr	103
Rys. 91. Zmiany wartości parametru Sdq charakteryzującego średniokwadratowe nachylenie nierówności w funkcji wartości parametru Sdr	104
Rys. 92 Zmiany stopnia izotropowości powierzchni I w funkcji wartości parametru Sdr	105
Rys.93.Schemat przebiegu 3-etapowego procesu wygładzania w rotacyjno-kaskadowej wygładzarce pojemnikowej z okresowym przemieszczaniem przedmiotu obrabianego zamocowanego w uchwycie.....	108
Rys.94. Przebieg zmian chropowatości powierzchni w procesie 3- etapowej obróbki dla różnych wariantów technologicznych	109
Rys.95. Ceramiczne kształtki ściernie GP10x10 BD (graniastosłup pochyły).....	111
Rys.96. Rozkład średnich wartości energii kinetycznej wsadu roboczego dla prędkości obrotowej wirnika wygładzarki EC6 $n= 450$ obr/min. [43,44]	111
Rys. 97. Uchwyt przedmiotowy: a) widok ogólny, b) uchwyt zamontowany na podstawie	112
Rys.98. Promieniowe położenie punktów pomiarowych dla poszczególnych etapów obróbki	112
Rys.99. Parametry chropowatości powierzchni przedmiotów obrabianych zależności od miejsca ich orientacji w komorze roboczej wygładzarki.....	113
Rys.100. Wpływ skutków operacji poprzedzających na kształtowanie chropowatości powierzchni w procesie rotacyjno-kaskadowego wygładzania pojemnikowego	119
Rys. 101.Widok płytki skrawającej SANDVIK TNMG160404R-K 4425 a) i stopień jej zużycia b)	120

Rys.102 Profile chropowatości powierzchni po toczeniu : a) narzędzie ostre, b) narzędzie stępione .	121
Rys. 103 Uniwersalna szlifierka do wałków i otworów JOTES SWA-25	122
Rys.104. Profile chropowatości powierzchni po szlifowaniu: a) ściernicą ostrą, b) ściernicą stępią	122
Rys.105. Schemat przebiegu procesu kształtowania struktury geometrycznej powierzchni podczas wygładzania pojemnikowego	124
Rys.106. Widok rotacyjno-kaskadowej wygładzarki pojemnikowej EC10 a) kinematyka ruchu kształtek roboczych b).....	125
Rys. 107. Ceramiczne kształtki ściernie GP10x10	125
Rys. 108. Widok wibracyjnej wygładzarki pojemnikowej W15 a) i kinematyka ruchu kształtek roboczych b).....	126
Rys. 109. Porcelanowe kształtki polerskie CMG a) i proszek ścierny GP20	126
Rys. 110. Profile chropowatości powierzchni próbek po operacjach wygładzania pojemnikowego w wygładzarce EC10 i W15, po poprzedzających operacjach toczenia i szlifowania z zastosowaniem narzędzi ostrych a) i stępionych b).....	127
Rys.111. Transformacja chropowatości powierzchni stali AISI 304 w sekwencyjnym procesie technologicznym w zależności od stanu zużycia narzędzi obróbkowych w operacjach poprzedzających proces wygładzania	129

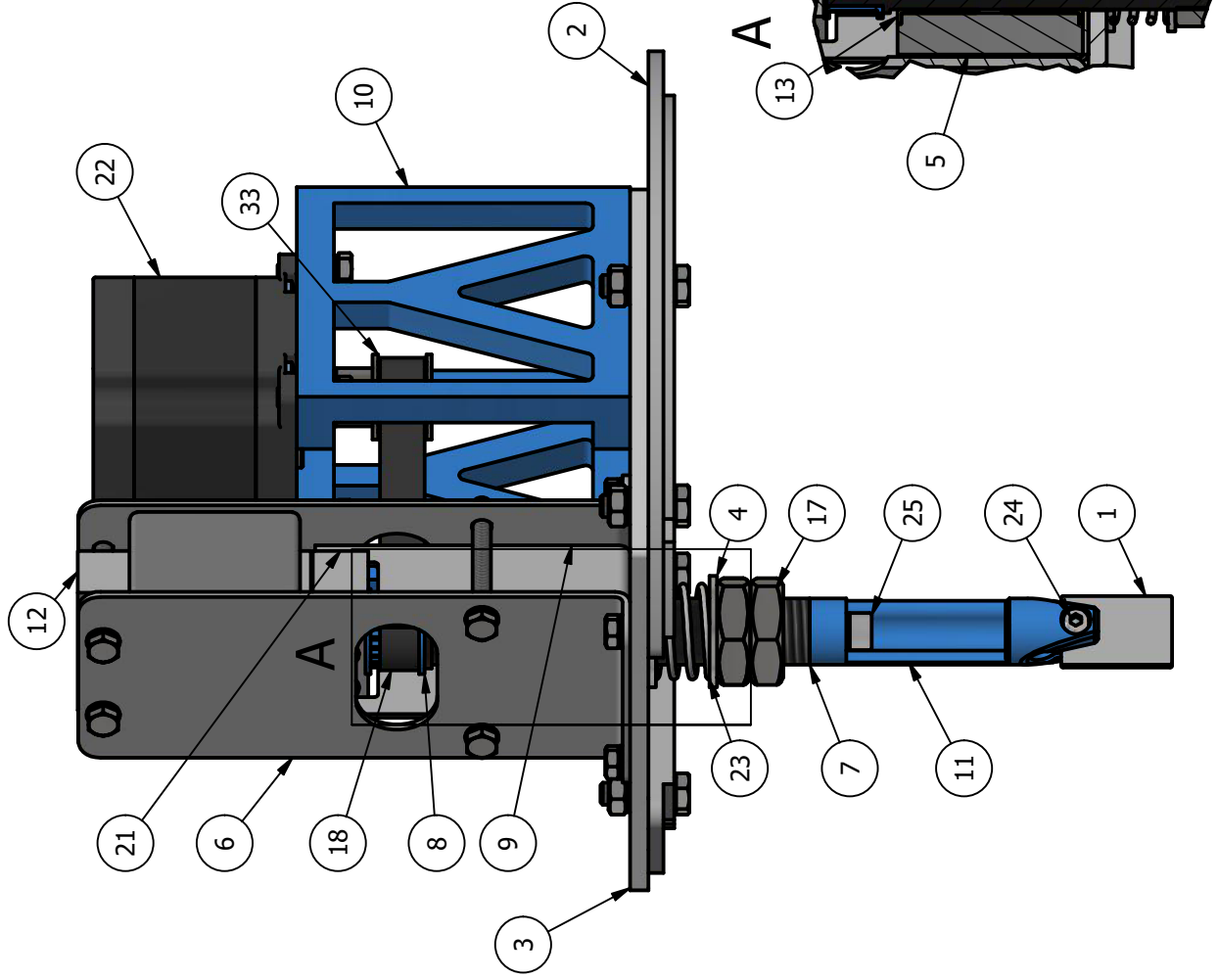
Spis tabel

Tab.1. Przeciętne czasy różnych operacji obróbki wygładzającej w rotacyjno-kaskadowych obrabiarkach pojemnikowych [24,33]	11
Tab. 2. Podstawowe rodzaje kształtek porcelanowych[1]	24
Tab.3. Dominujące zjawiska występujące podczas obróbki z prostopadłą orientacją obrabianej powierzchni względem kierunku ruchu kształtek(a)	33
Tab.4. Dominujące zjawiska występujące podczas obróbki równoległą orientacją obrabianej powierzchni względem kierunku ruchu kształtek (b).....	34
Tab.5. Dominujące zjawiska występujące podczas obróbki ze skrotną orientacją obrabianej powierzchni względem kierunku ruchu kształtek (c)	34
Tab.6. Parametry i warunki procesu badań.....	39
Tab.7. Części składowe uchwytu przedmiotowego	53
Tab.8. Charakterystyka metod wykorzystywanych w systemie pomiarowym Talysurf CLI 2000	65
Tab.9. Parametry techniczne profilometru stykowego Hommel Tester T8000.....	66
Tab.10. Oznaczenia stali AISI 304 według międzynarodowych norm	66
Tab.11. Skład chemiczny stali nierdzewnej AISI 304	67
Tab.12. Właściwości mechaniczne stali AISI 304.....	67
Tab.13. Wyniki przeprowadzonych wariantów badań.....	75
Tab.14. Wartości parametru ΔSa i ΔSdr dla badanych sposobów obróbki	81
Tab.15. Wyniki badań wpływu prędkości obrotowej wirnika wygładzarki EC6 i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego na wybrane parametry profilu chropowatości powierzchni	88
Tab. 16. Wpływ podstawowych grup parametrów chropowatości na właściwości użytkowe i eksploatacyjne powierzchni [12]	95
Tab. 17. Wyniki badań wpływu prędkości obrotowej wirnika wygładzarki v i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego f na wybrane parametry chropowatości powierzchni obrabianych ..	96
Tab. 18. Wartości parametru ΔSa i ΔSdr dla badanych porównywanych sposobów obróbki	114
Tab. 19. Oddziaływania podstawowych czynników występujących w operacjach technologicznych na zmiany wybranych cech jakościowych obrabianych powierzchni	118
Tab. 20. Parametry profili chropowatości powierzchni stali AISI 304 po operacji toczenia	121
Tab. 21. Parametry profili chropowatości powierzchni stali AISI 304 po procesie toczenia i szlifowania narzędziami o zróżnicowanym stopniu ostrości	123
Tab. 22. Transformacja chropowatości powierzchni w sekwencyjnym procesie obróbki stali AISI 304 w zależności od stanu ostrości narzędzi obróbkowych w zależności od stanu ostrości narzędzi	127
Tab. 23. Wartości wskaźnika efektywności obróbki ΔRa dla badanych sposobów	128

Spis załączników

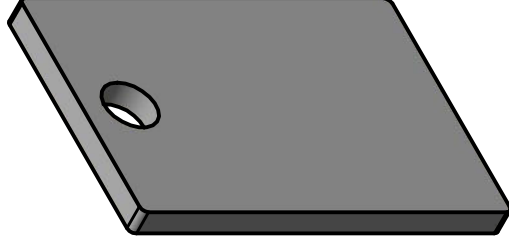
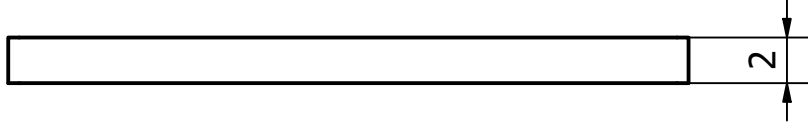
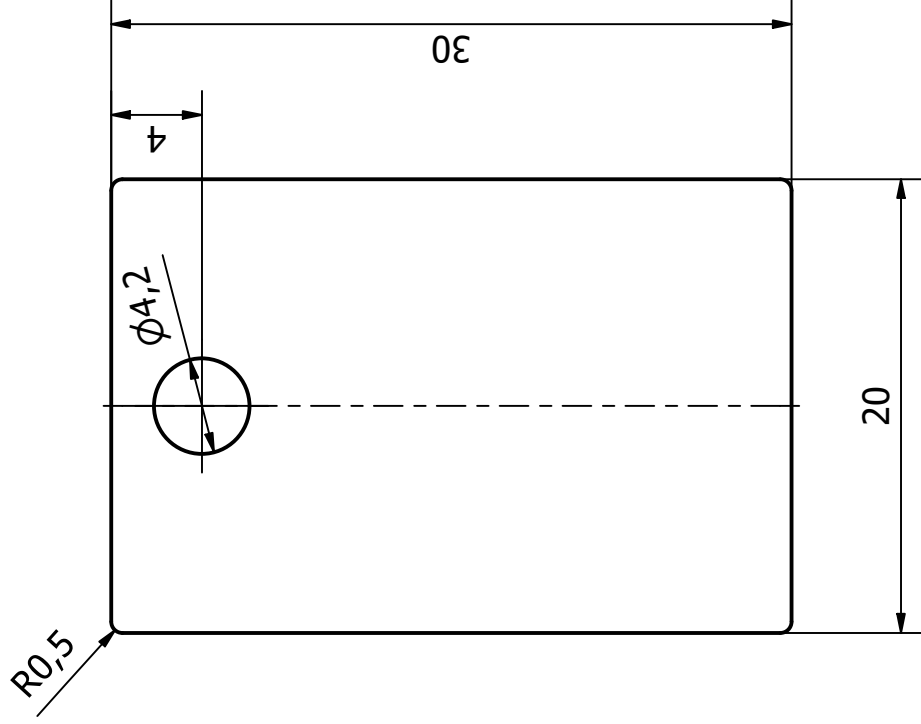
- Załącznik 1 EC6-UA-000 Uchwyt aktywny
- Załącznik 2 EC6-UA-001 Płytki testowa
- Załącznik 3 EC6-UA-101 Pokrywa wygładzarki
- Załącznik 4 EC6-UA-102 Płyta przesuwna
- Załącznik 5 EC6-UA-103 Podkładka Ø18,5
- Załącznik 6 EC6-UA-104 Gniazdo łożyska
- Załącznik 7 EC6-UA-105 Mocowanie elektromagnesu
- Załącznik 8 EC6-UA-106 Oś uchwytu
- Załącznik 9 EC6-UA-107 Zębatka uchwytu
- Załącznik 10 EC6-UA-108 Kosz mocujący
- Załącznik 11 EC6-UA-109 Wspornik silnika
- Załącznik 12 EC6-UA-110 Chwytnik
- Załącznik 13 Animacja pracy uchwytu aktywnego

LISTA CZĘŚCI		
LP	ILOŚĆ	NUMER CZĘŚCI
1	1	EC6-UA-001 Płytką testowa
2	1	EC6-UA-101 Pokrywa uchwytu
3	1	EC6-UA-102 Płyta przesuwna
4	2	EC6-UA-103 Podkładka Ø18,5
5	1	EC6-UA-104 Gniazdo łożyska
6	2	EC6-UA-105 Mocowanie elektromagnesu
7	1	EC6-UA-106 Oś uchwytu
8	1	EC6-UA-107 Zębátka uchwytu
9	1	EC6-UA-108 Kosz mocujący
10	2	EC6-UA-109 Wspornik silnika
11	1	EC6-UA-110 Chwytak
12	1	elektromagnes
13	2	H1FM-1820-22
14	1	Nakrétka DIN 934 M4 A2
15	8	Nakrétka DIN 934 M5 A2
16	4	Nakrétka DIN 934 M6 A2
17	4	Nakrétka niska DIN 439 M18x1 ocynk
18	1	Pas zębátý
19	12	Podkładka Schnorr 5
20	9	Podkładka Schnorr 6
21	1	rdzeń elektromagnesu
22	1	Silnik krokowy NEMA 23
23	1	sprężyna
24	1	Śruba imbus DIN 912 ISO 4762 M4x16 A2
25	1	Śruba imbus DIN 912 ISO 4762 M6x20 A2
26	4	Śruba maszynowa DIN 933 M5x45 ocynk
27	4	Śruba maszynowa DIN 933 M6x16 A2
28	4	Śruba maszynowa DIN 933 M6x20 A2
29	2	Wkr. doc. z końcem płaskim DIN 913 M3x4 A2
30	4	Wkręt z łbem stożkowym DIN 7991 M5x10 A2
31	2	Wkręt z łbem stożkowym DIN 7991 M5x30 A2
32	4	Wkręt z łbem stożkowym DIN 7991 M6x12 A2
33	1	zębátaka silnika



A (1 : 2)

EC6-UA-000 Uchwyt aktywny		
Zaprojektowany przez	Skala	Arkusz
mgr inż. Mateusz Juniewicz	1 : 2	1 / 1



Materiał: 304

EC6-UA-001 Płytki testowa

Zaprojektowany przez

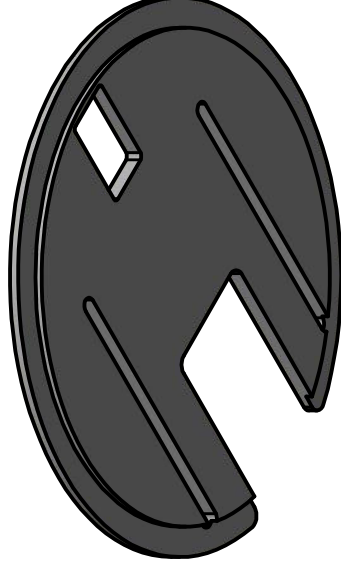
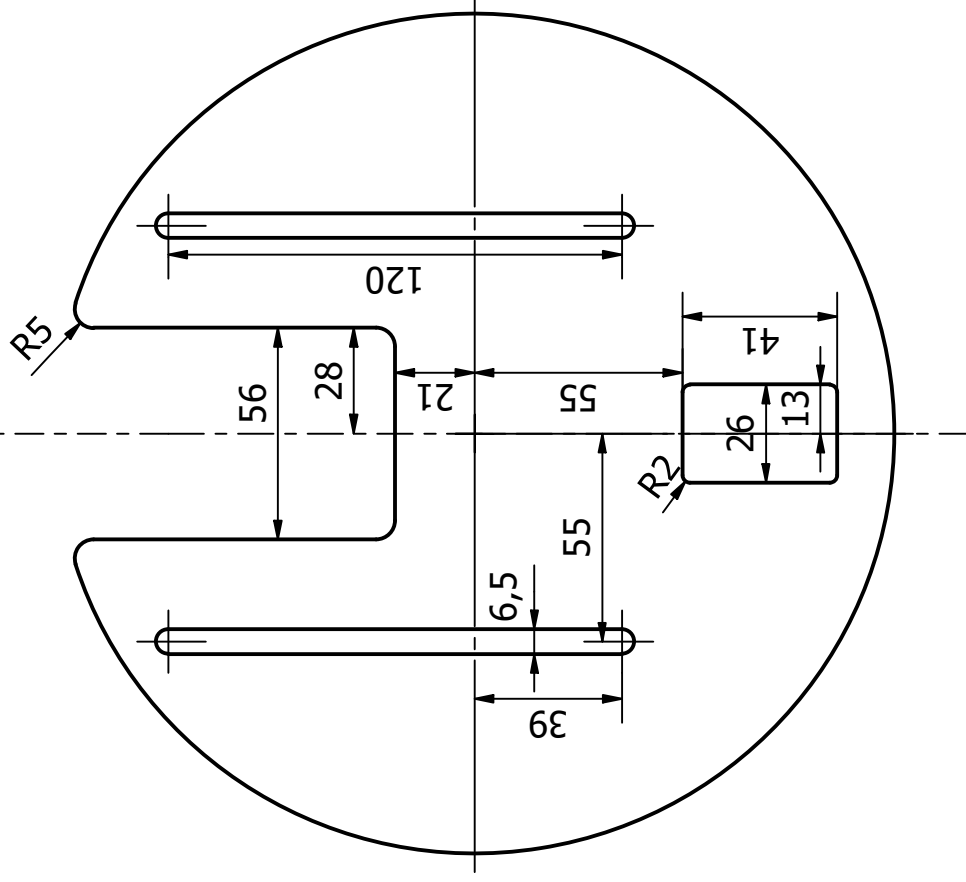
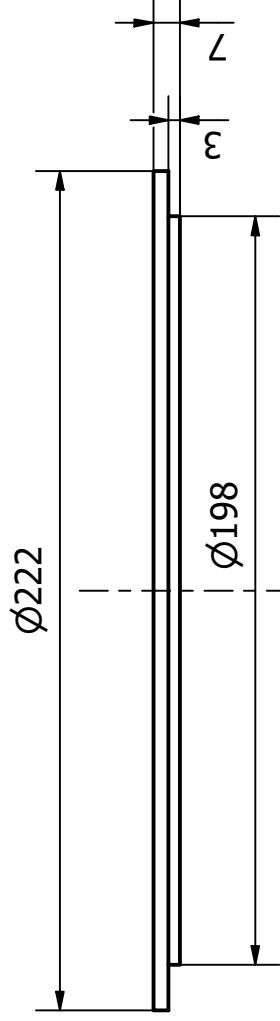
mgr inż. Mateusz Juniewicz

Skala

3 : 1

Arkusz

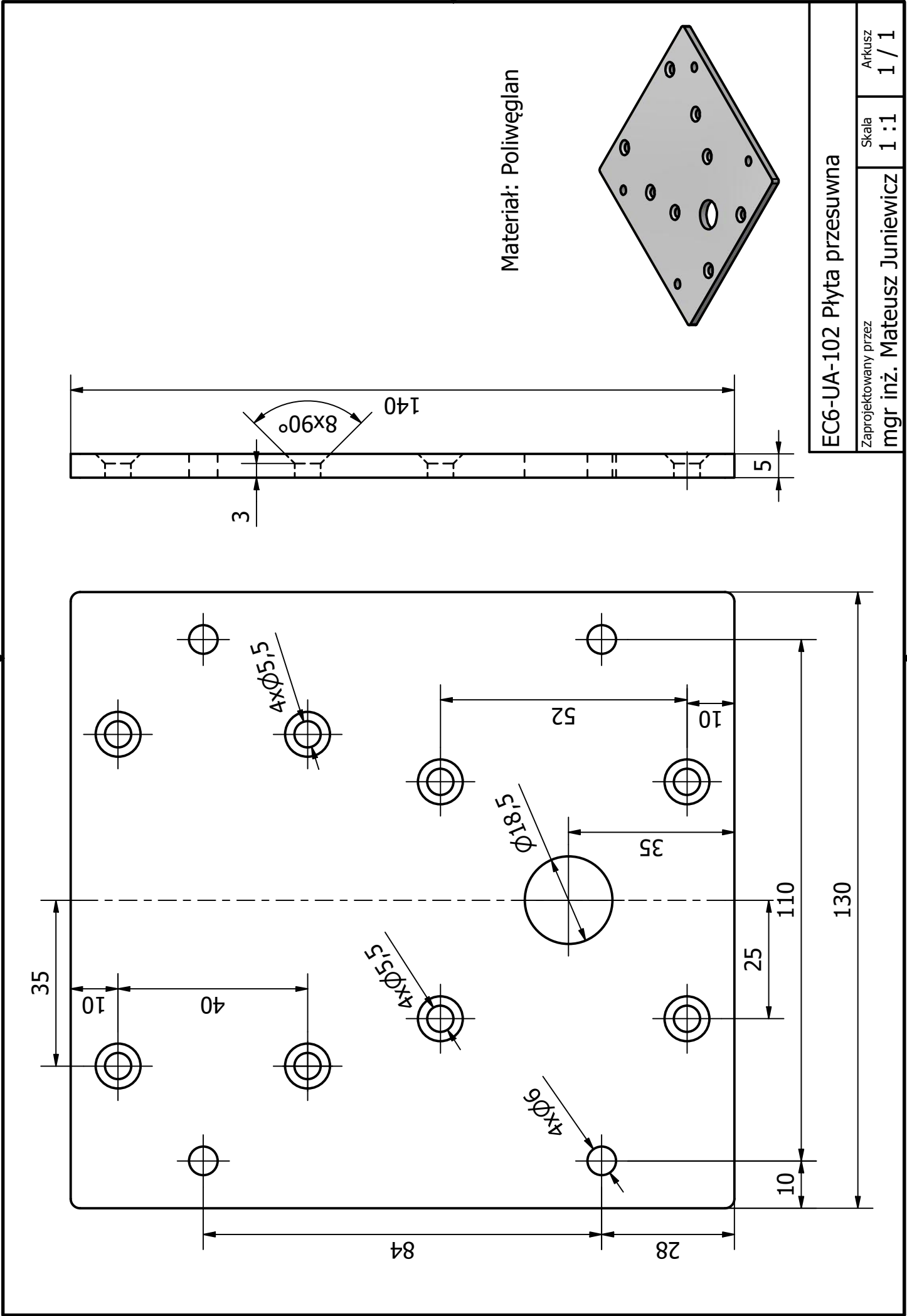
1 / 1



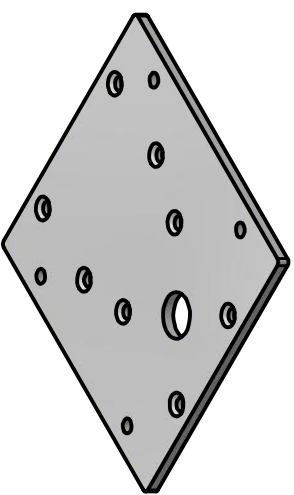
Materiał: Poliwęglan

EC6-UA-101 Pokrywa uchwyty

Zaprojektowany przez	Skala	Arkusz
mgr inż. Mateusz Juniewicz	1 : 2	1 / 1

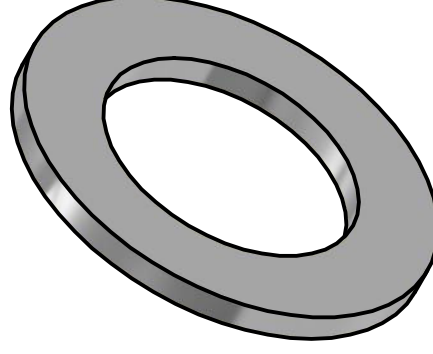
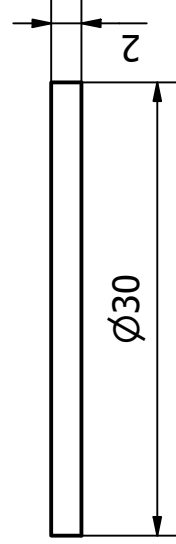
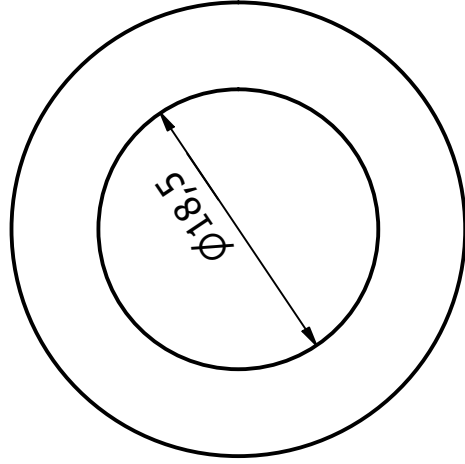


Materiał: Poliwęglan



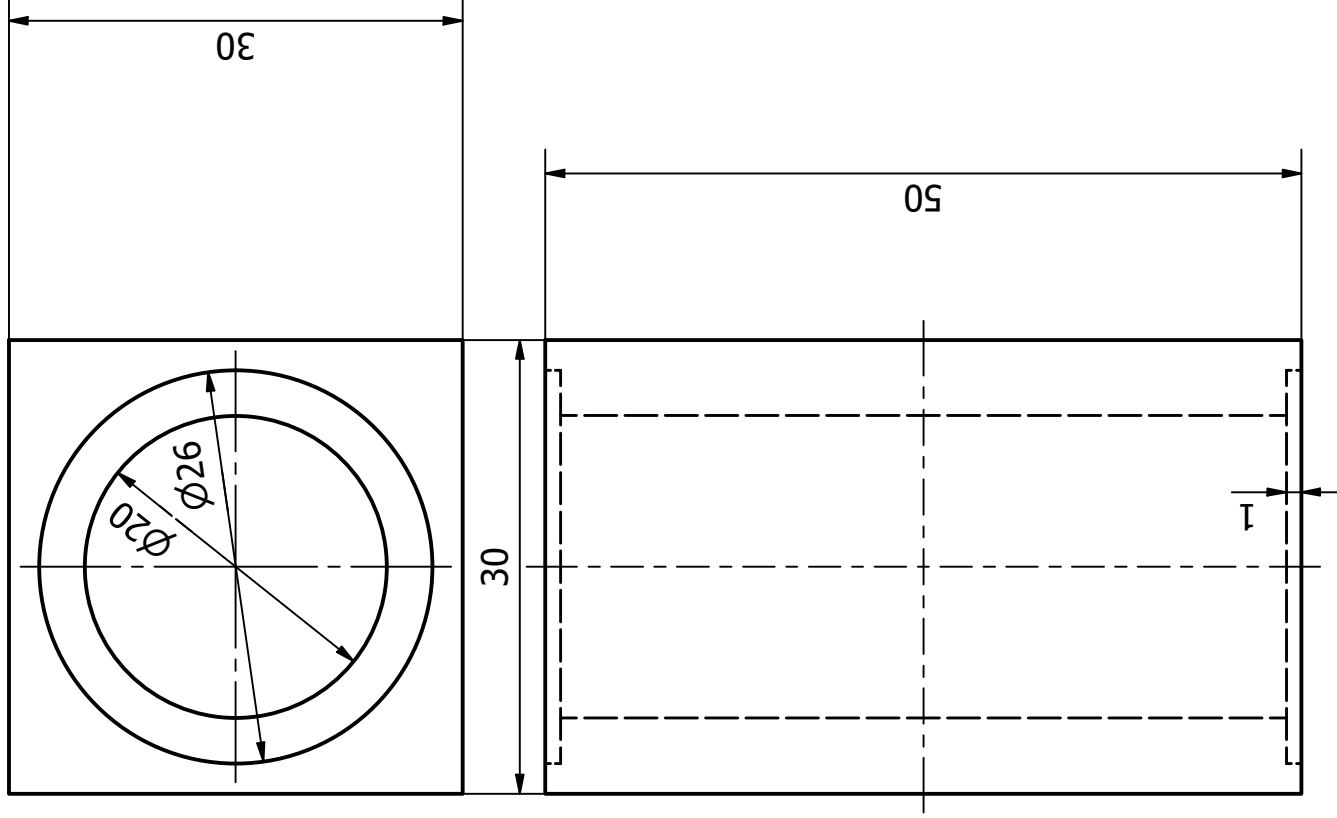
EC6-UA-102 Płyta przesuwna

Zaprojektowany przez mgr inż. Mateusz Juniewicz		Skala 1 : 1	Arkusz 1 / 1
--	--	----------------	-----------------

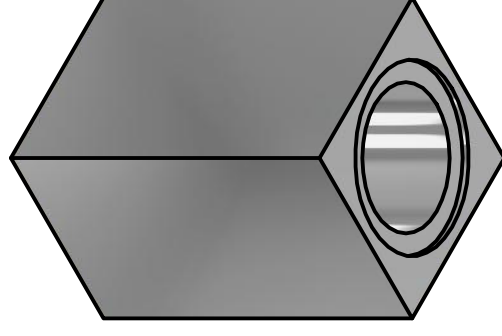


Materiał: 304

EC6-UA-103 Podkładka $\phi 18,5$		
Zaprojektowany przez	Skala	Arkusz
mgr inż. Mateusz Juniewicz	2: 1	1 / 1



Materiał : PA6



EC6-UA-104 Gniazdo łożyska

Zaprojektowany przez

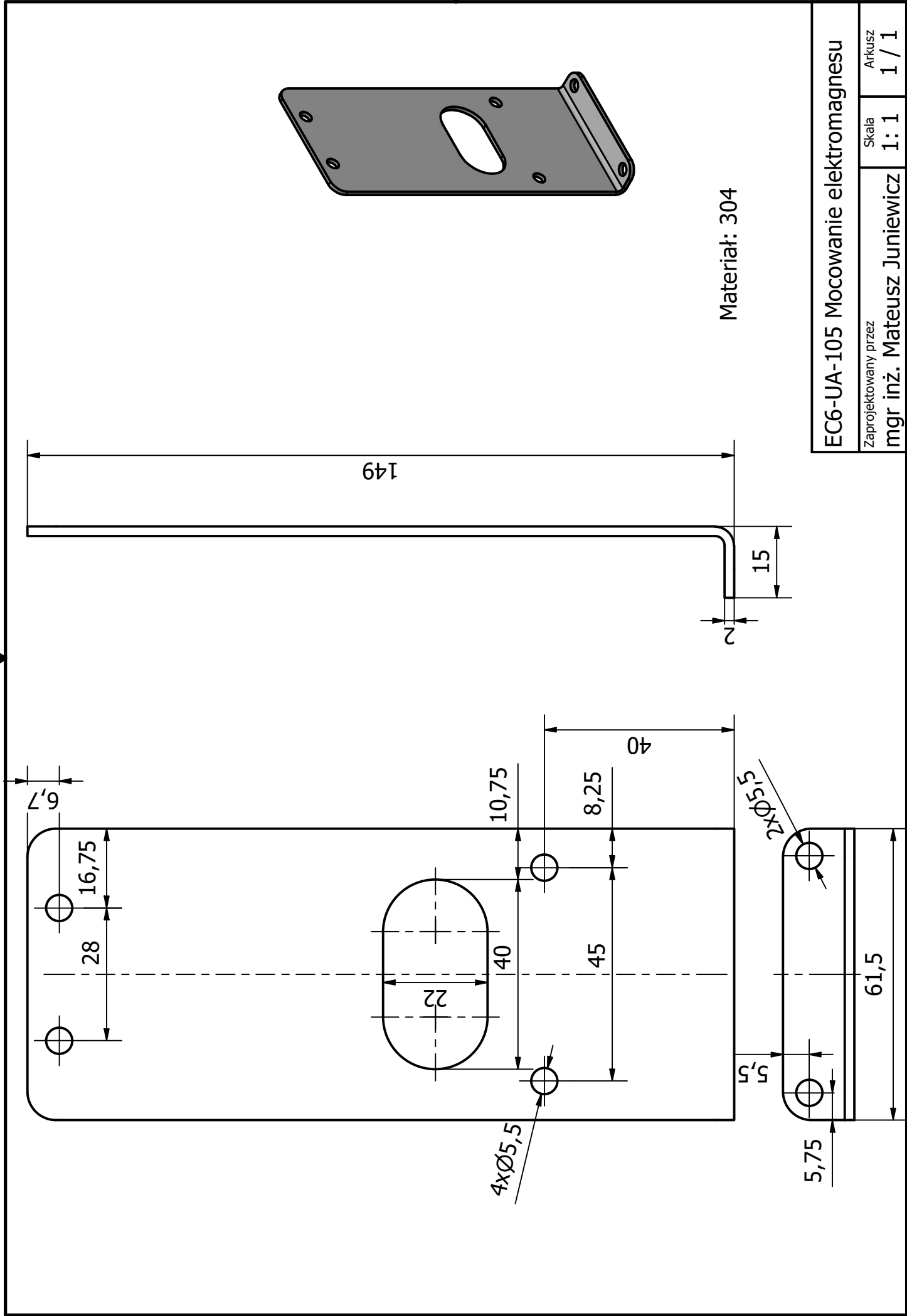
mgr inż. Mateusz Juniewicz

Skala

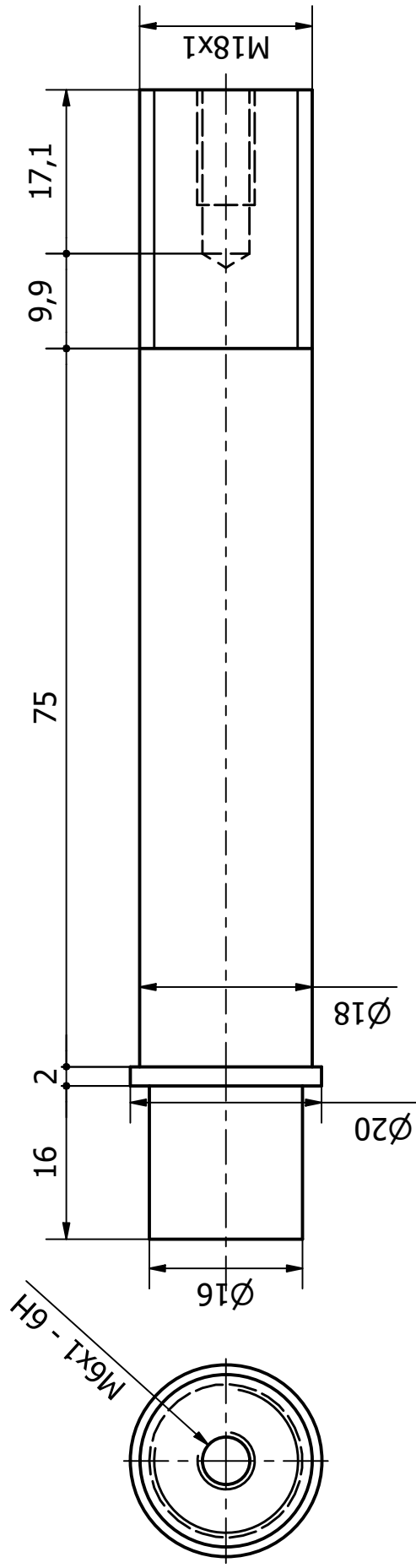
2 : 1

Arkusz

1 / 1



EC6-UA-105 Mocowanie elektromagnesu		
Zaprojektowany przez	Skala	Arkusz
mgr inż. Mateusz Juniewicz	1: 1	1 / 1



Materiał: Ertacetal

EC6-UA-106 Oś uchwyty

Zaprojektowany przez

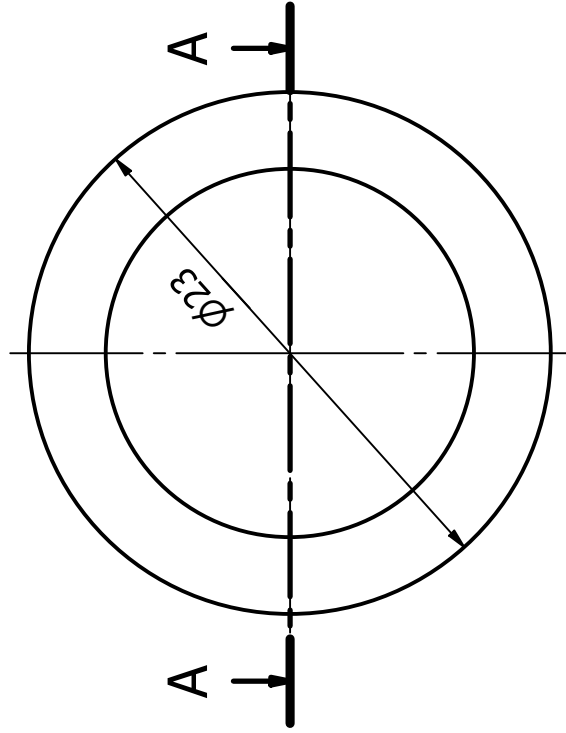
Skala

Arkusz

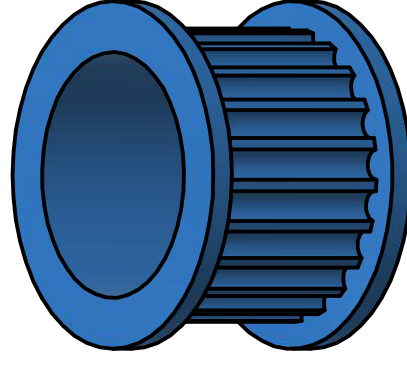
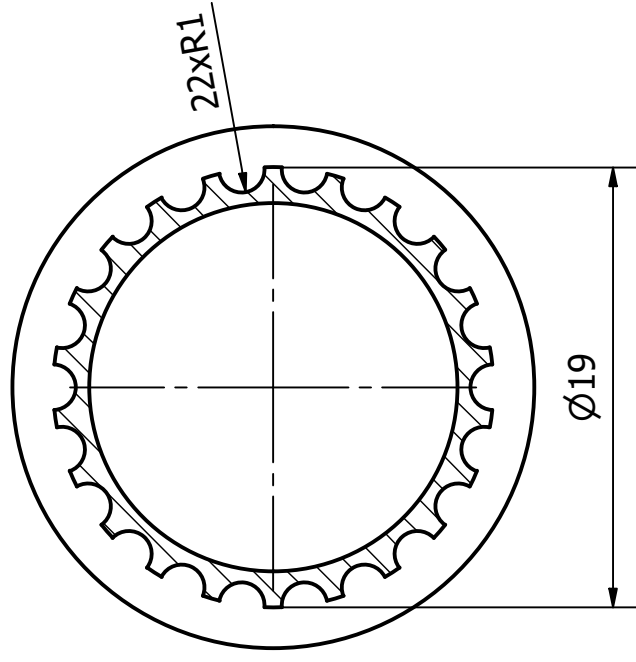
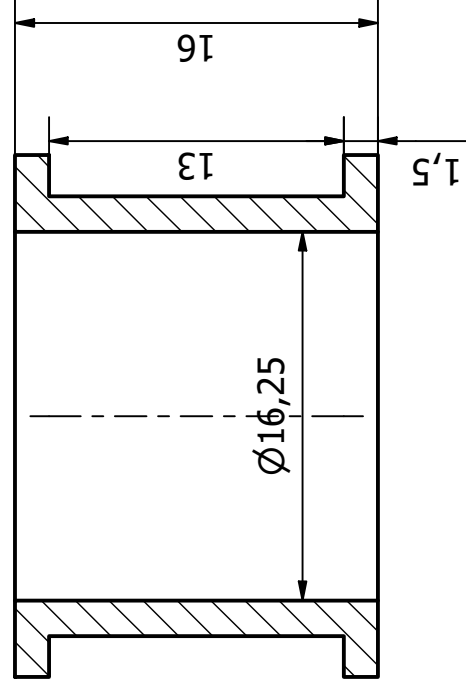
mgr inż. Mateusz Juniewicz

1,5 : 1

1 / 1



A-A (3 : 1)



Materiał: PLA

EC6-UA-107 Zębatka uchwytu

Zaprojektowany przez

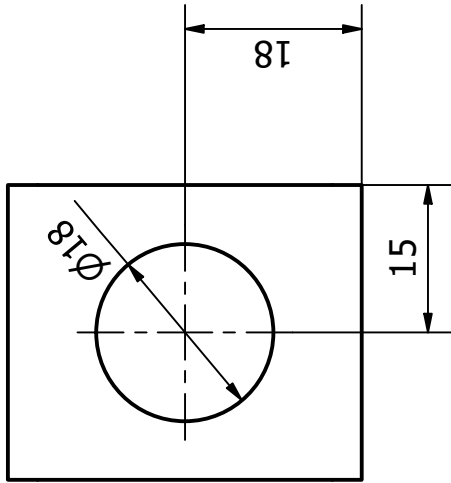
mgr inż. Mateusz Juniewicz

Skala

3 : 1

Arkusz

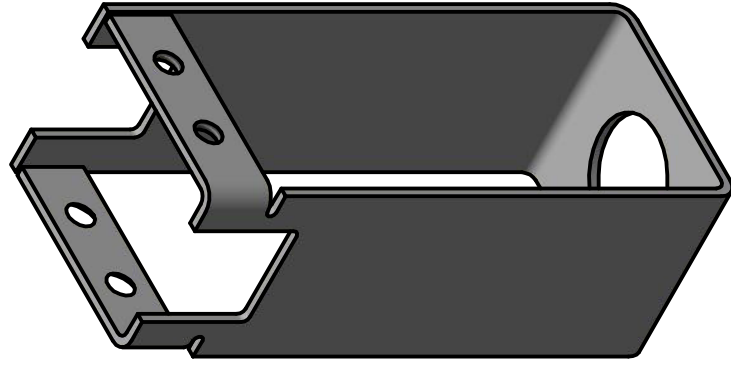
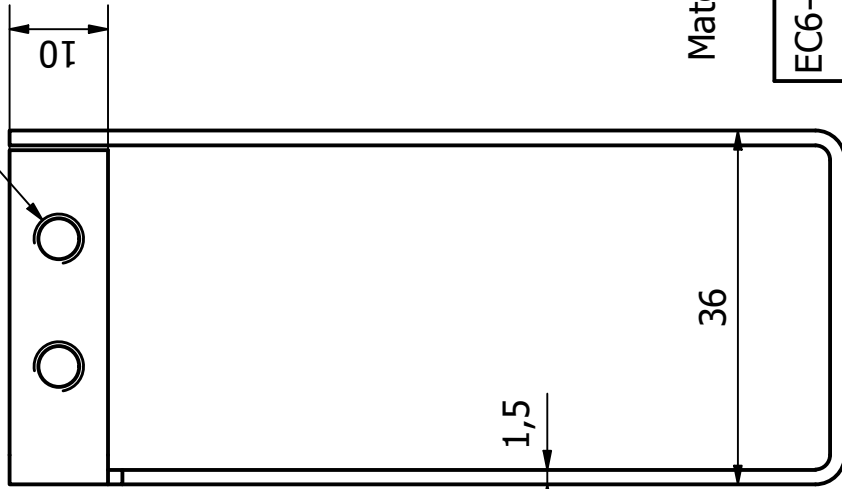
1 / 1



2x $\varnothing 7,2 \times 90^\circ$



2xM5x0,8 - 6H



Materiał: 304

EC6-UA-108 Kosz mocujący

Zaprojektowany przez

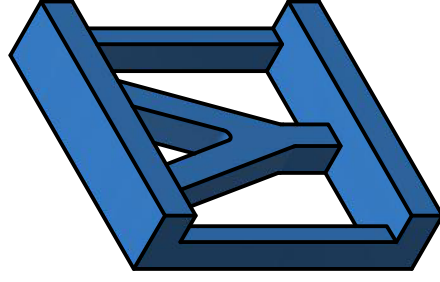
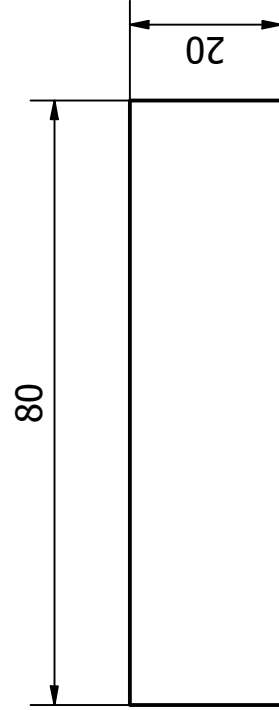
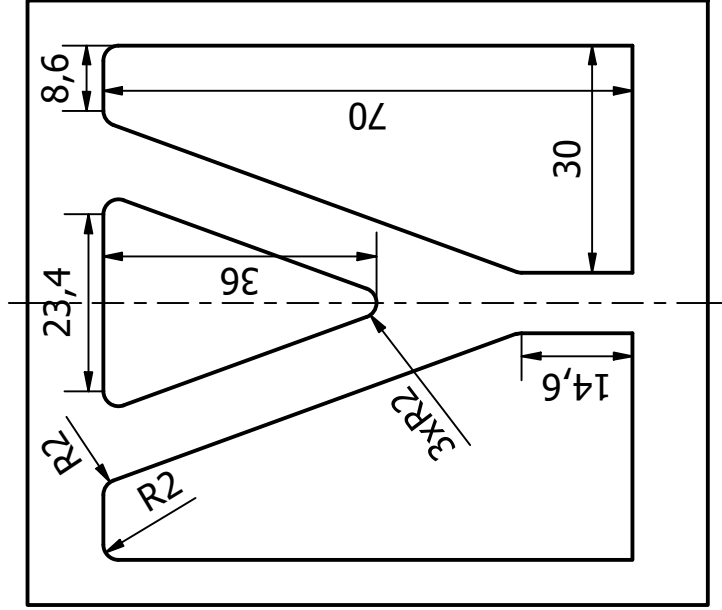
Skala

Arkusz

1,3 : 1

1 / 1

mgr inż. Mateusz Juniewicz



Materiał: PLA

EC6-UA-109 Wspornik silnika

Zaprojektowany przez

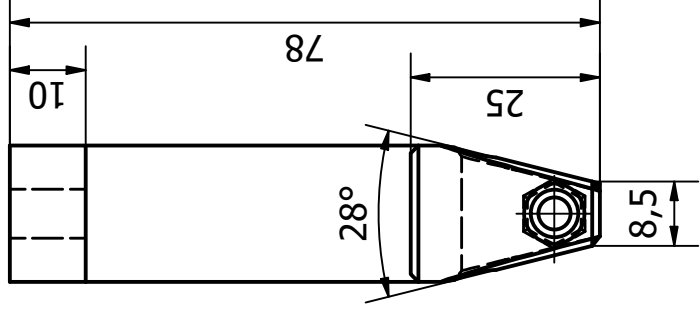
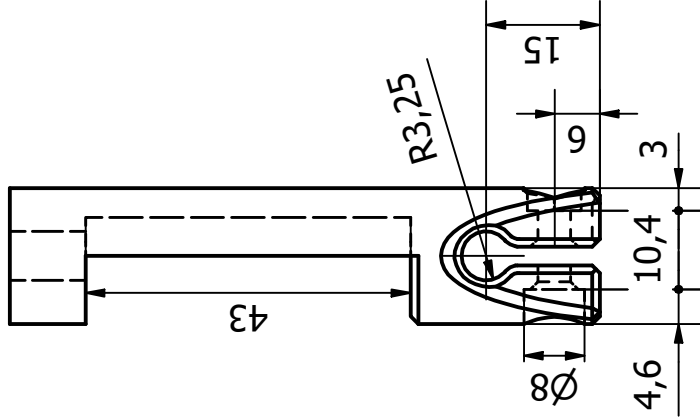
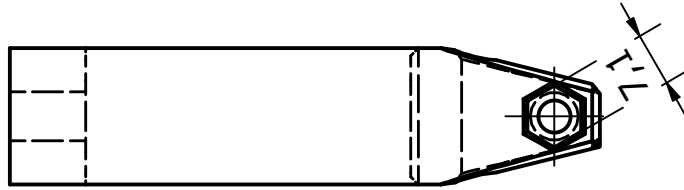
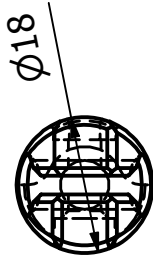
mgr inż. Mateusz Juniewicz

Skala

1 : 1

Arkusz

1 / 1



Materiał : PET-G

EC6-UA-110 Chwytek

Zaprojektowany przez

mgr inż. Mateusz Juniewicz

Skala

1 : 1

Arkusz

1 / 1